

文章编号:1673-5005(2012)03-0084-04

海上动态 GPS 大气可降水量信息反演

范士杰^{1,2,3,4}, 刘焱雄³, 高兴国³, 冯义楷³, 张 健³

(1. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079; 2. 中国石油大学 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;
3. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 4. 海岛(礁)测绘技术国家测绘局重点实验室, 山东 青岛 266510)

摘要:基于精密单点定位 (PPP) 技术, 对海洋上空大气可降水量 (PWV) 信息反演方法进行研究。采用随机游走过程估计方法, 动态模拟船载 GPS 接收机天顶对流层湿延迟 (ZWD) 在时间和空间尺度上的随机变化。利用渤海湾船载动态 GPS 测量数据和同步气象观测数据, 结合海洋动态环境, 以渤海湾 MM5 模式积分水汽为参考值, 详细分析不同随机过程噪声约束和卫星截至高度角等因素对 PWV 提取精度的影响。结果表明, 选取 $2 \sim 5 \text{ mm}/\sqrt{h}$ 的随机过程噪声约束以及 $7^\circ \sim 10^\circ$ 的卫星截至高度角, 海上船载动态 PWV 反演结果与 MM5 模式积分水汽基本一致, 其偏差的绝对值均小于 3 mm, 均方根误差优于 1.2 mm。

关键词:GPS 气象学; 精密单点定位; 随机游走过程; 天顶对流层湿延迟; 大气可降水量; 信息反演

中图分类号:P 228.4 **文献标志码:**A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2012.03.013

Retrieval method of marine kinematic GPS precipitable water vapor

FAN Shi-jie^{1,2,3,4}, LIU Yan-xiong³, GAO Xing-guo³, FENG Yi-kai³, ZHANG Jian³

(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

3. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China;

4. Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef, State Bureau of Surveying and Mapping, Qingdao 266510, China)

Abstract: The retrieval method of marine kinematic GPS precipitable water vapor (PWV) was researched using precise point positioning (PPP) technique. The random variation of GPS zenith wet delay in the time and spatial scales was simulated by the evaluation method of random walk process. The ship-borne GPS data and simultaneous meteorological observation in Bohai sea were processed. Then the integral water vapor for MM5 model was used as reference, and the influence of PWV retrieval precision for different random process noise constraint and cut-off elevation angle was analyzed. The results show that the absolute differences of marine kinematic GPS/PWV are all less than 3 mm and the root mean square error is 1.2 mm, using random process noise constraint of $2 \sim 5 \text{ mm}/\sqrt{h}$ and cut-off elevation angle of $7^\circ \sim 10^\circ$. The ship-borne kinematic GPS/PWV agrees well with the integral water vapor for MM5 model.

Key words: GPS meteorology; precise point positioning; random walk process; zenith wet delay; precipitable water vapor; information retrieval

近二十年来,地基 GPS 气象学研究取得了丰硕的成果^[1-3],并进入业务运行阶段^[4]。GPS 水汽探测技术为海洋水汽遥感提供了新的途径。但是,国内外现有的地基 GPS 水汽遥感方法主要针对陆地稳固的 GPS 站,并不完全适用于以浮标或船舶为载

体的海洋动态环境^[5-6]。笔者利用渤海湾船载动态 GPS 测量数据和同步气象观测数据,基于精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 技术,对海洋上空动态 GPS 大气可降水量 (precipitable water vapor, PWV) 信息反演方法进行研究。

收稿日期:2011-09-06

基金项目:国家“863”计划项目 (2009AA12Z127); 海岛(礁)测绘技术国家测绘局重点实验室项目 (2010B03)

作者简介:范士杰 (1969-),男(汉族),山东冠县人,副教授,博士研究生,主要研究方向为 GPS 精密定位、GPS 气象学。

1 基于PPP的海上动态PWV反演方法

GPS观测模型中的对流层延迟与频率无关,在定位中通常作为“噪声”予以消除。但是,气象学家们认为对流层延迟中包含大气温度、气压和水汽含量等有用信息,因此在GPS数据处理中常常基于某些假设和采用某种数学模型,估算出天顶对流层延迟的大小,进而提取大气可降水量信息。目前常用的地基GPS天顶对流层延迟估计方法有双差网解法^[7]和非差精密单点定位方法^[8-10]。双差方法不适用于海上动态GPS观测,而精密单点定位方法具有模型简单、站间观测不相关、直接估计绝对时延、适合实时或近实时数据处理等优点,因此本文选用该方法进行海上动态PWV信息的反演。

基于PPP技术进行海上动态PWV反演,首先要估计GPS天顶对流层湿延迟(ZWD),其数据处理策略如下:利用IGS精密星历和卫星钟差,固定卫星轨道和消去卫星钟差;采用双频无线电离层组合观测模型消除电离层延迟的一阶项影响;接收机钟差参数作白噪声处理;利用经验模型(如Saastamoinen模型)计算GPS天顶静水力学延迟(zenith hydrostatic delay, ZHD),而GPS天顶湿延迟分量作为待估参数;结合海洋动态观测环境和海上水汽信息的时空变化,采用随机游走过程方法模拟其时空变化^[9-10],在滤波处理时附加ZWD参数的动态噪声约束;映射函数采用GMF模型^[11];若考虑水汽分布的不均匀性和不对称性,则引入大气水平梯度改正参数^[12],同时考虑地球自转改正、相对论效应、相位缠绕、潮汐改正(包括海洋潮汐、极移潮汐)、卫星和接收机天线相位中心改正等误差影响;最后采用序贯最小二乘法逐历元解算接收机坐标和钟差、对流层天顶湿延迟、大气水平梯度改正及载波相位模糊度等参数。

通过物理转换可得到GPS大气可降水量 L_{PWV} 计算式为

$$L_{PWV} = F D_{ZW} \quad (1)$$

其中

$$F = \frac{10^6}{\rho R_v (k_3/T_m + k_2 - w k_1)} \quad (2)$$

式中, F 为转换因子^[1]; ρ 为水的密度; R_v 为水汽常量; k_1 、 k_2 和 k_3 为大气折射因子; w 为水汽分子与干空气分子的质量比; T_m 为对流层加权平均温度; D_{ZW} 为天顶对流层湿延迟量。

2 数据获取

以渤海湾为试验区域,选取大连—秦皇岛—烟台—大连的环形航线,全长约800 km,如图1所示。以调查船作为动态观测平台,在调查船上装备GNSS接收机和自动气象站等设备。采用TOPCON NET G3A型高精度双频GNSS接收机和TPSCR. G3 NONE扼流圈天线,以有效抑制多路径效应的影响;自动气象站包括相对湿度传感器、温度传感器和气压计。

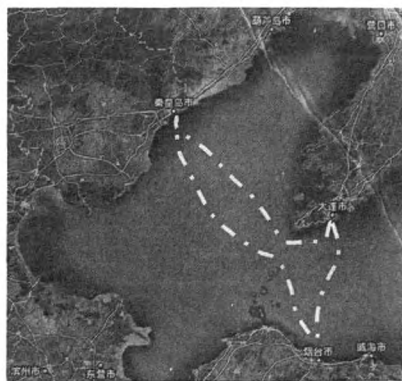


图1 海上动态GPS测量的航线

Fig. 1 Route of marine kinematic GPS survey

利用船载高精度双频GNSS接收机、自动气象站等设备,2010年11月22~24日在渤海湾海域沿选定航线,进行了海上船载动态GPS测量和同步气象数据(气温、气压、相对湿度)的联合采集,为动态GPS海洋水汽信息遥感获取原始测量数据。GNSS接收机的数据采样率为1 s,卫星截至高度角为5°;自动气象站的气温、气压和相对湿度的采样率均为1 s。

3 数据处理和结果分析

基于PPP技术,采用IGS事后精密星历和钟差产品,借助研制的PPP软件UNIP,采用本文中所述数据处理策略和方法,对渤海湾船载动态GPS测量和同步气象观测数据进行处理,动态反演航线上空GPS大气可降水量信息及其时空变化。同时,采用渤海湾MM5模式三维气象场数据,建立区域折射率和水汽信息的空间格网。根据三维格网点上的折射率,内插出任意方向上的折射率,进行分段积分后即可得到气象场内任意方向的对流层湿延时(或水汽延时)。宋淑丽^[13]对上海GPS综合应用网反演的PWV序列和MM5模式每小时预报结果进行了比

较,高兴国^[14]计算了环黄渤海地基 GPS/PWV 信息,并与 MM5 模式数值气象预报资料计算结果进行比较,结果表明 MM5 模式积分水汽延时是可信的,具有较理想的精度。因此,本文中以 MM5 模式积分水汽为参考值,对海上动态 GPS/PWV 反演结果进行对比和分析。

在 PPP 数据处理中,存在多种因素会影响 GPS 天顶湿延迟及大气可降水量的估算精度。本文中结合海洋动态观测环境,主要对随机过程动态噪声约束和卫星截至高度角的选取等进行讨论和分析。

3.1 随机过程动态噪声约束对 PWV 的影响

由于对流层中的物质分布在时间和空间上有较大的随机性,因此对流层折射延迟也具有较大的时空随机性。目前,随机过程方法是最理想的对流层折射估计方法。本文中结合海洋动态观测环境,采用随机游走过程模拟天顶湿延迟的时空变化,在 PPP 滤波处理时附加 ZWD 参数的动态噪声约束,以提高 ZWD 参数的估计精度,更加准确地提取大气可降水量信息。

在随机游走过程方法中,ZWD 参数估计的结果与动态噪声约束 δ_w 有关。本文分别选取 δ_w 值为 2、5、10、20 mm/ $\sqrt{h}$,卫星截至高度角均为 10° 。基于动态精密单点定位技术,采用不同的参数动态噪声约束,对海上船载动态 PWV 信息进行反演。为了减小 MM5 模式三维气象场数据插值误差的影响,本文中只提取每小时间隔的 PWV 结果与 MM5 模式对应历元的积分水汽进行对比,见图 2(其中, t_{UTC} 为协调世界时)。以 MM5 模式积分水汽为参考值,分别计算不同随机过程噪声约束的 PWV 结果的偏差并进行误差统计,见表 1。

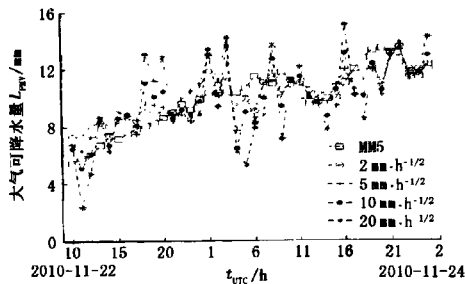


图 2 不同噪声约束的 PWV 结果与 MM5 模式积分水汽的对比

Fig. 2 PWV results for different noise constraints and integral water vapor for MM5 model

由图 2 和表 1 可知:相对于 MM5 模式积分水汽,随机过程噪声约束分别为 2 和 5 mm/ $\sqrt{h}$ 的 PWV

结果与 MM5 模式积分水汽基本一致,其偏差的绝对值均小于 3 mm,均方根误差分别为 1.1 mm 和 1.2 mm,结果较为理想。随机过程噪声约束为 10 和 20 mm/ $\sqrt{h}$ 的 PWV 结果较差,出现了较大的偏差和异常跳动。因此,采用随机过程估计方法进行海上动态 PWV 信息反演时,随机过程噪声约束 δ_w 的选择至关重要。一般情况下,噪声约束值应根据 GPS 接收机的运动状态和大气水汽的时空变化进行合理选择。本文中渤海湾试验数据为船载低动态 GPS 观测数据,试验航线的对流层天顶湿延迟的时空变化较为平缓(图 2),试验期间的平均变化量均小于 1 cm/h。因此,太大的随机过程噪声约束会造成 PPP 的 ZWD 估值的畸变,从而使得 PWV 反演结果产生较大的偏差。

表 1 不同噪声约束 PWV 偏差的误差统计

Table 1 Error statistics of PWV differences for different

误差	noise constraints			
	2 mm/ $\sqrt{h}$	5 mm/ $\sqrt{h}$	10 mm/ $\sqrt{h}$	20 mm/ $\sqrt{h}$
最大	2.1	2.7	3.2	5.0
最小	-2.3	-2.8	-3.8	-5.5
均方根	1.1	1.2	1.7	2.6

3.2 卫星截至高度角对 PWV 的影响

卫星截至高度角是 GPS 数据处理中的一项重要指标,是对参与解算 GPS 观测值的筛选。低高度角观测值包含更多的对流层延迟信息,有利于对流层延迟估计及 PWV 信息提取。但是,低高度角观测值同样存在对流层映射函数投影误差较大^[15]、观测质量不佳等不足。因此,卫星截至高度角的合理选取也是海上动态 GPS 大气可降水量(PWV)信息提取的一个关键问题。

利用渤海湾船载动态 GPS 观测数据,采用研制的动态 PPP 软件,随机过程噪声约束为 2 mm/ $\sqrt{h}$,分别选择卫星截至高度角为 7° 、 10° 、 15° 和 20° 进行海上动态 PWV 信息提取,并与 MM5 模式积分水汽进行比较,结果如图 3 所示。以 MM5 模式积分水汽为参考值,分别计算不同卫星截至高度角对应 PWV 结果的偏差,误差统计见表 2。

由图 3 和表 2 可知:不同卫星截至高度角计算得到的 PWV 值稍有不同。 7° 和 10° 截至高度角对应的 PWV 结果较优,与 MM5 模式积分水汽符合较好,均方根误差均为 1.1 mm,而 15° 和 20° 截至高度角对应的 PWV 结果在部分时段出现异常跳动,造成与 MM5 模式积分水汽的较大偏差。因此,选取 $7^\circ \sim 10^\circ$ 的低截至高度角,能够得到与 MM5 模式积

分水汽更为一致的结果,比较适用于海上动态 PWV 信息的提取。但是,利用低高度角观测值进行 PPP 数据处理时,必须解决好映射函数的投影误差以及观测值的粗差和周跳探测等问题。

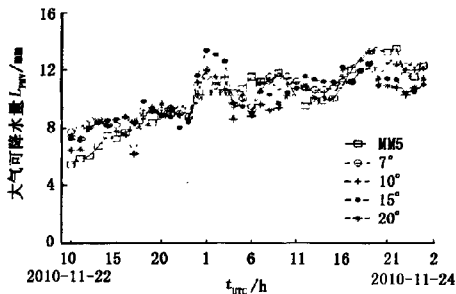


图 3 不同卫星截至高度角 PWV 结果与 MM5 积分水汽的对比

Fig. 3 PWV results for different cut-off elevation angle and integral water vapor for MM5 model

表 2 不同卫星截至高度角 PWV 偏差的误差统计

Table 2 Error statistics of PWV differences for different cut-off elevation angle mm

误差	7°	10°	15°	20°
最大	2.7	2.2	3.0	2.0
最小	-2.0	-2.3	-2.5	-2.7
均方根	1.1	1.1	1.5	1.3

4 结束语

利用渤海湾船载动态 GPS 测量数据和同步气象观测数据,基于动态精密单点定位技术,采用自行研制的 PPP 软件 UNIP,对海上动态 GPS 大气可降水量信息反演进行研究。以渤海湾 MM5 模式积分水汽为参考值,详细讨论了随机过程动态噪声约束、卫星截至高度角等因素对海上 PWV 信息提取精度的影响。选取 2~5 mm/ $\sqrt{h}$ 的随机过程噪声约束以及 7°~10° 的卫星截至高度角,采用 UNIP 软件进行海上船载动态 PWV 信息提取,能够得到与 MM5 模式积分水汽较为一致的结果,其 PWV 偏差的绝对值均小于 3 mm,均方根误差优于 1.2 mm。

基于 PPP 的海上动态 PWV 信息提取技术,可实现海洋水汽信息的连续、近实时和高精度监测,对于改进海洋上空中尺度数据预报初始湿度场的精度和提高中尺度数值预报的准确性,以及海洋气象和灾害预报等,具有重要意义和应用价值。

参考文献:

[1] BEVIS M, BUSINGER S, HERRING T A, et al. GPS

meteorology: remote sensing of the atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. J Geoph Res, 1992,97:15787-15801.

[2] SHOJI Y. A study of near real-time water vapor analysis using a nationwide dense GPS network of Japan[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2009,87(1): 1-18.

[3] 陈永奇,刘焱雄,王晓亚,等. 香港实时 GPS 水汽监测系统的若干关键技术[J]. 测绘学报,2007,36(1):9-12.

CHEN Yong-qi, LIU Yan-xiong, WANG Xiao-ya, et al. GPS real-time estimation of precipitable water vapor-Hong Kong experiences[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(1):9-12.

[4] 李国平,黄丁发. GPS 气象学研究及其应用的进展与前景[J]. 气象科学,2005,25(6):651-661.

LI Guo-ping, HUANG Ding-fa. Advances and prospects in the study of GPS meteorology[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2005, 25(6):651-661.

[5] CHADWELL C. Direct estimation of absolute precipitable water in oceanic regions by GPS tracking of a coastal buoy [J]. Geophys Res Lett, 2001,28(19):3701-3704.

[6] ROCDEN C, JOHNSON J, HOVE T-V, et al. Atmospheric water vapor and geoid measurements in the open sea with GPS[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32:1-3.

[7] DUAN J, BEVIS M, FANG P, et al. GPS meteorology: direct estimation of the absolute value of precipitable water[J]. Journal of Applied Meteorology, 1996,35:830-838.

[8] TAO W, GAO Y, ZHANG Y. Real-time water vapor sensing/measurements with precise point positioning algorithm and Canadian geodetic (GPS) network: proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of ION GNSS, Fort Worth, TEX, September 25-28, 2007[C/CD]. c2007.

[9] GRADINARSKY LP, HAAS R, ELGERED, et al. Wet path delay and delay gradients inferred from microwave radiometer, GPS and VLBI Observations [J]. Earth Planets Space, 2000,52(10):695-698.

[10] 叶世榕,张双成,刘经南. 精密单点定位方法估计对流层延迟精度分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2008,33(8):788-791.

YE Shi-rong, ZHANG Shuang-cheng, LIU Jing-nan. Precision analysis of precise point positioning based tropospheric delay estimation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008,33(8):788-791.

(下转第 92 页)

- ZHU Wen-kai, HE Ling-song, DING Han, et al. Embedded web sensors based on Internet[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2002(8):1-4.
- [8] 何鹏举,戴冠中. 嵌入式 Web 网络传感器的实时数据采集方法[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(6): 2743-2750.
- HE Peng-ju, DAI Guan-zhong. The real-time data collecting method of embedded web server sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(6): 2743-2750.
- [9] 黄卫东,张晓军. 基于 ARM 嵌入式系统的动态 WEB 技术的研究与实现[J]. *微计算机信息*, 2007, 6(2): 148-150.
- HUANG Wei-dong, ZHANG Xiao-jun. The research and realize of the dynamic web base on the embedded system of ARM[J]. *Microcomputer Information*, 2007, 6(2): 148-150.
- [10] 曹玲芝,石军,栾娟. Boa 源码分析及其在嵌入式系统中的应用[J]. *计算机与数字工程*, 2005, 33(6): 10-11.
- CAO Ling-zhi, SHI Jun, LUAN Juan. Boa source code analysis and its application in embedded system[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2005, 33(6): 10-11.
- [11] WENTWORTH Sid. Boa: an embedded web server[J]. *Embedded Linux Journal*, 2001(4): 50-52.

(编辑 修荣荣)

(上接第 87 页)

- [11] BOEHM J, NIELL A, TREGONING P, et al. Global mapping function (GMF): a new empirical mapping function based on numerical weather model data[J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L07304.
- [12] CHEN G, HERRING T A. Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B9): 20489-20502.
- [13] 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.
- SONG Shu-li. Sensing three dimensional water vapor structure with ground-based GPS network and the application in meteorology [D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, 2004.
- [14] 高兴国. 海洋 GNSS 水汽信息遥感映射模型优化研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2010.
- GAO Xing-guo. The study on optimization of mapping function models in GNSS remote sensing ocean water vapor [D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2010.
- [15] 高兴国,刘焱雄,冯义楷,等. GNSS 对流层延时映射函数影响分析比较研究[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2010, 35(12): 1401-1404.
- GAO Xing-guo, LIU Yan-xiong, FENG Yi-kai, et al. Analysis of influence of mapping function on GNSS tropospheric delay[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(12): 1401-1404.

(编辑 修荣荣)