

Research and Application of Real-Time Water Vapor Remote Sensing Using Ground Based GPS/Met

ZHANG Shuangcheng¹, YE Shirong², LIU Jingnan², ZHANG Qin¹

¹College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, No.126 Yanta Road, Xi'an 710054

²GNSS Research Center, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China

e-mail: shuangcheng369@163.com

Abstract: The amount of water vapor in the atmosphere is highly variable in space and time. How to get real-time water vapor information and understand the variation of water vapor is to solve the urgent problems for present atmospheric soundings. Ground-based GPS technology provides a new means for sensing atmosphere water vapor, which has become a powerful complementary to the regular atmospheric sensing system. Along with the rapid development of GPS navigation techniques and establishment of CORS Network, especially the full implementation of the Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC), research on Ground-based GPS/Met theory and application is rapidly developing at home in recent years. But ground-based GPS/Met has not been reaching the step of normal application. Much more research work concerned about it needs to be solved in the near future. In this paper, a few key technologies of remote sensing water vapor using Ground-based GPS/MET are studied thoroughly based summarizing systematically the theory and methods of GPS sensing water vapor.

Keywords: ground-based GPS meteorology; precipitable water vapor (PWV); slant path water vapor (SWV); mapping functions (MF); tomography water vapor.

地基 GPS 实时遥感水汽空间分布技术研究及应用*

张双成¹, 刘经南², 叶世榕², 张 勤¹

¹ 长安大学地质工程与测绘学院, 西安市雁塔路 126 号, 710054

² 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 武汉市珞瑜路 129 号, 430079

e-mail: shuangcheng369@163.com

摘 要: 如何快速深入了解水汽分布情况和掌握水汽变化趋势是目前地球大气探测系统中亟需解决的难点问题之一。随着 GPS 空间定位技术的飞速发展和 GPS 综合服务网的广泛建立, 特别是“中国大陆构造环境监测网络”工程的启动, 极大地推动了国内地基 GPS 遥感水汽技术的理论研究及业务推广应用。本文从实际应用的角度出发, 针对地基 GPS 遥感水汽技术走向业务运行所涉及的遥感天顶可降水量 PWV、遥测 GPS 信号方向斜路径水汽 SWV、层析水汽空间分布等技术问题进行了深入探讨与系统性研究, 最后结合香港地基 GPS 水汽监测网对该系统的可靠性和稳健性进行了验证。

关键词: 地基 GPS 气象; 可降水量; 斜路径水汽; 映射函数; 层析水汽

1 引言

水汽在全球气候系统、气候灾害监测及空间大地测量等领域占有极其重要的地位, 然而目前常规水汽探测手段的不足严重制约着相关学科的发展。因此, 如何快速深入了解水汽分布情况和掌握水汽变化趋势是当代地球大气探测系统中亟需解决的难点问题之一。地基 GPS 作为新型的大气探测手段, 目前已成为

常规探测水汽手段的有利补充。随着 GPS 导航定位技术的飞速发展和 GPS 综合服务网的广泛建立, 特别是“中国大陆构造环境监测网络”工程的启动, 极大地推动了国内地基 GPS 遥感水汽技术的理论研究及业务推广, 并成为当前国内大气探测领域的研究热点。但目前地基 GPS 遥感水汽技术还没有在国内完全达到应用阶段, 还有诸多关键技术问题有待进一步细化和解决, 以此来加快国内地基 GPS 走向业务运行的快速发展。本文从实际应用的角度出发, 针对地基 GPS 遥感水汽技术走向业务运行所涉及的遥感天顶可降水量

*资助项目: 国家自然科学基金项目 (40672173) ; 国家 863 计划 (2007AA12Z310, 2007AA12Z345)

PWV (Precipitable Water Vapor)、遥测 GPS 信号方向斜路径水汽 SWV (Slant path Water Vapor)、层析水汽空间分布和 GPS 实时遥感水汽系统构建等技术问题进行了深入探讨与系统性研究,期望能对地基 GPS 实时遥感水汽技术推广应用提供实用参考信息。

2 地基 GPS 高精度遥感天顶可降水量 PWV

基于地基 GPS 监测网遥感高精度天顶可降水量 PWV 是获取 GPS 斜路径可降水量 SWV 和进行地基 GPS 遥感水汽空间分布深入研究的重要基础。针对地基 GPS 遥感天顶水汽技术,近几年国内众多学者也对其进行了大量研究(曹云昌, 2002; 章红平, 2003; 宋淑丽, 2004; 郭志梅, 2005; 曲建光, 2005; 翟清斌, 2005; 毕研盟, 2006; 王勇, 2006; 李国平, 2007; 张双成, 2009 等),极大地推动了地基 GPS 遥感水汽技术在国内的快速发展。目前该技术相对比较成熟,并开始在实际气象业务中推广应用。

为了达到毫米级地基 GPS 遥感天顶水汽的精度,针对 GPS 的多种误差源,地基 GPS 遥感水汽必须处理以下几个技术问题:如轨道误差、对流层改正模型、映射函数、潮汐改正、天线相位中心改正、地基 GPS 网布设、加权平均温度、端部效应等。国内外诸多学者通过多种试验和实际应用对地基 GPS 遥感天顶水汽可靠性和精度进行了验证,业已证明利用 GPS 能以高时间分辨率反演测站上空大气可降水量,精度可达 1~2mm。地基 GPS 遥感天顶水汽技术当前已经基本成熟,并且在国内外气象业务运行中得到了极大推广。

3 地基 GPS 高精度遥感信号方向的斜路径水汽 SWV

尽管地基 GPS 能以很高的精度反演测站天顶 PWV,地基 GPS 测定的测站上空 PWV 是天顶总的可降水量,不能提供测站上空大气中水汽的垂直剖面信息,而水汽的廓线分层信息对于发展和校正中尺度数值天气预报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。目前国际上研究表明, GPS 接收机和卫星之间沿倾斜信号方向观测的斜路径水汽 SWV 包含更加精确而细致的水汽观测信息^[1]。利用 GPS 斜路径水汽量 SWV 不仅可以层析水汽三维分布,优化数值天气预报初始场,而且对于研究多种急剧变化的天气现象有着巨大的潜力。另外, SWV 还可用来矫正 InSAR 大气误差,改正 GNSS 大气测量误差、雷达影像误差等。基于此, GPS 遥感斜路径方向水汽含量 SWV 技术开始迅速发展起来。1997 年 Ware 等^[2]研究证实,采用 GPS 双差解算的方法获取 SWV 的可

行性; Braun 等^[4]通过实验结果对比分析得出在一定的高度角下,利用 GPS 遥感斜路径水汽 SWV 的精度可达毫米量级;曹云昌和毕研盟等^[5,6]也基于双差方法验证了利用 GPS 遥感 SWV 在精度上的可行性;宋淑丽等^[7]则基于非差算法提出一种以毫米级精度直接计算 SWV 的方法;张双成等^[8]对基于双差模式的 SWV 算法完善性做了更深入的研究(见图 1),并结合实测数据对 GPS 遥感 SWV 算法进行了验证,结果表明在仰角大于 15° 时 GPS 能以优于 4mm 精度反演 SWV (以 WVR 观测为参考)。

由图 1 可知在高精度获取 PWV 的前提下,水平梯度、映射函数和斜路径残差将成为影响 GPS 高精度反演 SWV 技术的主要技术问题^[8],在高精度获取 SWV 时必须考虑这些因素。

✧ 水平梯度:大气水平梯度与天气变化和观测高度角紧密相关,在恶劣天气条件下低高度角时对 SWV 影响尤为严重,且水平梯度存在季节性周期变化和低高度角时漂移现象,结果表明在恶劣天气条件下和低高度角时必须考虑水平梯度对反演 SWV 精度的影响。

✧ 映射函数:通过分析映射函数对地基 GPS 遥感斜路径水汽 SWV 精度的影响^[9],可知基于 ECMWF 构建的动态映射函数 VMF1 和全球映射函数 GMF 在全球覆盖性和精度可靠性方面优于常用的 NMF 映射函数模型,且对低仰角 GPS 斜路径延迟获取精度具有一定的改进^[11]。因此,在高精度地基 GPS 遥感水汽过程中应采用 VMF1 或 GMF 模型,以此在一定程度上来改善大气折射模型偏差。

✧ 斜路径残差:由于大气底层时空变化的复杂性和多路径误差的严重影响,使得在参数估计时较为对对流层湿延迟建立准确的函数模型,进而成为

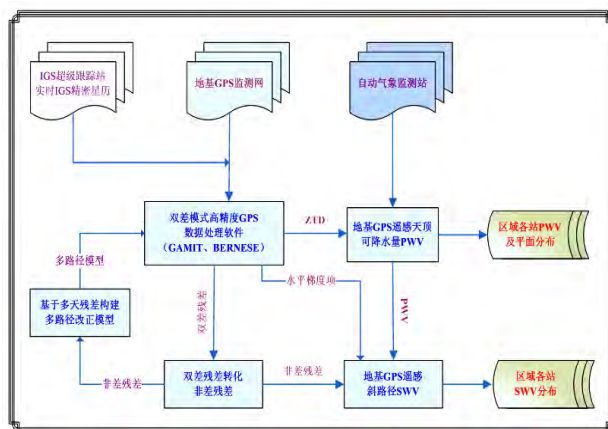


Figure 1. Processing steps for retrieved GPS SWV

图 1. 基于双差模式反演地基 GPS 倾斜路径水汽 SWV 流程图

PWV/SWV 估算精度较低的主要原因。因此,在高精度地基 GPS 遥感 SWV 数据处理过程中常假定剩余的相位残差主要是由湿大气的不均匀及可变性引起,其中也包含多路径效应误差的影响。

4 地基 GPS 实时遥感水汽空间分布

相比 PWV, SWV 的观测拓展到了测站上空不同的空间方位上,但它仍然不能给出水汽垂直分层信息。经研究发现利用地基 GPS 气象监测网的大量斜路径延迟观测值,采用医学领域的断层扫描技术即可高精度重构大气水汽的空间分布。近几年国内外学者对层析算法的研究都论证了利用地基 GPS 监测网层析水汽空间分布是可行性^[5-13],并在气象业务运行中开始进行试验性推广应用。目前基于地基 GPS 层析水汽空间分布主要有附加约束法、Kalman 滤波法和三维变分法。为了更好地分辨出大气结构,附加约束条件法需要在层析中增加大气垂直结构的先验信息;三维变分法则需要提供数值模式的背景场,算法比较复杂;而 Kalman 滤波法对初值具有一定的依赖性^[6]。相比附加约束条件的层析算法,基于 Kalman 滤波的层析算法无需借助额外传感器(如探空、雷达和数值预报等)提供必要的观测信息,且在一定程度上仅与初值可靠性相关,使得近几年在层析水汽领域得到广泛关注,本文也是基于 Kalman 滤波算法来重构水汽空间分布。

为了验证层析水汽的 Kalman 滤波算法的有效性,本文以香港地基 GPS 气象监测网为研究对象,基于 GAMIT 平台开发的实时地基 GPS 遥感水汽数据处理系统进行了层析实验,该网包含 12 个连续运行的 GPS 监测站,站间相互距离 7~27Km。为计算简便,层析

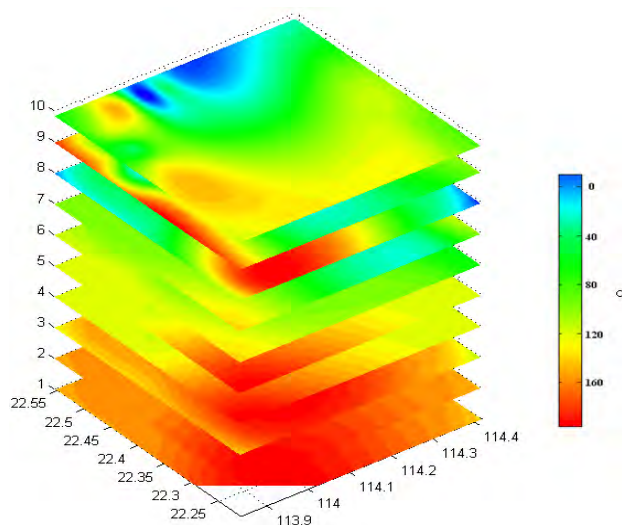


Figure 2. 3D view of tomography WetRefractivity in HongKong

图 2. 层析香港地区湿折射率三维分布

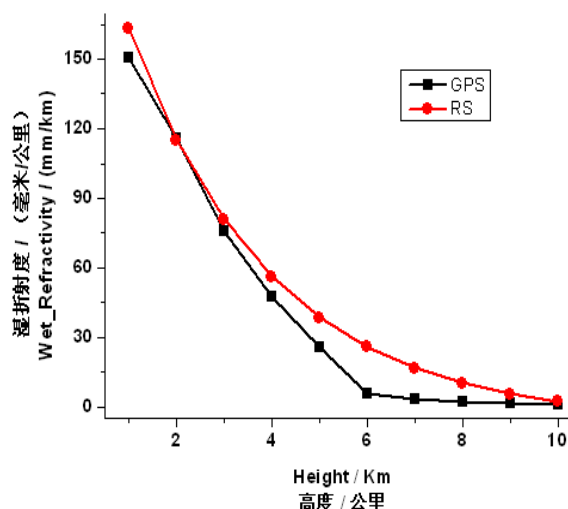


Figure 3. Retrieved wet refractivity profiles at radio sonde station in HongKong

图 3. 反演的香港探空站湿折射率轮廓线

格网模型坐标系统采用局部大地坐标系,对流层总高度由下至上取 10Km,垂直分辨率 1Km;平面网格间距约 5Km,经度由西向东依次划分成 12 个网格,纬度由南向北依次划分成 8 个网格。实验获取了 2007 年 7 月 1 日香港地区 12 个 GPS 监测站和自动气象站的观测资料,基于 GPS 监测网获得的湿延迟观测值,层析水汽的时间弧段取 2h,采用 Kalman 滤波的层析算法得到每 2 小时一次的湿折射度空间三维分布。为节省篇幅,文中仅给出当天时间 7~9 点之间的层析湿折射度空间分布结果(见错误!未找到引用源。2)。为验证层析结果的精度,选取香港探空站(经度 114.17°,纬度 22.32°)提供的站点廓线观测值作为参考值,与层析 GPS 结果进行了比对(见错误!未找到引用源。3)。

结合错误!未找到引用源。和错误!未找到引用源。分析上述香港区域水汽初步层析结果可知:

(1) 由图 2 可看出仅基于 Kalman 滤波的层析算法可以较好地给出区域水汽湿折射率的空间三维分布及其变化趋势;将层析区域探空站观测到的折射率廓线信息作为参考值,由图 3 看出层析初步结果整个趋势符合大气折射率的变化规律,且两者结果吻合的较好,标准偏差为 13.29mm/km;

(2) 层析结果与探空结果整体吻合较好,但随着对流层高度的增加,层析结果逐渐趋于不稳定,特别是中间层(见图 2 中的 5~8Km),而且层析大气顶层的边界结果偏差也逐渐变大。

通过对香港区域地基 GPS 层析水汽结果的多次分析,研究表明无需额外观测资料的情况下,基于 Kalman 滤波也可以有效层析水汽的空间分布,但是该

算法在开始对初值有很强的依赖性,随着滤波的不断更新,这种依赖性会逐步减弱,因此该算法存在一个初始化过程。滤波初值的获取可以基于当地气象资料统计分析获取,以此来阻止滤波发散。除此之外,该算法的反演精度还与地基GPS监测网站点间距和格网模型构建等因素强相关,因此仍然有许多问题需要深入研究。

5 结论及展望

本文以完善现有的地基GPS遥感水汽理论和推动其走向气象业务运行行为研究目标,对地基GPS遥感水汽空间分布所涉及的一些关键技术问题进行了系统性的深入研究,开发了实时地基GPS遥感水汽数据处理系统,并通过大量的实测数据对理论模型算法和数据处理系统的稳健性进行了验证。

虽然目前已经从理论上完全验证了利用GPS测定大气水汽的可行性,而且在测定精度、时间和空间分辨率、经济效益等方面都有一定的优势,但是要在国内完全达到业务运行阶段,诸多研究工作需要在地基GPS气象监测网建设、GPS遥感水汽理论研究以及软件开发等方面继续深入开展。

致 谢

衷心感谢美国MIT授权使用GAMIT/GLOBK软件,感谢美国MIT的Bob King和Tom Herring等人在数据处理上给予的热情帮助;感谢香港地政总署测绘处提供的香港地基GPS气象监测网数据!衷心感谢匿名审稿专家和编辑为作者修改本文提供的意见和建议!

References (参考文献)

- [1] Bevis M, Businger S, Herring T A, C. Rocken, R. Anthes, and R. Ware. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system [J]. JGR, 1992,97(D14):15787~15801.
- [2] Ware R, Alber C, Rocken C, et al. Sensing integrated water vapor along GPS ray paths [J]. GRL, 1997,24:417~420.
- [3] Alber C, Ware R, Rocken C, et al. Obtaining single path phase delays from GPS double differences [J]. GRL, 2000,27:2661~2664.
- [4] John Braun, Christian Rocken, Randolph Ware, Validation of line-of-sight water vapor measurements with GPS [J], Radio Science, 2001,36:459~472.
- [5] 毕研盟. 应用全球定位系统(GPS)遥感大气水汽的研究[D]. 北京: 北京大学,2006.
- [6] 曹云昌,陈永奇,李炳华等. 利用地基GPS测量大气水汽廓线的方法[J]. 气象科技, 2006,34(3):241~245.
- [7] 宋淑丽. 地基GPS网对水汽三维分布的监测及其在气象学中的应用[D]. 上海: 中国科学院上海天文台,2004.
- [8] 张双成. 地基GPS遥感水汽空间分布技术及其应用的研究[D]. 湖北: 武汉大学,2009.
- [9] 张双成,叶世榕等. 动态映射函数最新进展及其在GNSS遥感水汽中的应用研究[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2009, 34(3):280~283.
- [10] 张双成,叶世榕等. 基于Kalman滤波的断层扫描初步层析水汽湿折射率分布[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2008, 33(8):796~799.
- [11] Johannes Boehm, Birgit Werl, and Harald Schuh. Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from ECMWF operational analysis data [J]. JGR, 2006, 111(B02406), Doi:10.1029/2005JB003629.
- [12] Marc Roland Troller. GPS based Determination of the Integrated and Spatially Distributed Water Vapor in the Troposphere [D]. SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH, 2004.
- [13] Tobias Nilsson. Measuring and modeling variations in the distribution of atmospheric water vapor using GPS [D]. Department of Radio and Space Science in Chalmers University of Technology, Sweden, 2008.
- [14] 章红平. 利用地基GPS数据估计大气可降水量[D]. 湖北: 武汉大学,2003.
- [15] 王勇. 地基GPS网气象应用研究[D]. 中国科学院测量与地球物理研究所,2006.
- [16] 李国平. 地基GPS遥感大气可降水量及其在气象中的应用研究[D]. 四川: 西南交通大学,2007.