

## 顾及星间单差残差的 GPS 斜路径水汽含量估计

范士杰<sup>1,2,3,4</sup> 刘焱雄<sup>1,2</sup> 高兴国<sup>2</sup> 冯义楷<sup>2</sup>

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 国家海洋局第一海洋研究所,青岛市仙霞岭路 6 号,266061)

(3 中国石油大学地球科学与技术学院,青岛市长江西路 66 号,266555)

(4 海岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室,青岛市前湾港路 579 号,266510)

**摘要:**基于精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术,对海上动态 GPS 斜路径水汽含量(SWV)估计进行研究。在现有计算方法的基础上,提出了顾及星间单差残差的 SWV 提取方法。利用渤海湾船载动态 GPS 测量数据和同步气象观测数据,对新方法的有效性进行了验证。结果表明,相对于 MM5 模式积分水汽结果,采用新方法计算的 SWV 值的 RMS 为 1.2 mm,比传统“非差残差法”减小了 1 mm。

**关键词:**精密单点定位;非差残差;斜路径水汽含量

**中图分类号:**P228.42

GPS 气象学(GPS meteorology, GPS/MET)为海洋水汽遥感提供了新的途径<sup>[1]</sup>。目前,国内外地基 GPS 气象学研究取得了丰硕的成果,天顶方向大气可降水量(precipitable water vapor, PWV)的估算精度可达 1~2 mm<sup>[1-4]</sup>;GPS 信号斜路径水汽含量(slant-path water vapor, SWV)的估算精度也可达到 mm 量级<sup>[5-10]</sup>。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。目前,国内外海洋 GPS 水汽遥感方面的研究成果较少<sup>[11-12]</sup>,海上动态 GPS 水汽遥感方法研究已成为 GPS 气象学中的薄弱环节。

目前,国际上计算 GPS 斜路径湿延迟(slant-path wet delay, SWD)的方法主要有后拟合双差残差分析方法<sup>[5-8]</sup>和直接非差法<sup>[9-10]</sup>。双差方法显然不适用于海上远程动态 GPS 观测;而直接非差法需要得到精确的接收机坐标、精密卫星轨道和钟差,以及存在多种误差模型的参数化和精确化、相位模糊度分解等诸多问题。本文基于精密单点定位(PPP)技术,借助笔者研制的 PPP 软件 UNIP,对海上动态 GPS 斜路径水汽含量(SWV)的提取方法进行研究。为了避免接收机钟差估计误差对 SWV 计算精度的影响,本文对现有计算方法进行了改进,提出了顾及星间单差残差的

SWV 提取新方法。

## 1 GPS 斜路径水汽含量

精密单点定位(PPP)中对流层延时影响的处理策略如下:利用经验模型(如 Saastamoinen 模型)计算 GPS 天顶对流层静水力学延迟(zenith hydrostatic delay, ZHD),而 GPS 天顶对流层湿延迟(zenith wet delay, ZWD)分量则作为待估参数;分别采用静水力学延迟和湿延迟映射函数(如 NMF 模型、GMF 模型等),将 ZHD 和 ZWD 投影到 GPS 信号的倾斜路径方向上;同时考虑水汽分布的不均匀性和不对称性,引入大气水平梯度改正参数,模型如下<sup>[13]</sup>:

$$d_{\text{grad}} = M_{\Delta}(e)(G_N \cos\phi + G_E \sin\phi) \quad (1)$$

$$M_{\Delta}(e) = \frac{1}{\sin e \tan e + 0.003} \quad (2)$$

因此,非差精密单点定位的无电离层组合(Ionospheric-free)相位观测方程为:

$$L_{\text{IF}} = \rho + c(dt_r - dt^j) + M_{\text{dry}} \cdot \text{ZHD} + M_{\text{wet}} \cdot \text{ZWD} + M_{\Delta}(e)(G_N \cos\phi + G_E \sin\phi) + \lambda_1 N_{\text{IF}} + \epsilon_{L_{\text{IF}}} \quad (3)$$

式中, $L_{\text{IF}}$ 为无电离层组合相位观测值; $dt_r$ 为接收机钟差; $dt^j$ 为卫星钟差; $M_{\text{dry}}$ 和 $M_{\text{wet}}$ 分别为静水

力学延迟和湿延迟的映射函数;  $N_{\text{IF}}$  为无电离层组合相位模糊度(不具有整数特性);  $\varepsilon_{L_{\text{IF}}}$  为包含多路径效应、测量噪声以及其他未模型化的误差影响。

利用 IGS 精密星历和卫星钟差,采用卡尔曼滤波或序贯最小二乘估计方法,逐历元进行处理,即可得到非差 PPP 的各参数估值。然后,采用投影法进行 GPS 信号斜路径湿延迟的计算。

GPS 信号的斜路径湿延迟包括各向同性部分、各向异性部分以及未模型化部分。各向同性部分与方位角无关,可由天顶对流层湿延迟分量和湿延迟映射函数相乘得到;各向异性部分则是考虑水汽分布的不对称性影响,随方位角的不同而有所变化,可由大气水平梯度改正模型得到;未模型化的延时部分主要来自于映射函数的经验模型误差、大气水平梯度改正模型的局限性等。一般认为未模型化部分被吸收到验后残差中,且构成验后残差的主要部分,因此,通常取验后残差值  $\varepsilon_{L_{\text{IF}}}$  (非差残差)作为未模型化延时的大小<sup>[14]</sup>。

因此, GPS 信号的斜路径湿延迟为:

$$\text{SWD} = \text{ZWD} \cdot M_{\text{wet}} + M_{\Delta}(e) \times (G_N \cos \phi + G_E \sin \phi) + \varepsilon_{L_{\text{IF}}} \quad (4)$$

GPS 信号斜路径水汽含量 SWV 与斜路径湿延迟 SWD 之间具有对应关系,其转换因子为<sup>[1]</sup>:

$$F = \frac{10^6}{\mu \cdot R_v \cdot (k_3/T_m + k_2 - \tau \omega \cdot k_1)} \quad (5)$$

本文采用李建国等<sup>[15]</sup>给出的适合于中国东部地区和不同季节的  $T_m$  和表面温度  $T_s$  的线性回归方程,即  $T_m = 44.05 + 0.81T_s$ 。

利用转换因子  $F$ ,即可将湿延迟 SWD 转化为水汽含量 SWV:

$$\text{SWV} = F \cdot \text{SWD} \quad (6)$$

为了叙述方便,本文将上述基于 PPP 技术,直接利用非差残差  $\varepsilon_{L_{\text{IF}}}$  提取 GPS 信号斜路径水汽含量 SWV 的方法称为“非差残差法”。

## 2 顾及星间单差残差的 GPS 斜路径水汽含量提取方法

对非差精密单点定位(PPP)的观测模型(3)进行分析可知:基于 PPP 技术,直接利用非差残差  $\varepsilon_{L_{\text{IF}}}$  计算 GPS 信号斜路径湿延迟 SWD,忽略了验后残差中接收机钟差估计误差、多路径效应、测量噪声等影响,这在一定程度上会影响 SWD 计算的精度。为了避免接收机钟差估计误差对 SWD 计算精度的影响,本文对现有“非差残差法”进行了改进,利用星间单差组合消除接收机钟差

影响,进而提出了顾及星间单差残差序列的 SWV 提取新方法。具体步骤如下。

1) 选取高度角最大的卫星(接近天顶方向,如卫星  $S^j$ )作为参考卫星,利用星间单差组合消除接收机钟差影响,生成其他卫星( $S^k, k=1, 2, \dots, n$ )的星间单差残差序列  $\varepsilon^{jk}$ ;

2) 对于参考卫星  $S^j$ ,受对流层映射函数模型误差和大气水平梯度改正模型不完善的影响很小。因此,忽略 GPS 信号斜路径湿延迟 SWD 中未模型化部分的影响,由式(4)可得参考卫星  $S^j$  的 SWD 值为:

$$\text{SWD}^j = \text{ZWD} \cdot M_{\text{wet}}(e^j) + M_{\Delta}(e^j) \times (G_N \cos \phi^j + G_E \sin \phi^j) \quad (7)$$

3) 利用星间单差残差序列  $\varepsilon^{jk}$  估计 GPS 信号斜路径湿延迟中的未模型化部分,恢复其他方向卫星  $S^k$  的 SWD 值:

$$\text{SWD}^k = \text{ZWD} \cdot M_{\text{wet}}(e^k) + M_{\Delta}(e^k) \times (G_N \cos \phi^k + G_E \sin \phi^k) + \varepsilon^{jk} \quad (8)$$

4) 利用同步观测的气象数据,按照式(5)、式(6),由 SWD 值计算得到 GPS 斜向水汽含量 SWV。

## 3 试验和结果分析

2010-11-22~24 笔者在渤海湾进行了海上船载动态 GPS 水汽遥感试验。采用 TOPCON NET G3A 型高精度双频 GNSS 接收机和 TP-SCR. G3 NONE 型扼流圈天线,有效地抑制多路径效应的影响;利用船载自动气象站同步记录航线上气温、气压、相对湿度等气象数据。GPS 接收机和自动气象站的数据采样率均设置为 1 s,卫星截止高度角为  $10^\circ$ 。

借助研制的动态 PPP 软件和 GPS 水汽提取模块,分别采用传统的“非差残差法”和本文提出的 SWV 提取新方法,计算海上动态 GPS 信号斜路径湿延迟 SWD 及水汽含量 SWV。为了评估海上动态 GPS 水汽遥感信息的精度,本文采用渤海湾 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<sup>[16]</sup>、高兴国<sup>[17]</sup>等分别对地基 GPS 水汽和 MM5 模式三维气象场数据得到的积分水汽进行了比较。结果表明,MM5 模式积分水汽延时结果是可信的,具有较理想的精度。本文以 MM5 模式积分水汽为参考值,对 SWV

计算新方法的有效性进行验证,并对海上动态GPS斜路径水汽含量SWV的精度进行评价。

渤海湾MM5模式的网格设置为三重嵌套网格,其水平分辨率分别为27 km、9 km和3 km。在试验区域利用双线性插值方法,将3 km网格上的温度、气压、相对湿度等气象元素插值到1'的经纬度网格上,从而计算得出渤海湾的空间湿折射率场;进而采用移动窗口的切比雪夫拟合法,内插得到更高分辨率的湿折射率场<sup>[17]</sup>。为了更加准确地评估海上动态SWV的精度,减少MM5模式三维气象场数据插值误差的影响,本文选取航线上相对于GPS接收机的东西方向(方位角Azi为90°或270°)和南北方向(方位角Azi为0°或180°)的卫星,分别采用上述两种方法提取这些卫星信号的GPS斜路径水汽含量SWV,并与MM5模式积分水汽进行对比。将上述SWV值按照卫星高度角升序排列,如图1所示。图1中横轴表示SWV数据检查点的序号,“ZD”表示传统的“非差残差法”,“SD”表示顾及星间单差残差的SWV提取新方法。

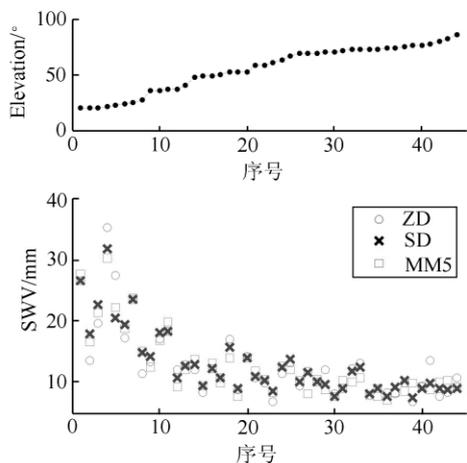


图1 两种方法计算的SWV和MM5模式积分水汽的对比

Fig. 1 Comparison of SWV Estimated from Two Methods and MM5 Integral Water Vapor

图1的上半部分为卫星高度角的变化,卫星高度角最小值为19.920°、最大值为86.388°;图1的下半部分为3种方式得到的SWV值。由图1可知,基于PPP技术的海上动态GPS斜向水汽含量SWV与MM5模式积分水汽结果基本一致,且新方法计算的SWV值更加接近于MM5模式积分水汽,改进算法的效果比较明显。同时,卫星高度角越小,SWV值越大,改进算法的效果也越明显。这是由于低高度角时卫星信号在对流层传播的距离增加,从而导致水汽含量的增大,同

时投影函数的模型误差在低高度角时也增大了,SWV值的精度随之降低。

以MM5模式积分水汽为参考值,分别计算两种方法得到的PPP斜路径水汽含量SWV的偏差,按照卫星高度角的升序排列,结果如图2所示。

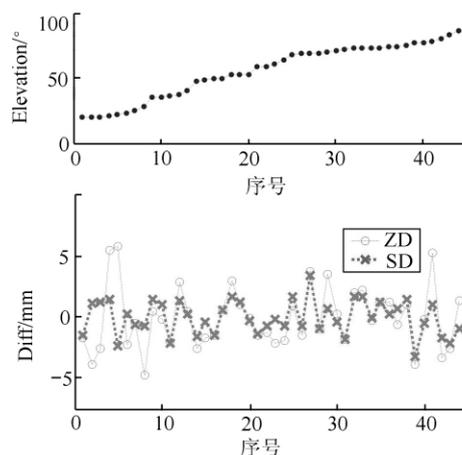


图2 两种方法计算的SWV偏差比较

Fig. 2 Difference of SWV Estimated from Two Methods

图2结果进一步表明新方法计算的PPP/SWV偏差较小,结果也更加稳定,特别是在低高度角时,改善较为明显。其原因主要是PPP验后相位残差中包含了低高度角映射函数模型误差、多路径效应等对水汽的影响。图3给出了PRN11和PRN17卫星的高度角和PPP相位残差随历元时间的变化,由此可见,随着卫星高度角的降低,投影函数和多路径等因素引起的误差也增加,相位残差值也相应地增大。通过上述改进,正好弥补了低高度角时投影函数和多路径效应等未模型化误差对水汽反演结果的影响,也避免了接收机钟差残差等系统性影响。

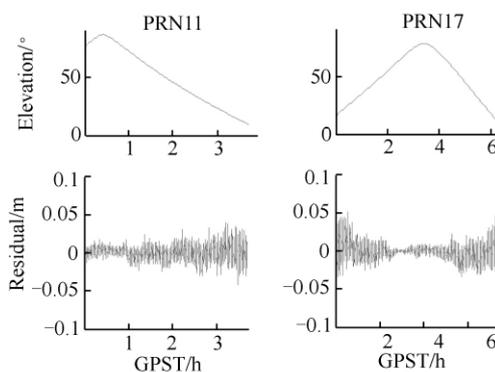


图3 卫星高度角和相位残差随时间的变化

Fig. 3 Change of Phase Observation Residuals and Satellite Elevations

将上述PPP/SWV的偏差进行误差统计,如

表 1 所示。结果表明,相对于 MM5 模式积分水汽结果,采用新方法计算的 SWV 值的 RMS 为 1.2 mm,比传统“非差残差法”的 RMS 减小了 1 mm。新方法可进一步提高海上动态 SWV 的精度,为海洋上空水汽的三维层析研究提供更加精确的观测数据。

表 1 两种方法计算的 SWV 误差统计/mm  
Tab.1 Error Statistics of SWV Estimated from Two Methods

	SWV/mm	
	ZD	SD
max	5.3	3.3
min	-3.7	-2.4
RMS	2.2	1.2

## 4 结 语

海洋水汽信息的连续、高精度监测,可为全球气候变化和天气系统演变研究提供基础数据,同时也是海洋灾害天气监测、防灾减灾等的重要手段。本文基于精密单点定位(PPP)技术,研究海上动态 GPS 斜路径水汽含量信息提取方法,提出了顾及星间单差残差的 SWV 提取方法,并利用渤海湾船载动态 GPS 水汽反演结果验证了新方法的有效性。结果表明,海上动态 GPS 信号斜路径水汽含量 SWV 的估算精度可以达到 mm 量级,与地基 GPS 水汽 SWV 的估算精度相当。相对于 MM5 模式积分水汽结果,采用本文提出的 SWV 提取方法,SWV 的偏差值均在  $\pm 3.5$  mm 以内,其 RMS 为 1.2 mm,相比传统的“非差残差法”,能够提高 1 mm 左右的 SWV 精度,改善效果明显。

## 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: 15 787-15 801
- [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] 李国平,黄丁发,刘碧全. 成都地区地基 GPS 观测网遥感大气可降水量的初步试验[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2006, 31 (12): 1086-1089
- [4] 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
- [5] Ware R, Alber C, Rocken C, et al. Sensing Integrated Water Vapor along GPS Ray Paths[J]. Geophys Res Lett, 1997, 24(4): 417-420
- [6] Alber C, Ware R, Rocken C, et al. Obtaining Single Path Phase Delays from GPS Double Differences [J]. Geophys Res Lett, 2000, 27: 2 661-2 664
- [7] 毕研盟,毛节泰,刘晓阳,等. 应用地基 GPS 遥感倾斜路径方向大气水汽总量[J]. 地球物理学报, 2006, 49 (2): 335-342
- [8] 张双成,刘经南,叶世榕,等. 顾及双差残差反演 GPS 信号方向的斜路径水汽含量[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2009, 34 (1): 100-104
- [9] Rocken C, Braun J, Vanhove T, et al. Developments in Ground-based GPS Meteorology[C]. International Workshop on GPS Meteorology, Japan, 2003
- [10] 宋淑丽,朱文耀,程宗颐,等. GPS 信号斜路径方向水汽含量的计算方法[J]. 天文学报,2004, 45 (3): 338-346
- [11] 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): 3 701-3 704
- [12] Rocken 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
- [13] Davis J, Elgered G, Niell A, et al. Ground-based Measurement of Gradients in the Wet Radio Refractivity of Air[J]. Radio Sci, 1993, 28(6): 1 003-1 018
- [14] Flores A, Ruffini G, Rius A. 4D Tropospheric Tomography Using GPS Slant Wet Delays[J]. Ann Geophysicae, 2000, 18: 223-234
- [15] 李建国,毛节泰,李成才,等. 使用全球定位系统遥感水汽分布原理和中国东部地区加权“平均温度”的回归分析[J]. 气象学报,1999,57(3):283-292
- [16] 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
- [17] 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):1 401-1 404

第一作者简介:范士杰,副教授,博士生,主要研究方向为 GPS 精密定位、GPS 气象学。  
E-mail:fshijie@upc.edu.cn

## Estimate of GPS Slant-path Water Vapor Based on Single-differenced Residuals Between Satellites

FAN Shijie<sup>1,2,3,4</sup> LIU Yanxiong<sup>1,2</sup> GAO Xingguo<sup>2</sup> FENG Yikai<sup>2</sup>

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 6 Xianxialing Road, Qingdao 266061, China)

(3 School of Geosciences, China University of Petroleum, 66 West Changjiang Road, Qingdao 266555, China)

(4 Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, 579 Qianwangang Road, Qingdao 266510, China)

**Abstract:** The estimate of marine kinematic GPS slant-path water vapor (SWV) is researched using Precise Point Positioning (PPP) technique in this paper. Based on the current study, this paper proposes a new method which takes into account the single difference residuals between satellites. The validity of this new method is verified by the comparison between the result of MM5 and that from the ship-borne kinematic GPS data. The result shows that the new method gives 1.2 mm RMS in SWV relative to MM5 result. That improves 1mm RMS in SWV compared to the current method.

**Key words:** precise point positioning; zero difference residuals; slant-path water vapor

**About the first author:** FAN Shijie, associate professor, Ph. D candidate, majors in GPS precise positioning and GPS meteorology.

E-mail: fshijie@upc.edu.cn

(上接第 833 页)

[8] 袁保伦,饶谷音,廖丹. 旋转式惯导系统的标度因数误差效应分析[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(2):160-164

[9] 吴富梅,杨元喜. 基于小波变换和序贯抗差估计的捷联惯导初始对准[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(7):58-63

[10] 温永智, 吴杰. 高轨飞行器精确导航的载波相位时间差分/捷联惯导紧组合算法[J]; 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(10):64-68

第一作者简介:覃方君, 讲师, 博士, 研究方向:船用惯性技术。  
E-mail:haig2005@126.com

## Analysis of Errors of Rotating Modulation INS Effected by Angular Motion of Vehicle

QIN Fangjun<sup>1</sup> LI An<sup>2</sup> XU Jiangning<sup>1</sup>

(1 Electrical Engineering and Information Engineering College, Naval University of Engineering, 717 Jiefang Road, Wuhan 430033, China)

(2 Office of Research and Development, Naval University of Engineering, 717 Jiefang Road, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Based on attitude error equations of typical dual-axis-index Inertial Navigation System(INS), influence of angular motion of vehicle is theoretically analyzed. The angular motion, coupled with scale factor and installation error, can deteriorate precision of INS, and produce a new type of error. Scale factor error leads to DC component, which is equivalent to un-compensable constant drift of gyroscope, and has great effect on INS. Installation error leads to AC component, which is equivalent to periodic oscillating drift of gyroscope, and has limited influence on INS. Results of experiment verifies the mentioned conclusions.

**Key words:** rotating modulation; inertial navigation; angular motion; errors

**About the first author:** QIN Fangjun, doctor, lecturer, majors in research of marine inertial technology application.

E-mail: haig2005@126.com