

# 地基GNSS反演大气水汽的 理论与方法

Theory and Method of Retrieving Precipitable  
Water Vapor from Ground-based GNSS

刘立龙 黎峻宇 黄良珂 谢劭峰 著

非外借

 测绘出版社

# 地基 GNSS 反演大气水汽的理论与方法

Theory and Method of Retrieving Precipitable Water Vapor from  
Ground-based GNSS

刘立龙 黎峻宇 黄良珂 谢劭峰 著

测绘出版社

· 北京 ·

©刘立龙 黎峻宇 黄良珂 2018  
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。

图书在版编目(CIP)数据

地基 GNSS 反演大气水汽的理论与方法 / 刘立龙等著. —北京: 测绘出版社, 2018. 3  
ISBN 978-7-5030-3911-9

I. ①地… II. ①刘… III. ①全球定位系统—应用—大气—水汽—研究 IV. ①P426—39  
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 310231 号

内 容 简 介

本书围绕如何利用地基卫星导航定位系统(GNSS)精密反演大气水汽的问题,详细阐述了 GNSS 反演大气水汽从对流层延迟模型构建、对流层干延迟的获取、大气加权平均温度模型的建立及湿延迟与大气水汽转换系数模型的构造到 GNSS 大气水汽生成等环节的相关理论及方法。

本书可作为测绘工程、遥感、大气探测等相关专业本科生及科研人员的参考书;同时本书又包含地基 GNSS 反演大气水汽应用的实例,可以作为气象学相关领域从业人员的参考用书。

|      |                  |      |                   |      |     |      |     |
|------|------------------|------|-------------------|------|-----|------|-----|
| 责任编辑 | 王佳嘉              | 封面设计 | 李 伟               | 责任校对 | 石书贤 | 责任印制 | 陈 超 |
| 出版发行 | 测绘出版社            | 电 话  | 010—83543956(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—68531363(编辑部) |      |     |      |     |
| 电子信箱 | smp@sinomaps.com | 网 址  | www.chinasmp.com  |      |     |      |     |
| 印 刷  | 北京京华虎彩印刷有限公司     | 经 销  | 新华书店              |      |     |      |     |
| 成品规格 | 184mm×260mm      |      |                   |      |     |      |     |
| 印 张  | 15.25            | 字 数  | 378 千字            |      |     |      |     |
| 版 次  | 2018 年 3 月第 1 版  | 印 次  | 2018 年 3 月第 1 次印刷 |      |     |      |     |
| 印 数  | 001—800          | 定 价  | 78.00 元           |      |     |      |     |

书 号 ISBN 978-7-5030-3911-9

审 图 号 GS(2017)3096 号

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。



## 前 言

水汽是大气系统的重要组成部分之一,它不仅与降雨直接相关,还与二氧化碳一起作为反映温室效应的两个主要指标。其在大气对流活动方面扮演着重要角色,同时也是灾害天气形成及变迁等主要的“驱动者”。尽管水汽在大气中的含量较少,但大气水汽含量的变化与诸多天气的突变和自然灾害的形成均有直接的联系,如暴雨、厄尔尼诺现象等极端天气。水汽又是一种变化极其剧烈的气象元素,随时间和空间的变化较为显著。在灾害性天气发生进程中,大气水汽含量在水平和垂直方向上均有可能发生剧烈的变化;同时水汽在中小尺度灾害性天气(水平尺度在 100 km 左右)的监测和预报中占有重要地位,而中小尺度灾害性天气的生命周期往往只有几个小时,甚至更短。由此可见,水汽是反映大气系统变化、监测和预报灾害性天气的关键参数之一。传统的水汽监测手段主要依赖于无线电探空仪、微波辐射计和激光雷达探测等大气观测技术,但其存在时空分辨率低、价格昂贵等不足。因此,亟需发展新的水汽探测方法。

地基 GNSS 技术的发展为水汽探测提供了一种新途径,并由此兴起了一门多学科交叉的新兴学科——GNSS 气象学。GNSS 技术具有实时或近实时、全天候、高精度、高时间分辨率、覆盖范围广和价格低廉等诸多优点,利用地基 GNSS 技术可反演出实时或近实时、高精度、高时空分辨率的大气可降雨量,可为短期天气预报及短期灾害性气象预测提供重要的基础数据。目前,国内外关于地基 GNSS 大气水汽反演的专著尚无多见,鉴于此,作者于 2010 年依托于国家自然科学基金项目,并带领 GNSS 气象学方向的硕士研究生较系统地研究了地基 GNSS 大气水汽反演理论与方法,发展了对流层延迟建模的关键技术,建立了大气水汽反演关键参数的精化模型,构建了关键大气参数精密插值的模型。通过多年的努力,在这一新的研究方向上积累了一些成果,此书正是作者多年研究工作的总结。

本书内容不仅包括 GNSS 大气水汽反演的基本原理与方法,还涉及 GNSS 区域对流层延迟精细建模的关键技术、区域对流层大气加权平均温度精化模型构建方法、关键大气参数精密插值模型与方法的建立,以及 GNSS 对流层大气可降雨量在雾霾天气应用的探索分析等。作者希望能抛砖引玉,对从事 GNSS 气象学(尤其是 GNSS 大气水汽的创新应用)理论与应用研究的科技工作者提供一些参考,同时也期盼有更多、更好的该方面的著作问世,共同推动这一新兴学科的发展及创新应用。

本书的研究内容与成果得到了国家自然科学基金项目(No. 41664002、41541032)、广西自然科学基金重点项目(No. 2017GXNSFDA198016)、广西八桂学者等的资助。本书部分



研究内容是作者和姚朝龙、熊思、唐艳新、周森、张朋飞等硕士共同完成的,非常感谢他们的支持和辛勤工作。同时,衷心感谢多年来一直给予作者关心和支持的所有同事、朋友及学术同仁。

本书于 2015 年开始撰写,尽管经过数次的修改与讨论,但无奈限于作者水平和时间,难免书中还有不足甚至错误之处,恳请读者批评指正。

# 目 录

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 第 1 章 绪 论                         | 1   |
| § 1.1 研究背景和意义                     | 1   |
| § 1.2 国内外地基 GPS 气象学研究状况           | 5   |
| § 1.3 存在的主要问题                     | 8   |
| 第 2 章 地基 GPS 反演大气可降雨量的原理          | 9   |
| § 2.1 GPS 信号延迟                    | 9   |
| § 2.2 大气可降雨量的推算                   | 16  |
| § 2.3 湿延迟误差分析                     | 19  |
| § 2.4 转换系数 $K$ 误差分析               | 20  |
| 第 3 章 地基 GPS 天顶对流层延迟改正模型与方法研究     | 22  |
| § 3.1 引 言                         | 22  |
| § 3.2 天顶对流层延迟时间序列特征分析             | 28  |
| § 3.3 亚洲地区 EGNOS 模型计算 ZTD 精度分析与改进 | 35  |
| § 3.4 UNB3m 模型简介及其在亚洲地区的精度分析      | 56  |
| § 3.5 UNB3m 对流层延迟模型的改正及改正后精度评定    | 74  |
| § 3.6 本章小结                        | 92  |
| 第 4 章 区域天顶对流层延迟改正模型建立与分析          | 94  |
| § 4.1 引 言                         | 94  |
| § 4.2 广西地区天顶对流层延迟改正模型建立与分析        | 94  |
| § 4.3 对流层区域建模及 EGNOS 模型适应性的研究     | 106 |
| § 4.4 本章小结                        | 116 |
| 第 5 章 动态映射函数在对流层延迟改正中的应用          | 118 |
| § 5.1 引 言                         | 118 |
| § 5.2 常用映射函数模型的比较                 | 118 |
| § 5.3 动态映射函数应用于对流层延迟改正            | 122 |
| § 5.4 本章小结                        | 132 |
| 第 6 章 对流层干延迟计算关键技术研究              | 134 |
| § 6.1 引 言                         | 134 |
| § 6.2 天顶湿延迟模型对比分析                 | 135 |
| § 6.3 获取地面气压方法研究                  | 136 |
| § 6.4 获取地面气压的一种新方法                | 145 |
| § 6.5 本章小结                        | 157 |

|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| 第 7 章 大气加权平均温度计算方法研究                                         | 159 |
| § 7.1 引 言                                                    | 159 |
| § 7.2 新疆地区大气加权平均温度模型的建立与分析                                   | 160 |
| § 7.3 中国低纬度地区加权平均温度模型建立                                      | 167 |
| § 7.4 一种获取大气加权平均温度的新方法                                       | 171 |
| § 7.5 本章小结                                                   | 178 |
| 第 8 章 湿延迟与可降雨量转换关系研究                                         | 180 |
| § 8.1 引 言                                                    | 180 |
| § 8.2 顾及地形起伏的中国低纬度地区区域转换系数 $K$                               | 181 |
| § 8.3 西部地区 Emardson 模型的建立与分析                                 | 185 |
| § 8.4 顾及地形起伏的西部地区 $H$ 模型的建立与分析                               | 190 |
| § 8.5 本章小结                                                   | 199 |
| 第 9 章 基于地基 GNSS 反演大气可降雨量的精度分析                                | 201 |
| § 9.1 GAMIT 计算大气可降雨量精度分析                                     | 201 |
| § 9.2 基于 ECMWF/MSLP 插值气压的地基 GPS 反演大气可降雨量精度分析                 | 203 |
| § 9.3 基于新疆地区局部加权平均温度的地基 GPS 反演大气可降雨量精度分析                     | 204 |
| § 9.4 GGOS Atmosphere 插值 $T_m$ 的地基 GPS 反演大气可降雨量              | 206 |
| § 9.5 综合 ECMWF/MSLP 插值 $P_s$ 和局地加权平均温度模型计算的 $T_m$ 反演 GPS-PWV | 208 |
| § 9.6 综合 ECMWF/MSLP 插值 $P_s$ 和 GGOS 插值的 $T_m$ 反演 GPS-PWV     | 210 |
| § 9.7 本章小结                                                   | 212 |
| 第 10 章 GNSS 在气象学中的应用                                         | 213 |
| § 10.1 引 言                                                   | 213 |
| § 10.2 用地基 GPS 遥感水汽研究武汉地区的大雾天气                               | 214 |
| § 10.3 雾霾严重期 PM <sub>2.5</sub> 与 GPS 可降雨量相关性分析               | 226 |
| § 10.4 本章小结                                                  | 231 |
| 参考文献                                                         | 232 |



# 第1章 绪论

## § 1.1 研究背景和意义

### 1.1.1 探测水汽的重要性

全球定位系统(Global Positioning System, GPS),它是经美国国防部批准于1973年12月,由海、陆、空三军联合研制的新型卫星导航系统(徐绍铨等,2008)。GPS建立的最初目的是为美国的陆、海、空三军提供全球性、连续性、实时性的导航定位服务,同时在收集情报、监测核爆、通信求救等一系列军事领域发挥作用,是美国全球军事战略的主要组成部分。

GPS系统具有全天候、全球化、高精细、实时性、不间断、全自动等突出优势,可以为人们提供准确的位置、速度及时间等信息。随着时间的流逝,人们通过不断地研究开发,使GPS系统得到迅速的发展和不停的优化,应用GPS卫星的定位导航信号,人们已经能进行精确的厘米级和毫米级的相对静态定位,还有精度达米级或更高亚米级的动态定位;不仅如此,人们还能应用GPS系统精确地进行亚米级和厘米级的速度测量,同时进行时间测量的精度可以达到毫微秒级,全球的人们都开始越来越依赖于GPS进行各种各样的活动。GPS定位不再只是美国海、陆、空三军的卫星导航,而是一个集测速、授时、导航、定位于一体的系统,并且在建立高精度的大地控制网、预测地质灾害、精密工程测量、汽车导航、地壳运动检测、资源勘探、地球动力学及气象学等重要领域发挥着重要作用(徐绍铨等,2008)。受益于GPS自身观测成本低、效率高且仪器长期不需要标定的特点,GPS近些年得到迅猛且广泛的发展,越来越多的领域和行业(航天航空、精确制导、水利电业、地震监控、农林畜牧、天气预报)工作者开始关注并重视对其的应用,GPS气象观测网的建立与完善也得到各国气象等部门的高度重视,同时各领域根据行业的需要开始陆续建立局域地基GPS观测网。GPS气象学就是成功将GPS技术应用于气象领域的一个鲜明例子。由于GPS进行导航定位过程中受到信号延迟等因素的影响,在早些时期科研工作者们投入了大量的精力消除GPS导航定位中的信号延迟误差,并获得可观成果;但经过不断研究和探讨,学者们发现GPS信号延迟误差中包含着对流层及大气折射率等有用信息,利用这些信息可以反演获得高精度的大气压强、温度、湿度、水汽等气象信息,从而衍生出一个交叉性学科——GPS气象学。到了21世纪,GPS气象学已经成为世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)全球综合高空观测系统的非常重要的组成部分。当欧盟的伽利略系统(Galileo satellite navigation system, Galileo)建成,基于地基GPS的遥感技术将获得进一步的提升。相比于目前的GPS系统,伽利略将使得遥感大气的可用卫星成倍地增加,进一步提高遥感的精度。同时,GPS也将完成现代化。而俄罗斯的格洛纳斯系统(global navigation satellite system, GLONASS)和中国的北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)在遥感大气方面也有着很大的潜力,但在这方面目前并没有

得到很好的开发和利用。Galileo、GLONASS 和 BDS 将“GPS 大气遥感”向“GNSS 大气遥感”转变。GNSS 全称为全球导航卫星系统(global navigation satellite system),它包括以上所提到的四个系统。

大气中的水汽虽然在大气中的含量很少,在某些地区只占大气体积的 0.01%,但它却是大气系统的重要组成部分之一。它不仅与降雨直接相关,还和二氧化碳一起作为反映温室效应的两个主要指标;它不仅在对流活动方面扮演重要角色,还是灾害天气形成及变迁的主要“驱动者”,很多天气的突变和自然灾害的形成与大气中水汽含量的变化有直接的联系,如暴雨、厄尔尼诺现象等极端天气。水汽又是变化极其剧烈的一种气象元素,其随时序的变化和空间的变迁没有明显的分布规律,在环境恶劣的地球两极地区只有 5 mm 不到的水汽含量,而赤道地区距离地表 5 km 之内的大气层水汽含量就有可能达到整体水汽含量的 50%~95%。在灾害性天气发生时期,大气中水汽在垂直和水平方向的分布情况都有可能发生剧烈的变化;同时水汽在中小尺度灾害性天气(主要是暴雨)的监视、预报中占有重要地位;而中小尺度灾害性天气(水平尺度在 100 km 左右)的生命周期往往只有几个小时,甚至更短。由此可见,水汽是反映大气系统变化、预报某些灾害性天气、监视中小尺度灾害性天气(主要是暴雨)的重要依据,但它自身分布异常、变化剧烈,又使它成为影响准确展示大气变化、预报灾害性天气的阻挠因子,这个时候如何精密地监测大气中水汽的时空分布特征就成为天气预报、气象研究、气候系统模型建立等领域需要进一步解决的问题。

随着 GPS 气象学的诞生,越来越多的从事大气研究的科学家开始关注利用 GPS 技术探测水汽的技术,因为 GPS 技术具备许多其他技术不可媲美的优势。在气象学研究中,学者们通常将垂直方向气柱内所含的水汽含量换算为单位面积上液体水的高度,来表示大气中的水汽含量,称为大气可降雨量(precipitable water vapor, PWV),GPS 遥感水汽通常被称为 GPS 反演大气可降雨量(GPS-PWV)(杨创,2011)。经过科研人员的刻苦钻研,GPS 已经成功成为获取全球性、近实时、高精度大气系统和电离层等数据的又一可靠工具,并在短期剧烈灾害性气象预测中不断发挥作用,且逐渐向 GPS 遥感水汽方向发展。

### 1.1.2 传统探测水汽的方法

由前文可知,精确地探测水汽是气象研究者亟须解决的难题之一。长久以来,气象研究者们尝试并验证了多种探测大气中水汽的含量及垂直和平面分布结构的方法。在过去的实验和研究中,研究人员探测水汽的主要方法有以下几种。

#### 1. 无线电探空

无线电探空(radiosonde)方法是探测水汽最常用的方法之一,也是精度比较高的方法之一。探空气象站通过从地面或飞机火箭等载体释放探空气球,探空气球上携带有精密的气象探测仪,探空气球在穿过大气过程中,气象探测仪收集不同高度大气中的气象参数(如气温、气压、风速、湿度等),并将这些数据传送回地面,通过这些数据就可以精确地估算大气中的水汽含量及水汽的垂直和平面分布结构。无线电探空探测水汽的精度较高,通常被科学家们用来检验其他方法的可靠性,是气象预报系统的基础。因为探空气球攀爬到一定高空后就会自然破裂,附带的探测仪也无法重复利用,每释放一次探空气球需要消耗高额的成本。受于这些因素的限制,探空站释放气球的次数是相当有限的,通常气象站只会在规定的时间间隔内在白天

和夜晚各释放一次探空气球。与此同时,探空站的分布相对比较稀疏,截至目前,我国大陆地区的探空站只有近百个,在海洋和河流以及沙漠地区更是少之又少。因此,无线电探空提供的数据集无论从时间分辨率和空间分辨率而言,都无法满足短期剧烈气象变化预报的要求。

## 2. 卫星探测

卫星探测作为一种探测水汽的主要辅助手段,该方法是通过气象卫星上装载的红外分光计等仪器监测水汽对地表微波辐射的吸收线,再通过一定的方法推算水汽含量。不过红外分光计只有在晴空无云等理想天气情况下才能正常工作,在多云、大雾、雨雪等天气情况下无法获得高精度的大气水汽含量,卫星探测水汽具有很大的局限性。

## 3. 微波辐射计

从20世纪70年代,科学家们就开始将微波辐射计(water vapor radiometer)应用到探测水汽工作中,也是探测水汽最精密的一种设备,在GPS导航、定位、路径改正方面被广泛应用。微波辐射计的缺点同样突出,地基微波辐射计在浓云中穿透能力大幅下降,降雨过程中精度会出现较大损失;空基微波辐射计还会受到探测环境温度的阻碍,且海陆的探测精度相差较大,在海上的探测精度往往高于内陆。因为自身昂贵的经济费用,微波辐射计也没有得到大面积的推广。

## 4. 激光雷达探测

激光雷达不仅可以探测大气中水汽的含量,还可以探测其详细的分布情况,尤其新一代的多普勒雷达还具备探测垂直积分液态含水量的能力。但由于雷达探测需要频繁标定,且探测成本高昂,使其无法在大范围、长时间、不间断的水汽探测中得到普遍应用。

## 5. 飞机探测

在某些特许情况下(如人工降雨、采集科研数据等),飞机也需要承担探测水汽的任务。搭载有水汽探测仪的飞机按照固定的航线飞行,进而探测规定范围内的水汽含量及分布结构。然而飞机飞行的时间和范围都是相当有限的,同时受天气影响较大,无法进入强台风等恶劣天气环境中,因此应用飞机探测水汽受到很大的限制。

## 6. 激光探测

激光探测技术在特定的时间间隔分别发射两束不同的特殊激光,根据激光在大气传播过程中会有水汽附着的原理来探测水汽。激光只能探测激光束周围的水汽分布,在水汽空间分布探测的能力还有待进一步提高,其对应的理论和方法还处于实验和研究阶段。

## 7. 地面湿度计

地面湿度计可以探测到近地面约2 m的水汽状况,是常规气象学探测水汽含量的一种手段。整个大气层的高度达到1 000 km以上,所以地面湿度计无法正确地反映整个大气层的水汽含量和分布情况,可见利用地面湿度计探测水汽的作用是很有限的。

## 8. 太阳光谱分析仪

利用太阳光谱分析仪探测水汽可以达到较高的精度,水汽含量精度约为0.75 mm,湿延迟精度小于5 mm。但其探测所得水汽含量仅仅包含探测仪与太阳之间路径的水汽含量,无法达到现代气象学探测水汽的要求。

综上所述,传统的大气探测方法还存在各种不同的缺陷。例如,无线电探空时空分辨率低,观测成本高昂,且探空站存在分布不均及稀疏等缺点;微波辐射计、卫星、飞机等探测方法受天气变化影响较大,无法实现连续性、大面积覆盖的探测局面;其他的探测方法需要频繁标定,探测范围有限,难以普及。现代气象业务要求气象监测达到气象预报“更早,更准,更细”的

标准,要求对大气物理要素(温度、气压等)的结构和状态进行精确的监测,以适应精细化业务发展的要求,进一步提高监测和预报异常天气及中小尺度灾害性天气的能力,减少漏报和错报(刘晓琳,2013)。

基于新的气象业务要求,气象科学家们一直在致力于寻求和验证一种不需要标定、时间分辨高、覆盖面积广、全天候、成本低廉、精度高、近实时、稳定、受气候影响小的反演大气可降雨量的方法,来分析总的水汽含量和水汽在垂直分布廓线的信息及其平面分布结构等。

### 1.1.3 地基 GPS 探测大气水汽的方法

在利用 GPS 卫星进行导航定位过程中,承载着导航电文的无线电信号需要从距离地面 2 万多千米的高度穿过大气层到达地面接收机,在这个过程中信号会发生时延和弯曲两种现象,最后表现为卫星信号传播延迟。在传统的大地测量中,这种延迟会被当作误差在数据处理过程中使其更小化,甚至剔除。随着 GPS 导航定位的不断成熟以及相关技术的深入研究,学者们发现通过采用数据处理的方法,可以将这种延迟(误差)转化为分析大气的可用信号,通过对 GPS 观测资料的分类处理可以获得中性大气层和电离层的分布情况及变迁规律,从而就衍生了一个新兴交叉学科——GPS 气象学(GPS meteorology, GPS/MET)。

基于 GPS 接收机装载的空间位置不同, GPS 气象学又被划分为两种:空基 GPS 气象学、地基 GPS 气象学。前者是利用装载在低轨卫星(通常用 LEO 表示)上的 GPS 接收机来测量 GPS 卫星信号在掩星过程中横向穿过大气所产生的折射角,进而获得信号路径近地点高度处的大气折射率,从而获得地球大气的气压、温度和湿度等大气数据的廓线;后者则是通过架设于地球表面 GPS 接收机来探测 GPS 卫星信号穿越大气层过程中的累积延迟量,推算得到接收机上空的大气可降雨量(丁金才等,2009;张云涛,2011)。

GPS 气象学水汽探测方面的技术是汇聚传统探测手段的各种优点的一种新型技术,利用 GPS 反演大气可降雨量较传统的技术手段有明显的优势:

(1)高精度。相关研究(宋淑丽等,2004)表明,利用 GPS 反演大气可降雨量,其与对应的微波辐射计、无线电探空反演的 PWV 只有 2 mm 左右的差距。

(2)高时空分辨率。GPS 卫星在全球上空分布比较均匀,且卫星数量还在不断增多,基本覆盖整个地球表面,空间分辨率极高;GPS 卫星与地面基站可以连续不断工作,研究人员从获得数据到反演出 PWV 最短只需十几分钟,时间分辨率可以达到近实时。

(3)全天候。反演 GPS-PWV 不会受阻于气溶胶及云等天气条件,即使在强降雨、冰雹、雾霾等天气仍然可以正常进行。

(4)低成本。现代的 GPS 接收机通常体型较小、便于携带,而且 GPS 接收机零部件受工作环境的影响较小,长期工作也无须标定,反演大气可降雨量所采集的数据也可以用于测量、规划、交通运输等方面,各部门可以共同使用 GPS 接收机,并协力维护这些设备,因此反演 GPS-PWV 成本相对较低。

与利用空基 GPS 相比,地基 GPS 操作更加简单,实施方便,成本较低。近年来,国内外地基 GPS 反演大气可降雨量(后统称 GPS-PWV)技术不断蓬勃发展,并被广泛应用于全球大气系统、人工干预天气和中小尺度气象灾害的研究中。因此,本书也将就地基 GPS 反演大气可降雨量进行分析和研究。



## § 1.2 国内外地基 GPS 气象学研究状况

### 1.2.1 国外地基 GPS 气象学研究进展

地基 GPS 反演 GPS-PWV 已经成为反演 PWV 的一种快速、精确的方法,并在近些年得到迅捷发展且不断完善,这些都离不开地基 GPS 气象学研究人员对基本理论的深入研究和不断的探究试验。

美国气象学家最早于 20 世纪 80 年代末期开展 GPS 气象学的相关研究,随后德国、俄罗斯、日本及一些欧洲国家也在 GPS 气象学研究中投入了重大的人力、物力。美国 Askne 等(1987)提出了利用地基 GPS 反演大气中的湿延迟,同时提出通过建立湿延迟与水汽的相互关系的方式来反演 PWV 的理念。Bevis 等(1992)比较系统地描述了反演 GPS-PWV 的原理,并通过回归分析得到了温度  $T_s$  与加权平均温度  $T_m$  的关系,提出了利用  $T_s$  获取  $T_m$  的方法,这些成果使得使用 GPS 对 PWV 进行量化成为可能。美国于 1993 年最早建立地基 GPS/MET(气象地基 GPS 网),并基于此进行了 GPS/STORP 观测实验(James et al,1993),结果表明:地基 GPS 可作为“气象站”实行高时间分辨率的动态反演 PWV,其反演精度与精密的微波辐射具有很好的一致性,精度相差分别为 1~2 mm(使用相对可降雨量法时)及 1~1.5 mm(使用绝对可降雨量法时)。随后在国际上,也对一系列 GPS-PWV 与其他一些较精密的探测系统反演的 PWV 进行了比较。例如,通过反演得到的 GPS-PWV 与卫星探测水汽、无线电探空探测水汽进行精度对比,多次证明了 GPS-PWV 的可靠性,并且 GPS 反演 GPS-PWV 具有与无线电探空仪探测相当的精度(Éborbás,1998;Fernández et al,2010;Galina et al,2001;Liou et al,2000)。

从 1994 年“GPS 气象学”被 Bevis 提出至今,国际上对 GPS-PWV 的精度分析、GPS-PWV 在天气预报的研究、GPS-PWV 检验其他探测手段的精度,以及 GPS-PWV 在初步的气候研究领域的引用等方面的研究从来没有间断,并取得了一定的成果。Duan 等(1996)在 Bevis 等基础上,进一步完善了“绝对水汽总量法”,为更好地消除水汽反演过程中的 PWV 系统误差,他们采用了实测的 GPS 数据以及 4 个地处南北遥远地区的 IGS 站的同步 GPS 观测数据来增加 GPS/MET 网的基线长度,利用 GAMIT 软件和 SOPAC(Scripps Orbit and Permanent Array Center)公布的精密星历对数据进行处理,得到了精度为 1.0~1.5 mm 的 PWV 的绝对值,分析表明通过引入 500 km 以上的长基线,可以精确地获得绝对水汽总量。这个试验使得进行反演 GPS-PWV 时,可以不在 GPS 站旁边放置微波辐射仪。将 GPS-PWV 应用在天气预报方面,Wayan 等(2012)利用马来西亚的地基 GPS 研究马来西亚地区因暴雨引发的洪水期间的 PWV 变化情况。荷兰的 Siebren de Haan 则使用 GPS-PWV 开展冷锋过境的临近预报,成功建立了当地的水汽垂直结构,为利用 GPS-PWV 预报强降水和雷暴等恶劣天气打下重要基础(王明明,2013)。在气候研究领域,Gradinarsky 等(2002)利用长期的 GPS-PWV 研究,分析瑞士斯坦的纳维亚地区气候的变化,总结出不同季节、不同区域的 PWV 时空变化特性。Elgered 等(1991)利用位于芬兰和瑞典两国的 33 个 GPS 站,研究了当地长期的 PWV 的变化情况和分布特征。

以上的研究和试验充分证明了地基 GPS 反演 GPS-PWV 在气象学中的可靠性和可行性。国际上很多国家都意识到了 GPS-PWV 在应用方面的巨大潜力,并就 GPS-PWV 做了很多工作。美国、德国、日本等国家已经在实时反演绝对大气可降雨量领域取得了重大进展,并开始着手将 GPS-PWV 产品与数值天气预报进行同化,这些成果提高了 GPS-PWV 产品在新一代天气预报系统中的有效性。美国在制造近实时的 GPS 绝对 PWV 估计产品方面遥遥领先于其他国家,早在 1995 年 7 月,美国就将估计总水汽含量(PWV)划为每天快速处理的一部分;到了 1996 年,这个完全自动化的系统成功成为了预报系统实验室的一种设施,已经成为美国国家预报系统的重要组成部分。近些年,美国、日本、德国及欧洲部分国家都在本国布设了比较密集的 GPS 观测站,利用这些观测网的 GPS 数据,获得了大量的 GPS-PWV 数据,同时将这些数据应用于大面积的变形监测、环境监测、中小尺度气象灾害预测、地震预报等方面。尤其是日本,在其本土建立了现存世界上最密集、面积最广的针对地球科学研究的 GPS 观测网,该网的平均分割距离为 25 km,时间分辨率为 5~10 min,利用这个观测网反演出的 PWV 含量,精度可达到 2 mm。

### 1.2.2 国内地基 GPS 气象学研究进展

地基 GPS 气象学在我国的发展大概可以划分为三个阶段:首先,20 世纪 90 年代初学者们开始展开理论研究;然后,90 年代后期根据理论开始科学实验,总结了利用 GPS 数据反演大气可降雨量的方法;到了 21 世纪,上海、北京、深圳等地区已经成功步入了 GPS-PWV 实时应用阶段。

20 世纪 90 年代 GPS 气象学理论与原理开始被引入到国内,1993 年北京大学的学者毛节泰将 GPS 气象学引入国内并对反演 GPS-PWV 的原理进行了详细介绍。1997 年国家卫星气象中心方宗义等撰写了《全球定位系统气象学研究论文汇编》,更加详细地描述了利用地基或空基 GPS 反演大气参数的方法及其 GPS/MET 应用于气象领域的前景。1998 年陈俊勇就影响反演 GPS-PWV 的误差进行分析,提出了把对加权平均温度  $T_m$  的研究作为研究反演 GPS-PWV 的重要内容。1999 年王小亚等就 GPS 气象学的原理进行了更加系统的论述。2000 年李延兴等提出了利用探空数据计算  $T_m$ ,通过拟合方法得到适合中国地区的计算  $T_m$  的系数。2001 年曲建光等就干扰反演 GPS-PWV 的因素进行了全面分析,结果表明静力学延迟(ZHD)估算误差、天顶方向延迟(ZTD)估算误差、可降雨量转换系数  $K$  计算误差以及可降雨量转换模型的模型误差是反演 GPS-PWV 的主要误差。2002 年丁继新等研究了  $T_m$  和 PWV 随时间变化的一些关键性问题(杨创,2011)。2004 年上海天文台宋淑丽利用上海 GPS 网的各站斜路径可降雨观测数据,研究了水汽层析的方法,并在国内首次通过这种方式获得了上海地区的水汽分布的三维层析结果。2005 年章红平等利用当地地基 GPS 观测数据,研究了地基 GPS 技术反演武汉地区的 PWV。2006 年中科院博士王勇就地基 GPS 网在气象领域的应用进行了系统的研究。2007 年李国翠等分析了暴雨过程中可降雨量的变化,研究了 GPS-PWV 数据在石家庄暴雨研究中的应用。2008 年吕弋培等采用回归分析的方法,建立了成都地区的地区  $T_m$  模型,并将其模型应用于反演 GPS-PWV,可以达到很高的精度。2009 年徐伟声等就 GPS 气象学进行了更详细的介绍,并研究了其在各领域的应用。2010 年常亮等利用美国环境预报中心(NCEP)公布的逐 6 h 的再分析气象资料联合 GPS 测站数据,提出

了一种无须实测气象数据的获取 GPS-PWV 的新方法,并对其在区域降雨预报领域的应用进行了研究。2011 年徐绍光等利用了组合的超快星历通过差分 GPS 模式来解算 ZTD,同时利用实时的气象数据将 ZTD 转化为 GPS-PWV,验证了地基 GPS 获得实时 GPS-PWV 的精度和影响因素。ZTD 是反演大气可降雨量的重要因子,2012 年李薇等采用 NCEP 数据,建立了无须实测的地面气象参数并考虑经纬度的天顶对流层延迟全球模型 IGGtrop 模型,该模型可以在没有气象观测数据的情况下在全球精密地估算 ZTD。2013 年 Yao 等,在建立了一种不需要气象元素只考虑地理位置的  $T_m$  模型之后,利用全球气温气压经验模型(GPT)以及 Bevis 描述的  $T_m - T_s$  关系建立了新一代 GTm-II 模型,精度分析表明新的模型较过去的模型,无论是在海上还是在陆地精度都得到了较大的提高,并且可以满足 GPS-PWV 的要求。2014 年王久珂等利用小尺度的 GPS 网络,通过水汽层析算法获得高时空分辨率的水汽场,并利用探空数据验证其层析水汽场精度,结果表明 GPS 三维层析水汽场可以获得理想的精度,通过与当地气象雷达资料结合可以给出降雨前 20min 水汽的富集情况和位置,给降雨预报提供指示。2015 年姚宜斌等对用于计算估算降雨量所需要气温、气压等参数的 GPT2 模型的精度进行了检验和分析,主要通过欧洲中尺度预报中心(ECMWF)及美国天气预报中心(NOAA)提供的高精度气象资料,对 GPT2 的气压、气温及水汽模型进行精度检验,结果表明 GPT2 模型在全球范围内保持很高的精度和较好的稳定性。

20 世纪 90 年代中期,我国上海天文台朱文耀等较早地开展地基 GPS 气象学实验,并就其在恶劣天气分析方面的作用进行研究(李国平,2010)。他们利用当时分布在我国 23 个 GPS 站以及周边地区的 6 个 IGS 观测站,组成一个区域的地面实验网,开展了我国首个 GPS/MET 实验。1998 年何平等进行了以气象应用为目的的地基 GPS 观测实验,通过整理观测资料、分析数据的精度,探讨了反演大气可降雨量的模型,用其模型反演的结果与由探空技术获取的结果比较发现:地基 GPS 反演所得的 GPS-PWV 与利用无线电探空技术计算的结果随时间变化的趋势具有很好的一致性,其偏差的均方根约为 4.33 mm。1999 年刘焱雄多次使用无线电探空技术计算的 PWV,检验地基 GPS 反演 GPS-PWV 的可行性和可靠性,并分析了影响 GPS-PWV 精度的因素,研究表明:GPS-PWV 的精度会随着 GPS 的改进而不断优化,可预见的未来,无线电探空资料将不再适合于作为评定 GPS-PWV 精度的依据。2007 年陈永奇等开展了针对我国香港的地基 GPS 气象学实验,实验结果证明运用地基 GPS 能够实时、连续地反演得到精度优于 2 mm 的 PWV。随后,不少研究人员在我国台湾、香港、东南地区开展了地基 GPS 气象学的有关实验,不断地验证 GPS-PWV 的精度以及应用于大气探测、实时天气预报方面的可行性,总结提高反演精度的办法和水汽的时空变迁特征(陈永奇等,2007)。

我国的 GPS 反演 GPS-PWV 技术虽然起步较晚,但国内的 GPS 气象学已经迅速地从事研究、实验向业务化方向发展。中国气象局在 2001 年开始建立 GPS 水汽观测网,并开始搭建开展地基 GPS 气象业务的软硬件平台,为地基 GPS 气象学这项技术的应用做了充分的前期准备工作,最早开展了地基 GPS 气象学这项技术的应用,并将这项技术进一步推广(王亚辉,2012)。2002 年 6 月,上海市天文台、气象局及测绘院联合建造的“上海地区 GPS 综合服务网”正式投入使用,该网是我国第一个投入准业务运行的 GPS/MET 网,覆盖范围囊括整个长江三角洲地区,可以提供时间分辨率为 0.5 h 的 GPS/MET 数据。2005 年国家测绘局联合其他多个部门建立了珠峰地区连续运行的 GPS 观测网,该网可以提供时间分辨率为 1 h 的 GPS-PWV 以及电离层浓度变化等数据,用于提高珠峰地区天气预报的准确性,更好地为高

原科考、登山活动等提供服务。同年,北京市气象局主持在怀柔、房山两个降雨中心地区,建造了 GPS 综合监测系统,应用于研究局地的中尺度水汽的连续变化特征,进而为数值预报服务(陈敏等,2010)。另外,在“九五”期间,由中国地震局、总参测绘局、中国科学院等多个部门联合组建了我国地壳运动观测网(CMONC),旨在将 GPS 高精度定位技术用于大地测量、地震测量、气候监测、气象预报等领域。该网的建设分为两个阶段:第一阶段始于 2000 年 12 月 25 日,共建立了 27 个 GPS 基准站,且各站之间间隔为 800 km;第二阶段的建设也已经完成,这期间预计在全国建立 1 200 多个 GPS 监测站。届时中国地壳运动观测网将成为最大的国家 GPS 观测网,落成运行后我国的观测效率有望提高几十倍,精度提高预计可以达到三个数量级,对水汽时空变化的监测将更加精确,使中尺度恶劣天气变化的预报迈向实时化(蒋光伟,2010)。国家卫星气象中心在华北地区建立起 GPS 探测水汽业务实验网,着手于 GPS 水汽探测业务系统建设及实时探测试验,取得了可观的成果,积累了宝贵的 GPS 水汽探测业务系统建设及运行的经验,并基于此制定了一批规范性文件。

### § 1.3 存在的主要问题

GPS 探测大气水汽的研究以及应用,目前处于业务应用的探索和试验阶段,在许多方面还需要进行深入的研究:

- (1) 映射函数和水平梯度等 GPS 反演水汽的数据处理模型需要进一步改进。
- (2) 不同气候和地形条件下 GPS 反演水汽的各种数据处理模型需要订正和改进。
- (3) 影响 GPS 测量精度的其他误差源还较多,特别是在低高度角的情况下,需要做进一步的研究来减弱或消除这些误差的影响,提高水汽反演精度。
- (4) GPS 可降雨量的时间分辨率有待进一步提高,以满足短时临近天气预报的要求。
- (5) GPS 水汽产品同化到中尺度数值模式的方法研究以及业务试运行。
- (6) GPS 探测斜路径上水汽精度需要进一步提高,以便更好地为研究三维水汽分布提供斜路径水汽信息。
- (7) 利用 GPS 斜路径水汽信息建立三维水汽场的算法研究。
- (8) GPS 水汽应用领域的拓展,如空中水资源的利用和开发、人工影响天气作业区域的选择和区域气候变化监测等方面。

综上所述,我国已在地基 GPS 反演 GPS-PWV 方面获得了丰硕的成果,但由于国内 GPS 气象学起步较晚,还有很多方面的问题亟须解决,还有很多内容需要进一步研究。



## 第2章 地基GPS反演大气可降雨量的原理

### § 2.1 GPS 信号延迟

全球定位系统(GPS)包括24星座,发射L1(1 575.42 MHz)和L2(1 227.6 MHz)两个L波段频率信号。全球定位系统自诞生以来,不仅在导航和定位领域中显示了充分的优越性,而且在其他许多领域也引发了革命性的变革。为提高GPS定位精度,不同学科的科技工作者做了许多努力,如提高GPS星钟精度、快速提供精确星历、差分计算等。在定位误差中有一个重要方面是不能回避的,就是GPS卫星发射的无线电波在穿越大气层时,会受到电离层和对流层的折射影响,造成无线电信号的延迟。大气的总延迟由电离层延迟和对流层延迟组成,由于电离层延迟与信号频率平方成反比,可以利用两个频率大气延迟方程的线性组合进行消除,使误差精度控制在毫米级。而对流层延迟,即天顶总延迟(zenith total delay, ZTD)由湿延迟(zenith wet delay, ZWD)和静力延迟(zenith hydrostatic delay, ZHD)组成,即 $ZTD = ZWD + ZHD$ 。天顶方向上的总延迟近似为2.5 m,其中干空气造成的静力延迟占90%以上,约为2.2 m。水汽所造成的湿延迟占总延迟的10%以内,约为0.3 m(Rocken et al, 1993)。天顶方向的大气静力延迟可用地面气压估算,在静力平衡的条件下,若地面气压的测量精度为0.5 hPa,天顶静力延迟的估算精度可优于1 mm(Elgered et al, 1991)。这样我们可以得到毫米级的湿延迟,然后通过相关公式即可求得大气中的水汽总量PWV。本章将通过延迟信号的逐步分析,综述地基GPS反演水汽的原理和过程。

GPS系统主要由三部分组成(丁金才等, 2009):①卫星星座部分;②地面监控部分;③用户部分。在GPS测量中,对应于以上三部分之间的主要的误差源包括:①与卫星有关的误差;②与信号传播路径有关的误差;③与接收机和测站有关的误差。卫星定位所受误差源等相关信息如图2.1所示。

GPS卫星(轨道高度约20 200 km)采用两种不同频率的电磁波段L1和L2进行信号传输。GPS信号在穿过大气时的延迟量依赖于电离层(电子密度)和中性大气(气压、温度和水汽)的情况。沿着整个信号传播路径,大气层将会影响GPS信号的传播,产生信号延迟。电离层(上层大气部分)是信号频率的色散介质,这就意味着电离层延迟直接取决于GPS信号的频率。为此,通过建立消电离层线性载波相位观测值可以消除电离层低阶项的误差。另外,对流层(大气低层部分)属于中性大气层,对于电磁波频率信号而言,属于非色散介质。因此,对流层延迟与载波频率无关,无法通过多频观测值消除其影响。

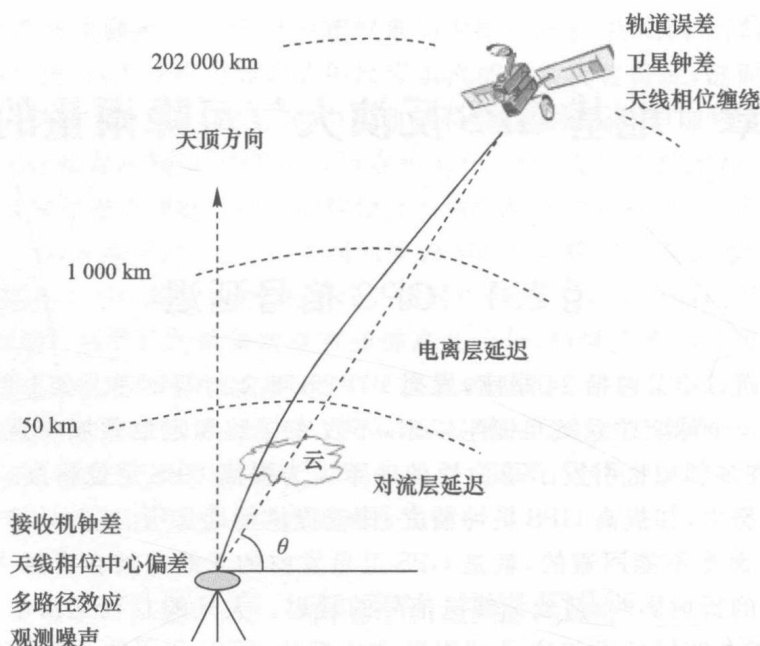


图 2.1 卫星定位误差源

### 2.1.1 电离层延迟

在距离地面高度 50~1 000 km 的大气层中,因为受到来自太阳的辐射,被电离产生的自由电子和正负离子大量存在于该层大气中,当卫星发射的 GPS 信号(载波信号)通过该层大气时,由于受带电粒子的影响,使得信号在该大气层的传播速度发生变化,在传播路径上产生延迟,从而使信号实际通过的距离不等于卫星至接收机的几何距离(真实距离),这一现象被称为电离层延迟(洪卓众,2011)。

电离层延迟是因频散大气而引起的,而延迟量的大小与信号频率的平方(即  $f^2$ )成反比,具体取决于沿着 GPS 卫星信号在传播路径上的总电子含量( $N_e$ ),而  $N_e$  又和太阳活动、观测时间和观测地点等其他多种因素有着密切联系。研究表明,在天顶方向,电离层延迟量最大时可达十几米。而当卫星截止高度角取  $20^\circ$  时,该延迟量则可达 150 m,所以,在 GPS 测量中必须对该项误差进行改正。

目前,消除或削弱电离层延迟带来的测量误差的方法主要有通过模型加以改正、利用差分方法以及通过双频观测值消除其影响等方法。在 GPS 高精度定位中,通常采用双频技术组成无电离层影响的观测值来消除或削弱电离层延迟的影响。该方法能够将电离层延迟的影响控制在毫米级精度范围内。

### 2.1.2 对流层延迟

对流层延迟是由非频散大气折射造成的,卫星发射的 GPS 信号产生的延迟大部分是由对流层引起的。高度在 50 km 以下的大气层属于对流层,其包含的大气成分较为复杂,且大气状态多变,天气变幻莫测,因而使得很难用模型描述对流层延迟的影响。当 GPS 卫星信号穿过该层大气时受到该层大气折射的影响而使得卫星信号发生延迟和弯曲,从而造成测距误差。