

综合 GPS 和 NCEP CFSv2 的区域 PWV 估计方法

王俊杰¹ 何秀凤¹

1 淮海大学地球科学与工程学院,江苏 南京,210098

摘 要:利用地基 GPS 估计 PWV(precipitable water vapor)时,除 GPS 观测数据外,GPS 测站地表的气温和气压也是必要参数。针对我国多数 GPS 网并未配备相应的气象传感器的情况,利用美国环境预报中心气候预报系统第 2 版提供的逐 6 h 产品,并顾及测站高程转换时的平均海平面高改正,提出一种 GPS 测站气象参数的插值新方法。以香港卫星定位参考站网实测 GPS 数据进行试验研究,结果表明,平均海平面高对地表气压的插值结果影响较大,而对地表气温的插值结果影响较小;经平均海平面高改正后,地表气压插值结果的平均均方根误差(RMSE)为 1.61 hPa,地表气温插值结果的平均 RMSE 为 1.93 K;由插值气象参数估计的 PWV 的平均 RMSE 为 2.76 mm,验证了所提方法的有效性。

关键词:GPS 气象学;NCEP CFSv2;PWV;平均海平面;插值

中图法分类号:P228 **文献标志码:**A

水汽是水分和热量传递的基质,是一个不稳定的气象参数,影响着辐射平衡、能量输送、云的形成和降水。自 1992 年实现用地基 GPS 遥感大气水汽以来^[1],其估计大气可降水量(precipitable water vapor, PWV)的精度不断得到改善和证实^[2-7]。除 GPS 数据之外,GPS 测站地表的气温和气压是估计 PWV 的必要参数^[8],1hPa 的气压误差将导致约 0.4 mm 的 PWV 估计误差^[9]。理想情况是在 GPS 天线处装备气象传感器,但这将增加约接收机价格 1/3~1/2 的成本^[10],而且我国多数 GPS 网建设时,并未配备相应的气象传感器。因此,当利用未装备气象传感器的 GPS 网进行区域 PWV 估计时,有必要寻求替代方法来获取 GPS 测站处的气象参数。

文献[9]讨论了利用美国国家环境预报中心(National Centers of Environmental Prediction, NCEP)等压面产品插值地表气压替代高精度气压计的可行性。Schueler 利用 NCEP GDAS(Global Data Assimilation System) 1°×1°的格网数据插值得到地表气象参数,证实了利用数值天气模型估算地表气象参数和大气水汽的可能性^[11]。Bai 等提出利用邻近的气象站插值获取

GPS 测站地表气象参数的方法,并基于澳大利亚自动气象站的地面气象数据进行插值,估计了无气象设备的 GPS 站的 PWV^[10]。Jade 等提出利用水平分辨率为 2.5°的 NCEP 再分析资料插值 GPS 测站地表气象数据,并结合印度 GPS 网估计了当地长达 4 a 的 PWV 序列^[8]。赵静旻等评估了中国地区 ERA-Interim 再分析资料提取气象参数和计算 GPS/PWV 所能达到的精度^[12]。常亮等利用 NCEP 再分析资料插值 GPS 测站地表气象数据,但未考虑测站位置处的平均海平面高影响,以大地高代替位势高推算 GPS 测站地表气象参数^[13]。根据法国空间局 CNES/CLS(Centre National d'Etudes Spatiales/Collecte Localisation Satellite)提供的最新全球平均海平面模型 MSS_CNES_CLS2011^[14],平均海平面高的变化范围约为-106~88 m,因此,忽略平均海平面高影响,将导致 GPS 测站气象参数的插值结果存在系统误差。

NCEP 开发的 CFSv2 是海-气-陆完全耦合的全球气候预报系统,采用先进的物理模型和更精确的初值,其数据自 2011 年起可用,CFSv2(climate forecast system version 2)提供每 6 h 的大

气、海洋和陆地表面的再分析产品,可用的水平分辨率有 0.2°、0.5°、1°和 2.5°,数据每日更新^[15]。MSS_CNES_CLS2011 模型由 16 a(1993~2008)的卫星测高数据计算得到,所有的卫星测高数据均经过海洋季节变化改正并移除了年际信号,模型地理覆盖范围 80°S~84°N,格网水平分辨率 2 min,95% 的模型误差小于 6 cm^[14]。本文基于 NCEP CFSv2 提供的水平分辨率为 0.5°的逐 6 h 产品,提出一种新的空间和时间插值方法,其中测站大地高采用 MSS_CNES_CLS2011 模型进行改正,得到香港地区 6 个连续运行参考站和 3 个 IGS 跟踪站的地表气压和气温,并估计 PWV。实验选取的各 GPS 测站均配备有气象传感器,通过对插值得到的气象参数和实测气象参数,以及由插值气象参数估计的 PWV 和实测气象参数估计的 PWV 进行比较,验证所提方法估计区域 PWV 的有效性和可靠性。

1 地基 GPS 估计 PWV 原理

GPS 信号在传播过程中会受到中性大气层和电离层的影响而产生延迟和弯曲。其中,电离层延迟部分可利用电离层的弥散特性通过双频接收机来消除^[16],中性大气层延迟可表示为^[1]:

$$T_D = 10^{-6} \int N_d ds + \int N_w ds = H_D + W_D \tag{1}$$

式中, N_d 、 N_w 分别为干、湿折射率指数; H_D 为静力学延迟; W_D 为湿延迟。通过映射函数,将大气延迟转换到天顶方向,则天顶总延迟 ZTD 为:

$$ZTD = ZHD + ZWD \tag{2}$$

式中,ZHD 为天顶静力学延迟;ZWD 为天顶湿延迟。

天顶总延迟 ZTD 可利用 GAMIT 等高精度 GPS 数据处理软件求解,天顶静力学延迟 ZHD 可通过 Saastamoinen 模型^[17]估计得到:

$$ZHD = (2.277\,9 \pm 0.002\,4) P_s / f(\Phi, h) \tag{3}$$

式中, P_s 为地表气压(hPa), $f(\Phi, h)$ 表示为:

$$f(\Phi, h) = 1 - 0.002\,66 \cos(2\Phi) - 0.000\,28h \tag{4}$$

式中, Φ 为地理纬度; h 为测站海拔高度(km)。再由式(2)可分离得到天顶湿延迟 ZWD,而 PWV 与 ZWD 成比例关系^[2]:

$$PWV = \Pi \times ZWD \tag{5}$$

$$\Pi = \frac{10^6}{(k_2' + k_3 / T_m) \rho R_v} \tag{6}$$

式中, Π 为转换系数; T_m 为大气加权平均温度; ρ 为液态水密度; k_2' 、 k_3 和 R_v 均为常数。

2 气象参数插值方法

2.1 数据描述

选取香港卫星定位参考站网的 6 个连续运行参考站 2014-07-02~22 日(DOY 183~203 日)的数据,进行区域 PWV 估计试验,参考站的分布如图 1 所示。收集各参考站的观测文件和气象文件,观测文件采样率为 5 s;气象文件每分钟记录一次温度、气压和相对湿度等数据。图 1 中的五角星为站号 45004 的探空站,从探空站得到的 PWV 将用于后面由插值气象参数估计的 PWV 比较。

为求解各参考站上的绝对 PWV,需引入一定数量的 IGS 基准站使网中存在大于 500 km 的基线^[8]。故选取 BJNM(北京)、IISC(班加罗尔)和 TWTF(桃园)等 3 个 IGS 跟踪站,其分布及相应地理范围的 MSS_CNES_CLS2011 模型平均海平面高如图 2 所示。从图 2 中可以看出,各跟踪站间的平均海平面高差异较大,其中 IISC 站具有最大的平均海平面高改正。

NCEP CFSv2 提供的每 6 h 的大气、海洋和陆地表面的再分析产品可免费获取。本文选取水平分辨率为 0.5°的“平均海平面层”的气压数据,及“地表或水面层”的温度和时不变位势高数据插值计算 GPS 测站的地表气压和气温,进而用于估计香港地区的 PWV。

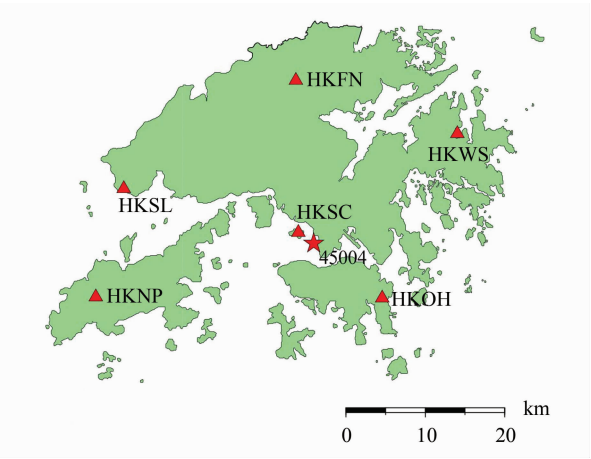


图 1 香港地区所选 GPS 站点及邻近探空站分布图
Fig.1 Distribution of the Selected GPS Sites and the Neighboring Radio Sounding Site in Hong Kong

2.2 气象参数插值方法

本文采用 NCEP CFSv2 提供的水平分辨率

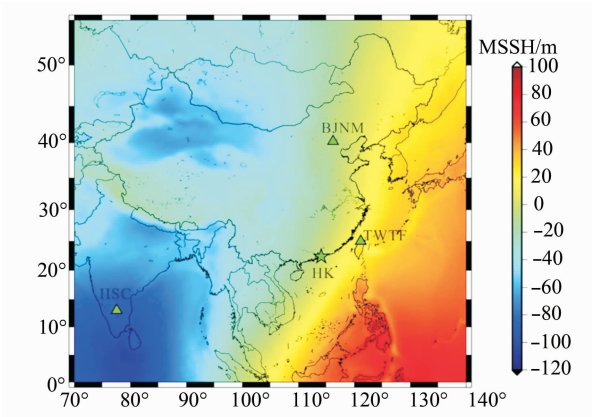


图 2 IGS 跟踪站的分布及 MSS_CNES_CLS2011 的平均海平面模型

Fig. 2 Distribution of the IGS Tracking Stations and the Mean Sea Surface of MSS_CNES_CLS2011

为 0.5° 的逐 6 h 的预报资料,并顾及测站高程转换时的平均海平面高改正,获取地表气象参数。如图 3 所示, $G_i(i=1,2,3,4)$ 表示 GPS 测站邻近的 4 个格点, $G'_i(i=1,2,3,4)$ 分别为对应格点在平均海平面上的投影, G'_0 为 GPS 测站在椭圆面上的投影。对于给定的 GPS 测站,均能根据其地理坐标和 CFSv2 的水平分辨率,找到其邻近的 4 个格点。

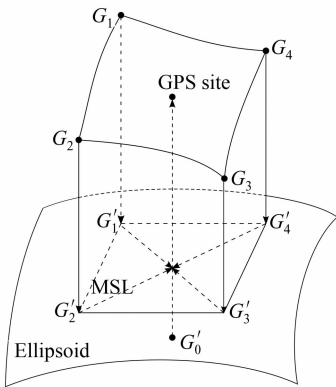


图 3 GPS 测站及其邻近格点的空间分布示意图

Fig. 3 Spatial Distribution of GPS Site and the Four Neighboring Grid Points

1) 格点气象参数转化。依据 Klein 等人提出的从任意位势高度到平均海平面 (mean sea level,MSL)的气象参数的转化关系^[18],将各格点 G_i 的气象参数转化到其在平均海平面上的投影点 G'_i 。由于仅气温参数不在平均海平面上,其转化关系为:

$$T_{\text{MSL}} = T_s + 0.006\ 5H \tag{7}$$

式中, H 为格点位势高度(m); T_s 和 T_{MSL} 分别为地表气温和平均海平面气温。

2) 水平插值。在平均海平面上,对 G'_i 构成的

区域采用反距离加权插值法 (inverse distance weighted,IDW) 获取 GPS 测站在平均海平面上投影点的气象参数:

$$\begin{cases} P'_{\text{GPS}} = \frac{\sum_{i=1}^4 (P'_i/d_i^2)}{\sum_{i=1}^4 (1/d_i^2)} \\ T'_{\text{GPS}} = \frac{\sum_{i=1}^4 (T'_i/d_i^2)}{\sum_{i=1}^4 (1/d_i^2)} \end{cases} \tag{8}$$

式中, d_i 表示 GPS 测站在平均海平面上的投影点到 G'_i 的距离; P'_i 和 T'_i 分别为 G'_i 的气压和气温。

3) 高程转换。类似上述水平插值方法,从 MSS_CNES_CLS2011 获取 GPS 测站处的平均海平面高 h_{mss} 。由于位势高的起算面为平均海水面,与大地高的差异主要为平均海平面高,忽略位势高与几何高度的微弱差异,则该点处的位势高为:

$$h = H_{\text{GPS}} - h_{\text{mss}} \tag{9}$$

式中, H_{GPS} 为测站大地高。

4) 测站气象参数转化。将 GPS 测站在平均海平面上的投影点的气象参数转化到其实际位置,转换关系为:

$$\begin{cases} P_{\text{GPS}} = P'_{\text{GPS}} (1 - 2.26 \times 10^{-5} h)^{5.225} \\ T_{\text{GPS}} = T'_{\text{GPS}} - 0.006\ 5h \end{cases} \tag{10}$$

5) 时间插值。以每个年积日为单位,时间分辨率取 10 min,采用三次样条插值法进行时间域上的插值。

3 试验结果与分析

3.1 气象参数插值结果比较

采用上述气象参数插值方法获得各测站的气象参数,并与气象传感器的实测记录进行比较。图 4 为 HKSC 站上气象参数插值结果和气象传感器实测结果的时间序列及两者的偏差,其他各站的情况与图 4 类似,为节约篇幅没有给出。进一步对各 GPS 测站上气象参数的插值结果与实测结果进行比较,计算两者的平均偏差(Bias)、均方根误差(RMSE)和标准差(Std),同时考察平均海平面高(mean sea surface height,MSSH)对气象参数的插值结果的影响,结果如表 1 所示。

从图 4 可以看出,插值得到的气象参数与气象传感器的实测记录基本一致,且地表气压的插值结果与实测结果符合效果较好,而地表气温与实测结果的偏差稍大。其原因可能是气温参数的转化关系比较简单,不能很好地刻划气温随高度变化的规律,此外,也不排除实测气温存在较大的观测误差。分析表 1 中经 MSSH 改正的插值结

表 1 平均海平面高改正前后各 GPS 测站气象参数插值结果与实测结果比较

Tab. 1 Comparison of the Interpolated Results and the Measured Results of Each GPS Site Before and After MSSH Correction

测站	MSSH/m	改正前地表气压/hPa			改正后地表气压/hPa			改正前地表气温/K			改正后地表气温/K		
		Bias	RMSE	Std	Bias	RMSE	Std	Bias	RMSE	Std	Bias	RMSE	Std
BJNM	-8.493	0.65	1.21	1.02	-0.35	1.08	1.02	-0.38	5.06	5.05	-0.40	5.06	5.05
IISC	-85.133	6.43	6.54	1.16	-2.88	3.10	1.15	-0.62	2.17	2.07	-0.79	2.38	2.07
TWTF	20.649	-3.57	3.66	0.80	-1.17	1.41	0.79	0.45	1.38	1.30	0.58	1.40	1.30
HKFN	-1.195	-0.11	0.89	0.88	-0.25	0.91	0.88	-0.54	1.82	1.74	-0.55	1.82	1.74
HKNP	-1.764	-2.47	2.61	0.85	-2.67	2.80	0.85	0.65	1.29	1.12	0.63	1.28	1.11
HKOH	-0.297	-1.60	1.81	0.85	-1.60	1.80	0.85	0.52	1.22	1.11	0.51	1.22	1.10
HKSC	-0.800	-0.35	0.94	0.88	-0.44	0.98	0.87	-0.43	1.52	1.46	-0.43	1.52	1.46
HKSL	-1.822	-0.76	1.16	0.87	-0.76	1.15	0.87	-0.28	1.32	1.29	-0.29	1.32	1.28
HKWS	-0.327	-0.74	1.14	0.86	-0.77	1.16	0.86	0.40	1.41	1.35	0.39	1.40	1.35

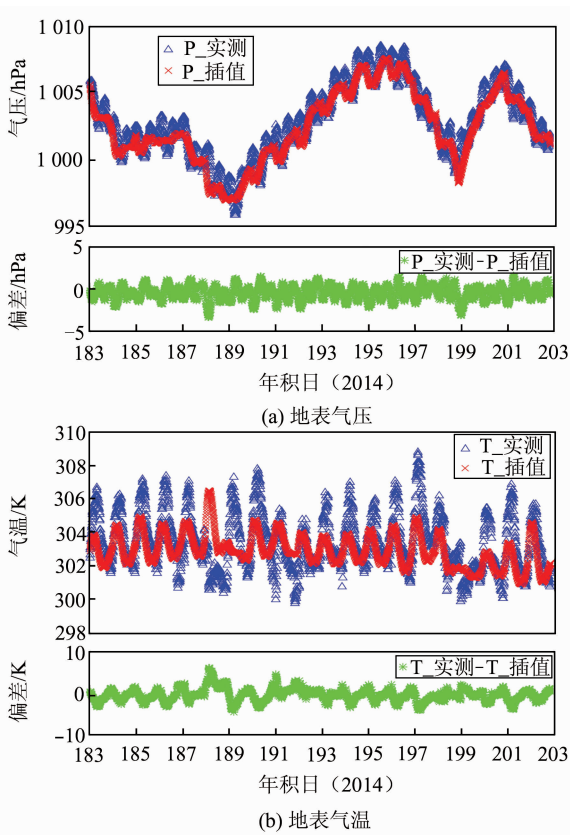


图 4 HKSC 站的地表气象参数插值结果和实测结果比较

Fig. 4 Comparison of the Interpolated Results and the Measured Results of HKSC's Surface Meteorological Data

果可知,地表气压插值结果的平均 RMSE 为 1.61 hPa,最大不超过 3.1 hPa,地表气温插值结果的平均 RMSE 为 1.93 K,最大在 5 K 左右,验证了气象参数的插值结果与实测结果基本一致的结论。

比较 MSSH 改正前后的地表气压可知, MSSH 的绝对值越大,对地表气压的插值结果的影响也越大,如 IISC 站的 MSSH 达-85.133 m,

改正后其地表气压的插值结果精度得到显著提高。而香港地区各站 的 MSSH 均在 2 m 以内, MSSH 改正后并没有明显改善地表气压插值结果的精度,个别测站甚至出现精度略微降低的情况,但仍保持在同一精度水平。相比而言, MSSH 绝对值的大小对于地表气温的影响甚微, MSSH 改正前后地表气温插值结果的精度基本一致,个别测站也出现精度略微降低的情况。其主要原因是气温转换关系为简单的一次函数,且其斜率较小对位势高的变化不敏感,而气压转换关系为指数函数,较好地反映了位势高变化的影响。

3.2 基于插值气象参数估计 PWV

为了验证利用插值气象参数估计的 PWV (PWV_Int)的可靠性,将其与利用气象传感器实测气象参数估计的 PWV(PWV_Obs)和探空资料估计的 PWV(PWV_RS)进行比较。基于最终精密星历,采用 GAMIT 10.5 估计各 GPS 测站的 PWV,其中 T_m 采用 Bevis 模型^[1] 计算。由图 1 可以看出, HKSC 站离探空站 45004 最近,故以 HKSC 站进行上述方案的比较,结果如图 5 所示。其中,194 日 UTC 0 时的探空数据缺失。其他各站仅进行 PWV_Int 与 PWV_Obs 的比较,平均偏差、均方根误差和标准差如表 2 所示。

表 2 各 GPS 测站 PWV_Int 精度统计/mm

Tab. 2 PWV_Int Accuracy Statistics of Each GPS Site/mm

测站	Bias	RMSE	Std
HKFN	-0.31	1.81	1.78
HKNP	-1.50	5.00	4.83
HKOH	-1.08	2.60	2.37
HKSC	-0.45	1.71	1.66
HKSL	-0.70	3.18	3.11
HKWS	-0.45	2.28	2.24

从图 5 可看出,由插值气象参数估计的 PWV 与由实测气象参数估计的 PWV 及探空资料估计的 PWV 趋势基本一致,且利用地基 GPS 获得的

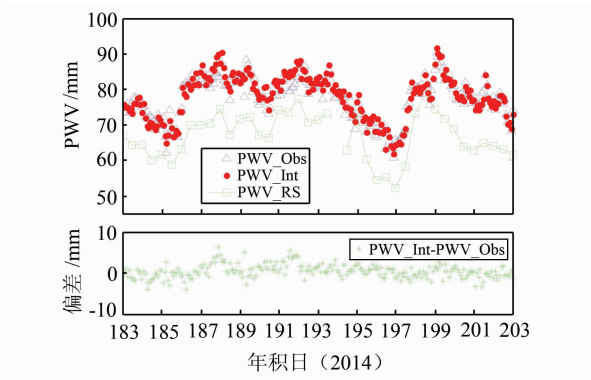


图 5 HKSC 站的 PWV 序列及偏差

Fig. 5 HKSC's PWV Time Series and the Bias Scatter Between the Interpolated and the Measured PWV

PWV 较探空资料获得的 PWV 具有更高的时间分辨率,表现了地基 GPS 遥感大气水汽的优越性;由于 HKSC 站与探空站的站址不同,且两者高程相差约 45 m,导致了 GPS 获得的 PWV 与探空 PWV 间存在一定偏差。综合图 5 和表 2 可知,由插值气象参数估计的 PWV 与由实测气象参数估计的 PWV 符合的较好,平均偏差在 1.5 mm 以内,平均 RMSE 为 2.76 mm,最大 RMSE 和 Std 不超过 5 mm,可见利用插值气象参数估计 PWV 是切实可行的。

4 结 语

地基 GPS 估计大气可降水量,具有准实时、全天候、高时间分辨率、高精度和低成本等优点。针对没有装备气象传感器的 GPS 网,本文基于 NCEP CFSv2 的再分析资料,提出了一种 GPS 测站气象参数插值新方法,并通过分析指出,在 GPS 测站高程转换时进行平均海平面高改正的必要性。以香港卫星定位参考站网实测 GPS 数据进行试验研究,得到了香港地区 2014-07-02~22 日 6 个 GPS 站间隔 2 h 的 PWV 时间序列。通过与实测气象参数估计的 PWV 序列及探空资料估计的 PWV 序列进行比较分析,由插值气象参数估计的 PWV 的平均 RMSE 为 2.76 mm,与由实测气象参数估计的 PWV 平均偏差在 1.5 mm 以内,验证了本方法估计区域 PWV 的有效性和可靠性。这表明即使 GPS 测站附近没有气象观测设备时,地基 GPS 遥感大气水汽同样能够获得较高精度的 PWV。

参 考 文 献

[1] Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS Me-

teorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1992, 97(D14): 15 787-15 801

[2] Bevis M, Businger S, Chiswell S, et al. GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33(3): 379-386

[3] 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(6): 830-838

[4] Rocken C, van Hove T, Ware R. Near Real-time GPS Sensing of Atmospheric Water Vapor [J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(24): 3 221-3 224

[5] Chen Yongqi, Liu Yanxiong, Wang Xiaoya, et al. GPS Real-time Estimation of Precipitable Water Vapor Hong Kong Experiences [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36(1): 9-12(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)

[6] Yuan Y B, Zhang K F, Rohm W, et al. Real-time Retrieval of Precipitable Water Vapor from GPS Precise Point Positioning [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2014, 119(16): 10 044-10 057

[7] Jiang P, Ye S R, Liu Y Y, et al. Near Real-time Water Vapor Tomography Using Ground-based GPS and Meteorological Data: Long-term Experiment in Hong Kong [J]. *Annales Geophysicae*, 2014, 32(8): 911-923

[8] Jade S, Vijayan M S M. GPS-based Atmospheric Precipitable Water Vapor Estimation Using Meteorological Parameters Interpolated from NCEP Global Reanalysis Data [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008, 113(D3): 309-327

[9] Quinn J K, Herring T A. GPS Atmospheric Water Vapor Measurements Without the Use of Local Barometers [J]. *Eos Trans AGU*, 1996, 77(46): 1 233-1 254

[10] Bai Z, Feng Y. GPS Water Vapor Estimation Using Interpolated Surface Meteorological Data from Australian Automatic Weather Stations [J]. *Journal of Global Positioning Systems*, 2003, 2(2): 83-89

[11] Schüller T. On Ground-based GPS Tropospheric Delay Estimation [D]. Neubiberg: University der Bundeswehr München, 2001

[12] Zhao Jingyang, Song Shuli, Zhu Wenyao. Accuracy Assessment of Applying ERA-Interim Reanalysis

Data to Calculate Ground-based GPS/PWV over China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(8): 935-939(赵静旸, 宋淑丽, 朱文耀. ERA-Interim 应用于中国地区地基 GPS/PWV 计算的精度评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(8): 935-939)

[13] Chang Liang, He Xiufeng. Regional Precipitation Forecast Using GPS and NCEP[J]. *Scientia Sinica Phys, Mech & Astron*, 2010, 40(5): 685-692(常亮, 何秀凤. 综合 GPS 和 NCEP 在区域降雨预报中的应用研究[J]. 中国科学(物理学,力学,天文学), 2010, 40(5): 685-692)

[14] Schaeffer P, Faugere Y, Legeais J F, et al. The CNES_CLS11 Global Mean Sea Surface Computed from 16 Years of Satellite Altimeter Data[J]. *Marine Geodesy*, 2012, 35(sup1): 3-19

[15] Saha S, Moorthi S, Wu X, et al. The NCEP Climate Forecast System Version 2 [J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(6): 2 185-2 208

[16] Brunner F K, Gu M. An Improved Model for the Dual Frequency Ionospheric Correction of GPS Observations[J]. *Manuscripta Geodaetica*, 1991, 16(3): 205-214

[17] Saastamoinen J. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites[J]. *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, 1972: 247-251

[18] Klein- Baltink H, Derks H J P, van Lammeren A, et al. Water Vapour from GPS Tropospheric Delay Estimates[J]. *GPS Water Vapour Meteorology, Beleids Commissie Remote Sensing (BCRS)*, 1999(3): 3-11

Regional PWV Estimation Using GPS and NCEP CFSv2

WANG Junjie¹ HE Xiufeng¹

1 School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

Abstract: Site-specific surface meteorological data are essential to derive the precipitable water vapor (PWV) using ground-based GPS. However, many GPS networks lack co-located sensors which can be used to obtain these meteorological variables. This paper proposes a method, which involves the interpolation of surface pressure and temperature fields obtained from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly products to derive these site-specific meteorological data. In addition, the significance of ellipsoid-MSL height bias correction on the meteorological data was tested by considering mean sea surface height (MSSH) in our estimation. Based on Hong Kong Satellite Positioning Reference Station Network (SatRef), the method is tested and the results indicate that, the MSSH has a significant influence on the interpolated surface pressure, while less influence on the interpolated surface temperature. The average RMSE of the interpolated surface pressure and temperature are 1.61hPa and 1.93K after the MSSH correction, respectively. The estimated PWV yields an RMSE of 2.76mm, demonstrating the effectiveness of the proposed method.

Key words: GPS meteorology; NCEP CFSv2; PWV; mean sea surface; interpolation

First author: WANG Junjie, PhD candidate, specializes in satellite navigation and positioning and GPS meteorology. E-mail: junjie.wang@hhu.edu.cn

Corresponding author: HE Xiufeng, PhD, professor. E-mail: xfhe@hhu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41274017, 40974001; the Graduate Student Research and Innovation Program of Jiangsu Province, No. KYLX15_0532; the Basic Research Funds for the Central Universities, No. 2015B42114.