



测绘地理信息科技出版资金资助
CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

GNSS Marine Water Vapor Inversion and
Three-dimensional Water Vapor Tomography

范士杰 著

GNSS海洋水汽反演及 三维层析



测绘出版社

测绘地理信息科技出版资金资助

GNSS 海洋水汽反演及三维层析

GNSS Marine Water Vapor Inversion and
Three-dimensional Water Vapor Tomography

范士杰 著

测绘出版社

· 北京 ·

©范士杰 2017

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 简 介

本书在地基全球导航卫星系统(GNSS)气象学理论和方法的基础上,基于GNSS非差精密单点定位(PPP)模式,系统地研究了GNSS海洋水汽信息反演方法,形成了一套可用于航行船舶或浮标等移动平台的海上动态GNSS水汽探测技术;在此基础上,进一步对海洋上空GNSS三维水汽层析方法进行研究,以构建局域海洋上空的三维水汽场。主要内容包括:地基GNSS水汽探测的理论基础、海上动态GNSS精密单点定位、GNSS海洋水汽信息反演、三维水汽层析方法、渤海三维水汽场的构建等。

本书可为从事GNSS气象学、GNSS精密单点定位等相关研究的人员,以及大专院校相关专业师生提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

GNSS海洋水汽反演及三维层析 / 范士杰著. —北京:测绘出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-5030-4066-5

I. ①G… II. ①范… III. ①全球定位系统—应用—海洋—水汽—研究 IV. ①P714-39②P426-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第244583号

责任编辑	余易举	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	169mm×239mm						
印 张	8.5	彩插 4 面		字 数	163 千字		
版 次	2017 年 11 月第 1 版			印 次	2017 年 11 月第 1 次印刷		
印 数	001—700			定 价	43.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-4066-5

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

本书是在作者博士学位论文的基础上,结合主持的国家自然科学基金项目(41274011)和所参与的国家“863”计划项目(2009AA12Z127)的研究,以渤海为研究区域,对全球导航卫星系统(GNSS)海洋水汽信息反演和三维水汽层析等关键技术和方法进行系统的研究,构建局域海洋上空的三维水汽场,实现海洋上空水汽四维时空变化的实时或准实时动态监测,为海气交换研究提供基础性数据,也为灾害性海洋天气的预报和预警提供服务。

本书第1章主要阐述地基GNSS气象学以及GNSS海洋水汽信息反演的国内外研究现状,并对目前存在的主要问题进行分析;第2章介绍地基GNSS水汽探测的理论基础、全球气压和温度模型及其在GNSS水汽反演中的应用分析;第3章介绍海上动态精密单点定位的算法、软件研制,海上动态GNSS探测试验、数据处理和精度分析,以及GNSS海洋动态水汽信息反演的算法、试验验证和精度分析;第4章介绍GNSS三维水汽层析的算法、软件研制与试验验证;第5章介绍渤海三维水汽场的构建方法、层析试验与结果分析。

本书中的有关研究内容得到了国家海洋局第一海洋研究所刘焱雄研究员、武汉大学许才军教授的指导和帮助。作者指导的研究生张尊良、陈冠旭、臧建飞等进行了部分程序代码的编制和数据处理工作。本书的出版得到了国家海洋局第一海洋研究所刘焱雄研究员、武汉大学许才军教授和中国石油大学(华东)万剑华教授的推荐,以及测绘地理信息科技出版资金和国家自然科学基金项目(41274011)的联合资助,在此深表感谢。

由于作者水平有限,书中错误、疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 研究背景及研究意义	1
§ 1.2 国内外研究现状及发展趋势	2
§ 1.3 本书的主要研究内容	12
第 2 章 地基 GNSS 水汽遥感的理论基础	14
§ 2.1 引 言	14
§ 2.2 大气折射基础	15
§ 2.3 对流层延迟模型和参数估计方法	16
§ 2.4 地基 GNSS 对流层天顶湿延迟估计	26
§ 2.5 地基 GNSS 大气可降水量信息反演	30
§ 2.6 全球气压与温度模型及其应用	32
§ 2.7 地基 GNSS 斜路径水汽含量信息反演	38
§ 2.8 本章小结	43
第 3 章 GNSS 海洋水汽信息反演	44
§ 3.1 引 言	44
§ 3.2 海上动态 GNSS 精密单点定位及精度分析	45
§ 3.3 海上动态 GNSS 水汽信息反演	63
§ 3.4 渤海动态 GNSS 水汽探测试验及结果分析	70
§ 3.5 本章小结	81
第 4 章 GNSS 三维水汽层析方法研究	82
§ 4.1 引 言	82
§ 4.2 GNSS 三维水汽层析算法	83
§ 4.3 GNSS 三维水汽层析软件研制与试验验证	91
§ 4.4 本章小结	101

第 5 章 渤海三维水汽场的构建方法研究.....	103
§ 5.1 引 言	103
§ 5.2 HY-2 扫描微波辐射计柱状水汽与 GPS 水汽的比较和分析	104
§ 5.3 渤海三维水汽场的构建方法研究	107
§ 5.4 渤海 GPS 三维水汽层析试验和结果分析	110
§ 5.5 本章小结	121
参考文献.....	122

Contents

Chapter 1	Prolegomenon	1
§ 1.1	Research Background and Research Significance	1
§ 1.2	Research Status Review and Future Trends	2
§ 1.3	Main Research Contents of This Book	12
Chapter 2	Theoretical Basis of Ground-based GNSS Water Vapor Remote Sensing	14
§ 2.1	Introduction	14
§ 2.2	Basics of Atmospheric Refraction	15
§ 2.3	Tropospheric Delay Model and Parameter Estimation Method	16
§ 2.4	Ground-based GNSS Tropospheric Zenith Wet Delay Estimation	26
§ 2.5	Ground-based GNSS Precipitable Water Vapor Inversion	30
§ 2.6	Global Pressure and Temperature Model and Its Applications	32
§ 2.7	Ground-based GNSS Slant-path Water Vapor Inversion	38
§ 2.8	Brief Summary	43
Chapter 3	GNSS Marine Water Vapor Inversion	44
§ 3.1	Introduction	44
§ 3.2	Marine GNSS Kinematic Precise Point Positioning and Its Accuracy Analysis	45
§ 3.3	Kinematic GNSS Marine Water Vapor Inversion	63
§ 3.4	Kinematic GNSS Water Vapor Measurement and Result Analysis in Bohai Sea	70
§ 3.5	Brief Summary	81

Chapter 4	Research on GNSS Three-dimensional Water Vapor	
	Tomography Algorithms	82
§ 4.1	Introduction	82
§ 4.2	Algorithms of GNSS Three-dimensional Water Vapor Tomography	83
§ 4.3	Software Development and Experimental Verification of GNSS Three-dimensional Water Vapor Tomography	91
§ 4.4	Brief Summary	101
Chapter 5	Research on Construction of Three-dimensional Water Vapor Fields in Bohai Sea	103
§ 5.1	Introduction	103
§ 5.2	Comparison between the Water Vapor from Microwave Radiometer in HY-2 Satellite and GPS PWV	104
§ 5.3	Research on Construction of Three-dimensional Water Vapor Fields in Bohai Sea	107
§ 5.4	GPS Three-dimensional Water Vapor Tomography Test and Its Result Analysis in Bohai Sea	110
§ 5.5	Brief Summary	121
References		122

第1章 绪论

§ 1.1 研究背景及研究意义

1.1.1 研究背景

水汽是大气中活跃多变的成分,在大气能量传输和天气系统演变中起着非常重要的作用。在大气物理学中,水汽含量是地球大气中最重要的参数之一。水汽含量及其时空变化在常规天气预报、暴雨等灾害性天气监测分析预报、全球或区域性气候变化、大气质量监测、水文学、海洋学等方面均有重要作用。

海洋是水汽交换的主要场所,大气中 86% 的水汽来源于海洋。连续、实时、高精度地获取海洋水汽信息,对准确掌握天气系统的演化非常重要。我国东临太平洋,太平洋暖湿气流为我国的东部地区带来了大量的水汽及降水,也造成了沿海地区海洋灾害的频繁发生。因此,加强海洋水汽信息的监测和研究,是有效应对全球气候变化的重要手段,也是海洋防灾减灾的关键措施。

目前,获得海洋水汽信息的主要手段为星载或机载微波遥感、海上探空气球等。受卫星运行周期的影响,星载微波遥感探测水汽虽然具有较高的水平分辨率,但垂向分辨率和时间分辨率很低;而机载微波遥感受天气影响,不可能形成实时、连续的水汽监测能力。海上探空气球布设的站位稀少、所涉及的范围有限而且费用昂贵,获取的海洋水汽信息非常有限,其在时间上是不连续的,在空间上是稀疏的,常常无法捕捉到“山雨欲来风满楼”时的水汽变化。

基于全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)观测来探测地球大气的 GNSS 气象学(GNSS meteorology, GNSS-MET)为海洋水汽信息反演提供了新的途径。GNSS 水汽探测具有全球覆盖、全天候观测、精度高、费用低、时间分辨率高、数据获取速度快等优点。地基 GNSS 反演的大气可降水量(precipitable water vapor, PWV)信息与无线电探空仪、水汽辐射计获取的水汽产品精度相当,已逐渐成为气象观测中的重要手段。GNSS-MET 技术可用于台风、暴雨等灾害性天气分析和预报,并对提高降水等气象预报的精度起到了积极的作用,也可为中尺度数值天气模式提供精确的初始场,为人工影响天气作业提供依据,以及用于全球气候变化的监测和分析。目前,在世界范围内出现了多个包含 GNSS 水汽遥感功能的陆态监测网络,使地基 GNSS 气象学由理论和方法研究阶

段进入业务应用阶段。近 20 年来,随着地基 GNSS 气象学的快速发展和深入应用,国内外出现了大量地基 GNSS 气象的研究成果和应用系统,针对陆地稳固站点的 GNSS 水汽反演方法已基本成熟和完善,均为海上动态环境的 GNSS 水汽监测提供了基础和借鉴。

1.1.2 研究意义

海上缺乏密集、稳固的 GNSS 安装平台,只能以海洋浮标或航行船舶为载体进行 GNSS 海洋水汽信息的反演以及三维水汽层析研究。利用海面浮体上的 GNSS 设备,可望实现海洋水汽信息的连续、实时(或准实时)和高精度监测,以弥补星载或机载微波遥感、海上探空气球等方式的不足。

在海洋动态环境下,GNSS 水汽反演不同于地基 GNSS 水汽探测,存在着远程动态精密定位、GNSS 接收机坐标与水汽参数同时估计、船载等海上动态移动平台上空水汽的时空变化等问题。近 10 年来,国外多位学者分别利用船载或浮标 GNSS 数据,对近海乃至开阔海域上空 GNSS 大气可降水量的反演方法进行了一些探索性研究,取得了令人鼓舞的结果,从而将地基 GNSS 气象学的研究与应用由陆地推向海洋。但是,GNSS 海洋水汽遥感一直缺乏系统性研究,海上动态 GNSS 斜路径水汽含量(slant-path water vapor, SWV)信息提取及海洋上空三维水汽层析是 GNSS 海洋水汽信息反演的重点和难点问题,国内外尚无相关专题研究。因此,海上动态 GNSS 水汽反演研究已成为地基 GNSS 气象学的薄弱环节。

本书拟以渤海为研究区域,对 GNSS 海洋水汽信息反演和三维水汽层析等关键技术和方法展开研究,形成一套基于 GNSS 的海洋水汽信息反演技术和方法,为海气交换研究提供基础性数据,也为灾害性海洋天气的预报和预警服务。

获取高精度的海洋上空水汽的四维时空变化,是目前 GNSS 气象学和海洋天气预报中急需解决的难题之一,也是对 GNSS 气象学研究内容的丰富和拓展。连续、近实时、高精度的渤海三维水汽场,可以为渤海地区中小尺度数值天气模式提供良好的初始条件,从而提高数值天气模式的精度和预报准确率,可以为海洋灾害预报和预警提供服务,以及为山东半岛北部地区冬季暴雪的形成机理研究提供重要数据。因此,本书研究不仅具有明显的科学意义,而且有重要的实用价值。

§ 1.2 国内外研究现状及发展趋势

1.2.1 GNSS 气象学的概念

GNSS 信号穿越对流层大气时,会受其影响而产生信号延迟,而信号延迟和大气参数(气压、温度、湿度等)之间具有很好的相关性,因而可以利用 GNSS 信号穿

过地球大气层所引起的延迟量来探测大气参数。GNSS 气象学正是研究利用 GNSS 技术来反演大气要素的一门气象学的分支学科。根据 GNSS 接收机的位置和大气参数反演方法的不同,GNSS 气象学又分为地基 GNSS 气象学和天基 GNSS 气象学两大类。

地基 GNSS 气象学是利用若干布设在地面上的 GNSS 观测站的观测值,通过平差计算:首先估计出各测站天顶方向上的对流层湿延迟量;然后通过物理转化方法计算测站天顶方向的大气可降水量;最后进一步计算信号传播路径上的斜路径水汽含量,并且进行水汽层析和反演局域上空的水汽四维时空变化。该技术的最大特点是实时(或准实时)、全天候、高时间分辨率、高精度、低成本等,不仅适用于中、长周期水汽变化的监测,而且对水平尺度在 100 km 左右、生命史只有几个小时的中、小尺度灾害性天气(暴雪、风暴、雷雨、冰雹等)的监测和预报有特别重要的意义。

天基 GNSS 气象学是利用低轨卫星上的无线电掩星事件来探测地球大气。具体来讲,其是利用安置在低轨卫星上的 GNSS 接收机来测量 GNSS 卫星信号在掩星过程中横向穿过大气层时所产生的折射角,反演得到信号路径近地点高度处的大气折射率,进而导出气压、温度和湿度等参数的廓线。与地基 GNSS 气象相比,天基 GNSS 气象具有良好的空间分辨率,适用于遥感大气水汽的垂直分布廓线。

地基 GNSS 技术可对现有的 GNSS 观测网络加以综合利用,费用相对较为低廉;数据获取方法简单,可供研究的数据多;技术和软件上的实现相对比较简单。而天基 GNSS 遥感技术需要将 GNSS 接收机置于低轨卫星平台,系统的建立和维护费用相对较高,耗资大而难以实现,且可供研究的数据少。因此,地基 GNSS 技术从理论上提出设想以后,很快就趋于成熟并得到较为广泛的应用,而天基 GNSS 气象学的发展则相对比较缓慢。

本节主要对地基 GNSS 气象学的国内外研究现状及趋势进行论述。

1.2.2 地基 GNSS 气象学概念的提出和试验验证

利用地基全球定位系统(Global Positioning System, GPS)观测来探测地球大气的思想由 Askne 等(1987)首先提出,并推导了对流层天顶湿延迟(zenith wet delay, ZWD)和大气可降水量之间的关系。Bevis 等(1992)提出了“GPS Meteorology”的概念,给出了地基 GPS 探测大气降水量的原理和方法。美国大学大气研究联合会(UCAR)的 Yuan 等(1993)进行了模拟数据研究。

从 20 世纪 90 年代起,许多国家先后进行了一系列地基 GPS 监测大气的试验和探索性研究,进一步检验了地基 GPS 观测网测定大气水汽的可行性,以及对地基 GPS 测定的大气降水量的精度进行了评估。例如:1993 年 5 月,由美国海洋

大气局(NOAA)预报系统试验验证组和美国能源部大气辐射组共同进行的 GPS/STORM 试验(Rocken et al,1995),对 GPS 接收机和水汽辐射计进行了同步并址观测,并对处理结果进行了对比;同时 GPS/STORM 试验经受了恶劣天气的考验,获得了相当的成功。1998—2003 年日本地理测量院(GSI)组织实施了日本地基 GPS 气象学计划,建立了大气水汽总量数据库。其用在日本气象厅(JMA)数值天气模式(numerical weather model,NWM)的四维数据同化系统中,以改进中尺度系统和局地恶劣天气的预报(Tsuda et al,1998)。德国也成功地组织了较大规模的试验观测,获得了一系列研究成果,并已经将它们应用于气象服务中(Dick et al,2001;Gendt et al,2004)。20 世纪 90 年代中期,中国科学院上海天文台在我国较早开展了地基 GPS 气象方面的研究。其利用国内 23 个 GPS 网站及周边地区的 6 个国际 GNSS 服务组织(International GNSS Service,IGS)永久跟踪站组成了一个区域性地面试验网,进行了我国首次 GPS 气象学试验。同时,考虑到上海地区夏季天气变化剧烈、台风活动频繁等因素,选择了 1997 年 8 月上旬和下旬 2 个观测时段,进行了国内第一个 GPS/STORM 试验(王晓亚 等,1999);上海 GPS 综合应用网包括一个由 14 个 GPS 基准站组成的、以上海为中心覆盖整个长江三角洲地区的 GPS 气象服务网,于 2002 年 6 月投入正常运行,可为上海地区提供高精度、高时空分辨率、全天候、近实时可降水量变化序列。这为长江三角洲地区的数值天气预报提供了较好的初始条件,改善了中短期预报的准确度(宋淑丽 等,2004b)。香港理工大学选用国内 5 个 IGS 站和香港差分 GPS 站,采用 1 个月的观测数据,结合无线电高空气象探测资料,分析并评估了地基 GPS 遥感技术的精度(刘焱雄 等,1999)。2000 年,国家卫星气象中心、北京大学和北京市气象局在北京地区联合开展了我国第一次区域性的地基 GPS/VAPOR 观测试验,分析了北京地区夏季大气水汽含量的时空变化,研究了大气水汽含量与日平均温度、地面水汽压和降水的关系(梁丰 等,2003;曹云昌 等,2005)。

国内外的多次试验均已证明了地基 GNSS 探测大气水汽的可行性。与水汽辐射计、无线电探空等观测结果相比,GNSS 大气可降水量的估算精度可达 1~2 mm,在数值气象预报、大气校正、气候变化以及热带风暴等方面均具有较大的应用价值。

1.2.3 地基 GNSS 气象学的主要研究成果

自 1992 年 Bevis 等首先提出地基 GNSS 气象学的原理和方法以来,国内外地基 GNSS 气象学的主要研究成果可概括为以下三个方面:①估算天顶方向的 GNSS 大气可降水量;②遥测倾斜的 GNSS 信号路径上的大气水汽含量;③应用组网的 GNSS 倾斜路径观测反演局地上空的水汽四维时空变化,即水汽层析。

1. 地基 GNSS 大气可降水量估计

估算天顶方向的大气可降水量是地基 GNSS 气象学的主要目标之一。地基 GNSS 探测大气降水量的可行性已通过国内外的多次试验验证。GNSS 大气降水量的测定精度也已在与同时段无线电探空观测结果和水汽辐射计观测结果的直接比较中得到肯定。地基 GNSS 大气可降水量估计包括传统的双差网解法(如 GAMIT 等软件)和非差精密单点定位(precise point positioning, PPP)方法。

对于区域性 GNSS 网,由于测站间距离较短、天顶对流层延迟的相关性很强, GAMIT 等双差网解法只能获得测站间的相对大气可降水量(Rocken et al, 1995)。若要得到测站的绝对大气可降水量,可以通过在一个站点上架设地基微波水汽辐射计进行辅助观测,以确定区域网计算的天顶湿延迟的系统偏差,从而获得全部站点的绝对大气可降水量。后来, Duan 等(1996)提出引入远距离(大于 500 km)测站获得绝对大气可降水量的方法,从而无须水汽辐射计的辅助观测。这也是 GPS 水汽观测较早采用的方法。国内李成才等(1998)、刘焱雄等(1999)、李延兴等(2000)、何平等(2002)等分别研究了地基 GPS 水汽遥感方法,并成功提取了垂向水汽含量;陈俊勇(1998)详细分析了地基 GPS 水汽遥感的误差来源;谷晓平等(2004)、李成才等(2004)等分别研究了干、湿分量的模型精度和分离方法;香港理工大学陈永奇等(2007)提出了若干关键技术的改进方法,提高了 GPS 水汽含量的估计精度,并建立了香港实时 GPS 水汽监测系统。

在非差精密单点定位中,对流层天顶湿延迟与接收机坐标和钟差参数一样,均为可估参数,同样可以用于地基 GNSS 大气降水量的计算。由于精密单点定位方法具有估计模型简单、站间不相关、无须引入远距离测站即可估计绝对时延、处理大规模数据速度快等优点,更加适合实时或近实时 GNSS 水汽观测数据的处理。Niell(2000)较早地采用 GIPSY/OASIS 软件,基于单点定位模式,利用为期 14 天的实测 GPS 数据计算了天顶湿延迟,并将其与无线电探空仪、水汽辐射计以及甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)数据结果进行了对比和精度评价,结果表明 GPS 天顶湿延迟估计结果与水汽辐射计、甚长基线干涉测量等其他观测结果的平均差异约为 6 mm, GPS 大气可降水量结果的差异约为 1 mm,同时指出了 GPS 卫星截止高度角对 GPS 天顶湿延迟估算的影响;Tao(2008)基于非差精密单点定位方法和加拿大稀疏的 GPS 参考站网(21 个站点)数据,开发了一套实时 GPS 数据获取和水汽遥感系统;Chiang 等(2009)采用精密单点定位方法估计了台湾地区 50 多个 GPS 参考站天顶对流层延迟(zenith tropospheric delay, ZTD),并对该地区梅雨季节和台风经过时的降水与天顶对流层延迟值变化之间的关系进行分析;IGS 组织采用事后精密卫星轨道和钟差产品,基于精密单点定位方法来估计 IGS 各站点上空天顶对流层延迟,并于 2007 年正式被采用(Byun et al, 2009);Shoji(2009)利用日本稠密的地基 GPS 参考站网络,

采用精密单点定位的处理方法,进行了近实时可降水量信息提取和验证试验。国内多位学者也均采用精密单点定位方法进行了 GPS 大气可降水量的信息提取和精度验证(陈永奇等,2007;叶世榕等,2008;张小红等,2010;何锡扬,2010),其中陈永奇等(2007)分别采用网解和精密单点定位两种模式对香港 GPS 连续运行基准站(CORS)数据进行了处理,并对计算的 GPS 大气可降水量结果进行了比较,结果表明网解与精密单点定位方法计算所得 GPS 大气可降水量的精度基本一致,二者的平均差异为 1~2 mm,标准差为 2 mm。

随着俄罗斯格洛纳斯导航卫星系统(GLONASS)的升级以及中国北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)、欧洲伽利略导航卫星系统(Galileo)等的建立,多模 GNSS 水汽反演已成为当前的研究热点之一。Iwabuchi 等(2013)基于精密单点定位方法反演了多模 GNSS 水汽,发现 GPS、GLONASS、准天顶导航卫星系统(QZSS)三系统联合反演的水汽结果优于 GPS 单系统,尤其是在卫星数较少的情况下。施闯等(2016)利用北斗试验网数据对中国 BDS 的水汽探测性能进行了分析,其探测结果与 GPS 水汽具有很好的一致性;但是,相比于无线电探空结果,其系统误差与标准差偏大,主要是 BDS 的定轨、定位模型不是很稳定造成的。随着实时精密单点定位(real time precise point positioning, RT-PPP)技术的发展,基于 RT-PPP 的多模实时 GNSS 水汽探测也受到一些学者的关注。实时北斗天顶对流层延迟时间序列与 GPS 天顶对流层延迟时间序列具有很好的一致性, GPS 与 BDS 双系统联合的水汽探测精度优于 BDS、GPS 单系统(Lu et al, 2015); 基于 RT-PPP 技术反演的实时 GLONASS 水汽与实时 GPS 水汽精度相当,两者联合能够实现最佳的水汽探测结果(Lu et al, 2016)。采用 GPS、BDS、GLONASS、Galileo 四个系统进行的实时水汽探测能够获得 1.0~1.5 mm 的大气可降水量精度,且能够避免单系统存在的粗差情况(Li et al, 2015)。

2. 地基 GNSS 斜路径水汽含量估计

地基 GNSS 大气可降水量是测站上空总的可降水量,其不能提供大气中水汽的垂直剖面信息,而水汽的三维分布对于发展和校正中尺度数值天气模式的初始场是非常重要的,特别是对于水汽时空变化比较激烈的地区。而沿卫星信号传播方向上的 GNSS 斜路径水汽含量则包含了水汽的垂直剖面信息。因此我们利用 GNSS 斜路径水汽含量,通过水汽层析即可获得区域上空水汽的三维分布。

GNSS 斜路径水汽含量可由 GNSS 信号方向的斜路径总延迟转换得到。Ware 等(1997)采用双差方法证实了获取 GPS 斜路径总延迟的可行性;Alber 等(2000)提出了一种由 GPS 双差残差到信号路径非差残差的转换方法;Elosegui 等(2003)利用模拟手段对验后双差残差方法的可行性和精度进行了评价,同时指出了该方法在非均匀大气状态下 GPS 斜路径水汽含量估计的局限性;Braun 等(2001)通过试验对比分析,得出在一定的高度角下 GPS 斜路径水汽含量的估算精

度可达毫米量级。在国内,曹云昌等(2006)、毕研盟等(2006b)基于双差方法验证了 GPS 斜路径水汽含量在精度上的可行性;张双成等(2009)在原有后拟合双差残差分析方法的基础上,结合双差残差分布特性,对 Alber 等提出的双差残差转变为非差残差算法中权函数的确定方法进行了改进,并利用并址的 GPS 和水汽辐射计实测数据进行了验证,结果表明,改进的反演算法能以优于 4 mm 的精度近实时估算 GPS 斜路径水汽含量值。

随着精密单点定位(Zumberge et al,1997)技术和算法的不断完善,国内外出现了以非差精密单点定位模式提取 GPS 斜路径水汽含量的方法。Bender 等(2008)、Deng 等(2011)等基于 EPOS 软件,以非差精密单点定位模式对德国地基 GPS 网数据进行了处理,并对其提取的斜路径延迟和斜路径水汽含量的精度进行了比较和分析;宋淑丽等(2004a)则基于非差算法提出一种以毫米级精度直接计算 GPS 斜路径水汽含量的方法;何锡扬(2010)基于 Trip 软件实现了精密单点定位解算地基 GPS 斜路径湿延迟和斜路径水汽含量的算法。

3. 地基 GNSS 三维水汽层析研究

大气水汽的垂直分布信息对于校正和改善中尺度数值天气模式的初始湿度场极为重要。目前,气象领域所用的水汽三维信息主要依靠常规的探空站网测定的水汽剖面来提供。但是,常规探空站网的时空分辨率较低(站点间距为 200~300 km,时间分辨率通常为 6 小时或 12 小时)、成本高,获取的水汽信息非常有限,并且其在时间上是不连续的,在空间上是稀疏的。而地基 GNSS 三维水汽层析技术利用大量的地基 GNSS 斜路径水汽含量反演信息,以 GNSS 斜路径湿延迟(slant-path wet delay, SWD)或斜路径水汽含量为观测值,采用医学领域的断层扫描技术即可实现局地上空高精度三维水汽场的重构,从而获得大气水汽的四维时空分布,这是目前地基 GNSS 气象学研究的前沿课题。

近 10 年来,国内外许多学者对 GNSS 水汽层析也进行了大量的试验和研究工作。国外 Flores 等(2000)、Gradimarsky 等(2004)、Champollion 等(2005)、Skone 等(2005)、Bastin 等(2005)、Troller 等(2006)、Bender 等(2009)、Rohm(2012)等分别利用夏威夷、瑞典、法国、加拿大、瑞士、德国等区域或国家 GPS 观测网数据,获取了局域乃至全国上空的水汽三维分布信息。国内主要有宋淑丽等(2005)、曹云昌等(2006)、毕研盟等(2008)、张双成等(2008)等分别利用上海地区 GPS 综合应用网、香港地基 GPS 气象监测网、河北雾灵山地基 GPS 试验网、海南地基 GPS 试验网数据,获取了局地上空水汽的四维时空变化,并对层析结果在强对流灾害天气中的应用进行了初步研究。同时,国内外学者还利用并址观测的水汽辐射计和无线电探空数据,对地基 GPS 水汽层析得到的大气水汽垂直剖面进行了结果对比和精度验证(Huang et al,2005;Ha et al,2010)。通过这些学者的工作,目前陆地上空水汽层析研究也取得明显的进展,并在部分国家和地区开始业务化运行。

目前地基 GNSS 水汽层析的方法主要有附加约束法(Flores et al,2000)、三维变分法(Macdonald et al,2002)和卡尔曼滤波方法(Grandinarsky et al,2004)。上述三种方法各有特点。三维变分法需要提供数值模式的背景场,算法也比较复杂,在地基 GNSS 水汽层析中的应用较少。附加约束法和卡尔曼滤波法在局地上空三维水汽场的重构中得到广泛关注。国内外很多专家、学者对这两种方法在 GNSS 水汽层析中的应用进行了深入的研究和算法改进,从而使得这两种方法在地基 GNSS 水汽层析中的应用更加广泛。除此之外,国外一些学者也开展了基于 GPS 原始相位观测值、双差观测值、移动网格技术以及网格单元参数化的水汽层析方法研究(Nilsson et al,2007;Nicholson et al,2005;Noguchi et al,2004;Perler et al,2011)。

附加约束条件的层析算法由 Flores 等(2000)最先提出,其用于局地上空三维水汽场的重建和监测大气水汽的时空变化,并利用欧洲中尺度数值预报中心(ECMWF)预报结果对该算法进行了验证。之后,该方法被国内外专家、学者广为采用,并在此基础上进行了改进。Braun 等(2003)将水汽层析观测方程组的解算方法由原来的奇异值分解法(SVD)转为直接解算的方法,并采用扩展的序贯逐次滤波方法,这在一定程度上改善了解的敏感性。国内宋淑丽等(2004b)较早对附加约束条件的水汽层析算法进行了系统研究,为了解决层析观测方程的秩亏问题,提出了用数值预报结果作为先验值,高斯加权函数进行水平约束的方法;针对无法给出各类方程准确先验权的问题,提出了采用验后方差分量估计进行验后定权的方法;采用抗差估计的方法,以降低噪声对反演结果的影响;最后利用上海 GPS 综合应用网数据,在国内首次探测了上海地区的水汽三维分布。毕研盟等(2006a)以无线电探空结果为先验信息约束大气水汽的垂直结构,并对不同先验信息方案下的层析结果进行了对比分析,结果表明 GPS 层析对先验信息的调整作用明显,较好的先验信息会有助于水汽层析反演。通过附加宽松的高斯约束方法提供给卡尔曼滤波的初值,曹云昌等(2006)对附加约束法和卡尔曼滤波方法相结合的层析方法进行了研究,并利用香港地基 GPS 气象监测网数据进行了验证,取得了较好的结果。于胜杰等(2010)利用模拟数据系统地研究了各种约束条件对 GPS 水汽层析模型的影响,结果表明:无线电探空、数值预报结果等先验信息会提高 GPS 层析结果的可靠性,且先验信息的精度对层析结果具有十分重要的影响。另外,先验信息的作用与地面 GPS 网站点间的相对高差大小有关。当 GPS 站点间的相对高差较小时,先验信息对层析模型具有很大的影响;但当 GPS 站点之间的相对高差较大时,先验信息的作用明显减小,此时,即使不采用其他观测手段提供的先验信息,也可得到准确的水汽反演结果。王维等(2011)通过数值模拟仿真将联合迭代重构算法应用于水汽层析过程,收敛速度较快,且较之求逆的层析算法更易于实现。

1.2.4 基于移动平台的海上 GNSS 水汽反演研究

在地基 GNSS 气象学的理论和方法研究的基础上,国外有些学者基于船舶或浮标等移动平台,对海上 GNSS 水汽反演技术和方法进行了进一步的研究和验证,得到了一些初步结果。

美国斯克里普斯海洋研究所(SIO)的 Chadwel 等(2001)利用 1997 年 11 月为期 11 天的海上浮标 GPS 观测数据,较早地进行了海上 GPS 大气可降水量信息的提取和精度验证。浮标距离海岸约 8 km,在岸边设立 1 个地面参考站,同时选取 4 个远距离 IGS 站,基于双差相位观测模型的固定解处理策略,直接估算了浮标上空绝对 GPS 大气可降水量;与近岸码头的无线电探空数据相比,浮标 GPS 大气可降水量估值的均方根误差(RMSE)为 1.5 mm,系统偏差为-0.29 mm,结果较为理想。Dodson 等(2001)在泰晤士河上进行了短基线(约 200 m)船载 GPS 水汽探测试验,采用改进的卡尔曼滤波方法进行船载 GPS 大气可降水量信息的提取,并对船载和参考站地基 GPS 大气可降水量值进行了对比,结果表明船载 GPS 大气可降水量可获得与参考站地基 GPS 水汽相当的精度。Cardellach 等(2000)利用离岸 80 km 的浮标 GPS 数据,发现浮标 GPS 估计的天顶对流层延迟值与星载微波辐射计单次通过测定的相应天顶对流层延迟值具有较好的一致性,可以达到厘米级的精度水平。德国汉堡大学气象学院在 2001 年 6 月、10—11 月先后进行了两次海上船载 GPS 水汽探测试验,同时采集了船载无线电探空数据(12 小时发射 1 次),以验证海上动态 GPS 大气综合水汽含量(IWV)估值的精度。其中第一次试验(2001,年积日:165~169)结果较好,与船载无线电探空数据比较,超过 50% 的 GPS 大气综合水汽含量估值的差值小于 3 kg/m^2 ;第二次试验(2001,年积日:304~309)的处理结果存在很多问题,结果不甚理想。随后,2001 年底在 Bottsand 浮油回收船上安装了 1 台双频 Trimble 4000 SSE 型 GPS 接收机,开始了沿航线 GPS 大气综合水汽含量信息的提取工作,历经 2002 年,直至 2003 年 1 月为止。1 年多的船载 GPS 水汽探测结果验证了基于动态移动平台的海上 GPS 大气综合水汽含量提取方法是可行的,与数值天气模式相比较,超过 50% 的 GPS 大气综合水汽含量估值的差值小于 4 kg/m^2 ,达到了较为理想的精度(Schüler, 2006)。美国大学大气研究联合会曾利用航行船舶在开阔海域分别进行了 2 次为期 1 周的确定 GPS 大气可降水量和海面高的试验,验证了船载对流层延迟和柱状水汽估计的可行性,其均方根误差为几个毫米的水平;且海上船载 GPS 大气降水量的均方根误差和系统偏差大约是地基 GPS 大气降水量的 3 倍,其原因主要是由动态变化的接收机位置误差造成的(Rocken et al, 2005)。2006 年日本海洋科技研究中心(JAMSTEC)组织实施了 1 次为期 3 个月的印度洋海上科学试验,期间采集了 5 s 间隔的 GPS 观测数据,进行了 GPS 大气可降水量探测试验,并利用 300 余次船载