

邹海波, 易雪婷, 单九生, 等, 2017. 概略坐标对 GPS PWV 解算的影响[J]. 气象, 43(12):1547-1553.

概略坐标对 GPS PWV 解算的影响^{*}

邹海波^{1,2} 易雪婷¹ 单九生¹ 喻迎春¹

1 江西省气象灾害应急预警中心, 南昌 330096

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

提 要: 利用 GAMIT 10.6 和 2016 年第 101 天至第 160 天南昌站的 GPS 观测资料, 开展了 13 组概略坐标变化对 GPS PWV 解算的影响研究试验(南昌站概略坐标设置以 10 m 等间距从 0~120 m 逐渐向西偏移真实坐标)。其结果发现: 当概略坐标与实际坐标偏离在 60 m 以内时, 概略坐标的变化对 GPS PWV 的解算影响不大(长基线的相对误差和均方根残差 NRMS 分别维持在 5.7×10^{-9} 和 0.24 附近); 但当概略坐标与真实坐标偏离超过 60 m 后, 概略坐标的变化对 GPS PWV 的解算有着显著的影响, 其中基线相对误差和 GPS PWV 与探空 PWV 的标准偏差随概略坐标偏离的增加而快速增大, NRMS 和 GPS PWV 与探空 PWV 的相关系数也有明显的增加和减小, GPS PWV 的成功解算日数则随概略坐标偏离的增加而快速减小(当偏离 ≥ 120 m 时南昌无 GPS PWV 生成); 概略坐标变化对基线相对误差、GPS PWV 精度以及 GPS PWV 能否被成功解算的影响仅限于本站, 某站概略坐标的偏离不会对其他站 GPS PWV 解算造成明显的影响。

关键词: GPS PWV, 概略坐标, 基线相对误差, 均方根残差(NRMS)

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.12.010

The Effect of Approximate Coordinates on GPS PWV

ZOU Haibo^{1,2} YI Xueting¹ SHAN Jiusheng¹ YU Yingchun¹

1 Meteorological Disaster Emergency Warning Center of Jiangxi, Nanchang 330096

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: With the software of GAMIT 10.6 and the GPS observation data at Nanchang Station, a set of 13 tests about the influence of approximate coordinate on the solving of GPS PWV are carried out. The results show that when the distance between the approximate coordinate and actual coordinate is less than 60 m, the approximate coordinate has weak effect on GPS PWV. But when the distance exceeds 60 m, the variation of approximate coordinate significantly affects the solving of GPS PWV. The relative error of baseline and the standard deviation between GPS PWV and sounding PWV increase rapidly, while the days of successful solving GPS PWV decrease rapidly with the increasing of the distance (when the distance ≥ 120 m, the day is 0). Meanwhile, NRMS (normalized root mean square) and the correlation between GPS PWV and sounding PWV also has a significant decrease when the distance is more than 60 m. Additionally, the effects of variation of approximate coordinate on the relative error of baseline, NRMS, and the accuracy of GPS PWV only occur at local station.

Key words: GPS PWV, approximate coordinate, relative error of baseline, normalized root mean square (NRMS)

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506002), 灾害天气国家重点实验室开发课题(2016LASW-N11)和江西省科技厅项目(20171BBG70004)共同资助

2016 年 11 月 7 日收稿; 2017 年 7 月 18 日收修定稿

第一作者: 邹海波, 主要从事 GPS/MET 水汽反演和大气环流诊断分析. Email: zouhaibobo@sohu.com

引言

大气中的水汽在降水过程的形成和演变中起着至关重要的作用(王宇虹等,2015;王佳津等,2015;苗长明等,2015)。近年来,GPS(Global Position System)遥感技术提供了一种高时间分辨率和高精度的水汽信息解算方法,其解算思路为:GPS 卫星发射的无线电信号穿越大气层时,受大气折射的影响,卫星信号到达接收机处时会产生延迟现象(到达时间变晚)。由于大气折射率与大气水汽信息密切相关,则通过测量卫星的这一延迟信号便可反算出天顶大气含水量(Bevis et al, 1992)和斜路径大气含水量(万蓉等,2015)。随着这一技术的不断发展, GPS 天顶大气含水量 PWV (Precipitable Water Vapor) 不仅被广泛地应用于水汽(陈小雷等,2007;邹海波等,2010)、台风(丁金才等,2004)、暴雨(姚建群等,2005;楚艳丽等,2007;郝丽萍等,2013;张家国等,2013;刘晶和杨莲梅,2017)等监测业务和研究中,还被广泛地应用于数值模拟业务和研究中(Smith et al,2000;Benjamin et al,2010;李红莉等,2010;顾莹等,2010;陈敏等,2010;张晶等,2014;朱丰等,2014)。此外, GPS PWV 资料还被用于检验探空湿度探测仪的精度(梁宏等,2012)和修正太阳光度计 PWV 反演模式参数(毕研盟等,2011)。可见, GPS PWV 的精度在气象业务与科研中的重要性。

在 GPS PWV 的解算过程中,需要先解算出测站上空的天顶总延迟(zenith total delay, ZTD),而 ZTD 的解算又依赖于测站的精确定位。卫星导航定位主要用伪距测量来实现,其原理为:测站(卫星接收机)的经度、纬度和高度三个未知数,加上测站时钟与导航系统基准钟的钟差共四个未知数,在测站(接收机)同时收到 4 颗或以上的卫星信号的前提下(保证方程组能闭合有解),基于事先给出的概略坐标——早期卫星导航接收机也需要输入概略坐标(张守信,2001),最后再利用迭代法求解方程组,便可获得测站的精确位置(朱喜明和王存良,2004)。

上述研究表明, GPS PWV 精度依赖于测站的定位,而测站的定位又与测站的概略坐标密切相关。那么测站的概略坐标对 GPS PWV 的解算有何影响?为了弄清楚这一问题,本文将利用同时拥有 GPS 监测和探空探测的江西南昌站的相关观测资料,运用 GAMIT 软件开展南昌站概略坐标变化对

GPS PWV 解算的敏感性试验,找出概略坐标对 GPS PWV 解算的影响规律,为提升 GPS PWV 的解算精度提供科学参考。

1 资料来源与 GPS PWV 的处理方法

1.1 资料来源

本文所用的资料包含:时间分辨率为 30 s 一次的南昌地基 GPS 监测资料、每日 2 次(00 时和 12 时,世界时下同)南昌探空资料、逐时南昌地面气象观测资料、30 s 一次的长基线[中国拉萨(LHAZ)、蒙古乌兰巴托(ULAB)、菲律宾奎松市(PIMO)和泰国曼谷(CUSV)四个站,见图 1]GPS 监测资料以及精密星历文件。其中南昌地基 GPS 监测资料、南昌探空站资料和南昌地面气象观测资料(用于 GPS PWV 反演中气象文件的制作)均来源于江西省气象信息中心,4 个长基线国际 IGS 跟踪站资料和精密星历文件来源于 <http://igs.cb.jpl.nasa.gov/>。以上资料时间长度均为 2016 年 4 月 10 日(第 101 天)至 8 月 8 日(第 160 天)。

1.2 GPS PWV 的处理方法

目前高精度的 GPS 资料处理软件主要有美国麻省理工学院(MIT)开发的 GAMIT 软件、瑞士伯尔大学开发的 Bernese 软件以及美国喷气推进试验室开发的 GIPSY 软件。但由于 GAMIT 软件拥有开源、高精度、高速度等特点,目前已经被广泛地应

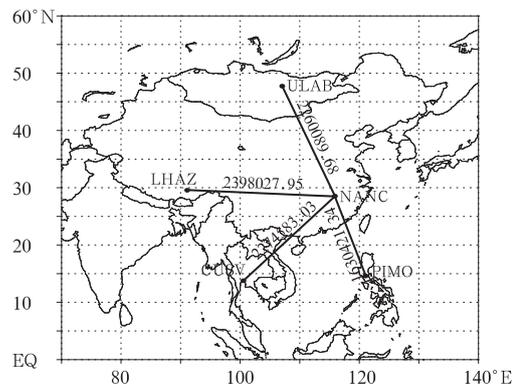


图 1 南昌(NANC)站和四个 IGS 国家跟踪站的分布

(数字表示相应两站的基线长度,单位:m)

Fig. 1 Distribution of Nanchang GPS Station and four IGS GPS stations

(Digit indicates the length of baseline, unit: m)

用在 GPS PWV 解算中(Dixon et al, 1991;梁伟锋, 2002;邹海波等,2013)。因此,本文选用 2015 年 6 月发布的 GAMIT 10.6 软件来处理 GPS 观测资料,但在利用 GAMIT 对 GPS 监测资料进行解算时,监测资料的时间序列需要达到一定的长度(一般不少于 12 h)。而南昌地基 GPS 监测资料单个观测文件的时间序列长度仅为 1 h,故在解算之前需要对其进行合并处理,本文采用美国卫星导航系统与地壳形变观测研究大学联合研发的 TEQC(translation, editing and quality checking)软件对其先进行质量控制再进行合并处理,最终形成一个时间序列为 24 h(00—23 时)的观测文件。此外,在解算过程中还加入了 LHAZ、ULAB、PIMO 和 CUSV 四个长基线站的观测资料,以及赣州和上饶两个局地 GPS 观测站资料。

2 试验设置

为了研究概略坐标变化对 GPS PWV 的影响,针对同时拥有探空和 GPS 监测的南昌站,本文共设计了 13 组试验,1 组控制性试验(CTR)和 12 组敏

感性试验(SES)。其中,CTR 试验中南昌站的概略坐标选用江西省 GPS/MET 水汽解算系统输出的 2016 年 5 月南昌站经纬度的平均值(可视为南昌站的真实经纬度),12 组 SES 试验中南昌站概略坐标的纬度与 CTR 保持一致(均为 28.4288°N),但经度则以 10 m 等间隔逐渐向西偏移,概略坐标设置详见表 1。此外,在这 13 组试验中其他参数设置均是相同的,其中解(Choice of Experiment)采用松弛解(relax),分析类型(Type of Analysis)选用 1-ITER,观测(Choice of Observable)选用 LC_HELP,卫星最小高度角(Elevation Cutoff)设置为 15°,大气参数 Interval zen=1(生成 GPS PWV 数据的时间分辨率为 1 h 一次),固体潮改正(Etide model)为 IERS03,天顶静力延迟模型采用改善后的 Hopfield 模型(邹海波等,2013),南昌、赣州和上饶三站的坐标约束 COORD. CONSTR 均设置为“99.99 99.99 99.99”,CUSV 和 ULAB 的坐标约束 COORD. CONSTR 设置为“0.1 0.1 0.1”,LHAZ 的坐标约束 COORD. CONSTR 设置为“1.0 1.0 1.0”,PIMO 的坐标约束 COORD. CONSTR 设置为“0.05 0.05 0.05”,所有测站的 FIX 设置为 NNN。

表 1 各组试验概略坐标信息

Table 1 The approximate coordinates of all tests

试验名称	经度/°E	偏离真实点的距离/m	试验名称	经度/°E	偏离真实点的距离/m
CTR	115.90138	0	SES7	115.90067	70
SES1	115.90128	10	SES8	115.90057	80
SES2	115.90118	20	SES9	115.90046	90
SES3	115.90108	30	SES10	115.90036	100
SES4	115.90097	40	SES11	115.90026	110
SES5	115.90087	50	SES12	115.90016	120
SES6	115.90077	60			

3 结果分析

对于 GPS 资料的解算精度和可靠性一般采用基线相对误差(基线重复率)、均方根残差(NRMS)和 GPS PWV 三个指标进行分析。

3.1 基线相对误差

基线相对误差是衡量 GPS 定位和数据处理质量的重要指标之一(Dixon et al, 1991;刘经南和葛茂荣,1995;梁伟锋,2002),它反映了观测时段内观测数据的离散程度(受观测资料质量、起算数据偏差

等影响),高质量的 GPS 处理过程中基线相对误差较小,GAMIT 软件解算的长基线(1000 km)的基线相对误差量级应该为 10^{-9} (Dixon et al,1991;刘经南和葛茂荣,1995)。基线相对误差计算公式为:

$$R = \sqrt{\frac{\frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(Y_i - Y)^2}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}}} \quad (1)$$

式中, n 为同一基线总观测时段数, Y_i 为 i 时段解的基线在 x 、 y 和 z 方向分量或边长, σ_i^2 为 Y_i 的方差, Y 为 Y_i 的加权平均值,其计算公式为:

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i / \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^n 1 / \sigma_i^2} \quad (2)$$

南昌站至各 IGS 跟踪站的基线长度(图 1)显示,南昌站至拉萨站的基线最长,为 2398027.95 m。因此,本文选用南昌至拉萨的基线相对误差对各组试验的 GPS 的处理结果进行分析。各组试验 2016 年第 101 天至第 160 天平均的南昌至拉萨的基线相对误差(图 2)显示,CTR 试验(南昌站概略坐标偏离真实点的距离为 0 m)的相对误差为 5.7×10^{-9} ,与刘经南和葛茂荣(1995)及李毓麟等(1996)的精度相当,完全满足 GPS 精度定位的要求。从图 2 还可以看出,在南昌概略坐标偏离实际坐标 60 m 以内时,基线相对误差一致维持在 5.7×10^{-9} ,但当概略坐标偏离实际坐标 ≥ 70 m 以后,基线相对误差快速增大,当概略坐标的偏离程度达到 80 m 时,基线相对误差为 1.2×10^{-8} ,当概略坐标的偏离程度达到 90 m 时,基线相对误差超过了 2.0×10^{-8} ,超过了短基线(< 500 km)站一般的误差(李毓麟等,1996),当概略坐标与实际坐标偏离到达 120 m 时,基线相对误差剧增加至 2.0×10^{-7} 以上,这完全不满足 GPS 精度定位的要求。图 2 还显示,无论南昌站概略坐标如何变化,赣州至拉萨基线的相对误差始终保持一个固定值(5.7×10^{-9})附近,其他站至拉萨的基线相对误差也有类似的结果,这表明 GAMIT 软件处理 GPS 数据时某一站的概略坐标变化不会对其他站的定位产生明显的影响。

3.2 均方根残差

均方根残差(normalized root mean square,

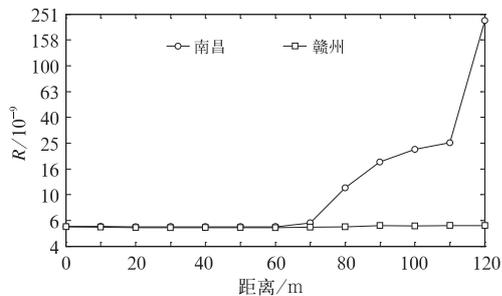


图 2 各组试验南昌至拉萨和赣州至拉萨的基线相对误差演变情况

Fig. 2 Evolution of the relative error of baseline from Nanchang to Lhasa, and from Ganzhou to Lhasa in each test

NRMS)是从历元的模糊度解算中得出的残差(Dong and Bock,1989),反映了时段解基线偏离其加权平均值的程度,也是衡量 GAMIT 解算结果的一个重要指标, NRMS 的值越低表明 GAMIT 的解算结果越好, NRMS 的值一般应小于 0.3。若 $NRMS > 0.5$ 则反映解算过程中未去除大周跳、某一相关参数解算有误或存在一系列的模式问题(Herring et al,2015)。

各组试验 2016 年第 101 天至第 160 天平均的 NRMS 演变(图 3)显示,当南昌站的概略坐标采用真实坐标时, GAMIT 解算结果(Q 文件)的 NRMS 为 0.215,这表明 GAMIT 的解算结果较为理想。与基线相对误差类似,南昌概略坐标偏离实际坐标 60 m 以内时, NRMS 一直维持在 0.215 附近。此后,随着南昌概略坐标与实际坐标偏离程度的继续增大, NRMS 也开始逐渐增大,当南昌概略坐标与实际坐标偏离达到 120 m 时, NRMS 为 0.24,仍然符合 GPS 数据的解算的标准(小于 0.3)。但事实上, NRMS 反映的是所有站 GPS 解算结果的整体效果,不仅受单站概略坐标精度的影响,还与较大误差概略坐标站数的比例有关,当参与解算的观测资料仅有拉萨(IGS 国际跟踪站)和南昌两站,且南昌的概略坐标与实际坐标偏离为 120 m 时(较大误差概略坐标站占 50%的比例), NRMS 超过了 0.6。

3.3 GPS PWV

获取高精度的 GPS PWV 是 GPS 数据解算的最终目标,为了评估各组试验对 GPS PWV 精度的影响,本文选用南昌站的探空 PWV 作为“观测值”进行对比分析。然而,探空探测中仅探测大气的温湿垂直剖面,而不探测 PWV, PWV 需要用以下公式

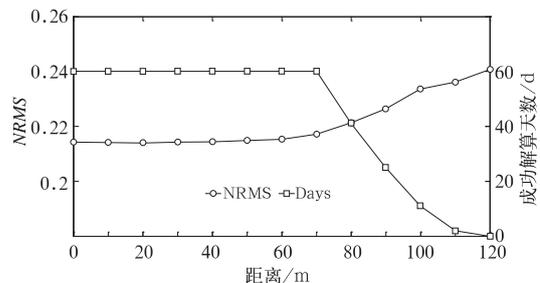


图 3 各组试验中均方根残差和南昌站 GPS PWV 成功解算天数的演变情况

Fig. 3 Evolution of NRMS and the days of successful solving GPS PWV at Nanchang Station in each test

计算得到:

$$PWV = - \frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_T} q dp \quad (3)$$

式中, P_T 为大气层顶的气压(本文设置为 100 hPa), P_s 为地面气压, $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 为地球重力加速度, 比湿 q 由以下公式计算得到。

$$q = \frac{0.622e}{p - 0.378e} \quad (4)$$

式中, 水汽压 e (单位: hPa) 可利用探空资料的露点温度和相应的饱和水汽压公式计算得到。

各组试验 00 时南昌站 GPS PWV 和探空 PWV 的相关系数和标准偏差(图 4)演变显示, 在 CTR 试验中 GPS PWV 与探空 PWV 的相关系数为 0.982, 标准偏差为 2.92; 在 12 个 SES 试验中, 相关系数(标准偏差)的演变与基线相对误差和 NRMS 的演变相似(相反), 即当南昌站的概略坐标与实际坐标偏离 $\geq 70 \text{ m}$ 后, GPS PWV 和探空 PWV 相关系数开始逐渐下降, 当概略坐标偏差为 100 m 时两者的相关系数下降至 0.965 以下; GPS PWV 和探空 PWV 的标准偏差快速上升, 当概略坐标偏差达到 100 m 时, 两者的标准偏差超过了 3.84。此外, 赣州站 GPS PWV 与探空 PWV 的相关系数和标准偏差在各组试验几乎保持不变, 这进一步表明了某站概略坐标的变化对其他站 GPS PWV 的解算没有明显的影响。

当南昌站概略坐标偏离实际坐标 70 m 后, 不仅 GPS PWV 和探空 PWV 的相关系数和标准偏差有着明显的变化, 而且南昌站 GPS PWV 的成功解算天数(即有 GPS PWV 资料生成)也有着显著的变化。在 2016 年第 101 天至第 160 天的 60 天里, 在概略坐标与实际坐标偏离不超过 70 m 时, 所有试

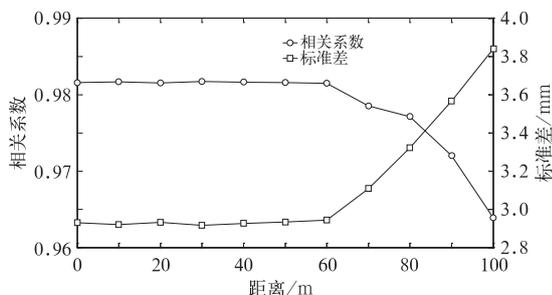


图 4 各组试验中南昌站 GPS PWV 与探空 PWV 的相关系数和标准偏差的演变情况
Fig. 4 Correlation and standard deviation between GPS PWV at Nanchang Station and sounding PWV in each test

验成功解算出南昌 GPS PWV 的日数均为 60 d(图 3)。但在南昌站概略坐标与实际坐标偏离 $> 70 \text{ m}$ 后, 南昌 GPS PWV 的成功解算日数急剧下降, 当偏离为 80 m 时, 在 60 天中仅有 40 天成功解算出了南昌 GPS PWV, 当偏离为 120 m 时, 60 天中无一日能解算出南昌 GPS PWV(图 3)。试验结果还显示(图略), 各组试验中赣州站成功解算 GPS PWV 的日数始终保持在 60 天。概略坐标的变化不仅影响南昌站 GPS PWV 的解算是否成功, 还影响 GPS PWV 的解算精度。图 5 为各组试验 2016 年 5 月 30 日 00 时南昌站 GPS PWV 的演变图, 从图 5 可以看出, 在 CTR 试验中南昌的 GPS PWV 值约为 61.3 mm, 与探空 PWV(60.5 mm)的偏差不足 1 mm, 很好地反映了大气中的真实水汽。在 SES 试验中, 南昌站的 GPS PWV 一直在 61.3 mm 附近, 但当南昌站概略坐标与真实坐标偏差 $\geq 100 \text{ m}$ 后, 南昌站的 GPS PWV 剧增至 70 mm 以上, 明显地大于探空 GPS PWV。与南昌站不同, 所有试验中赣州站的 GPS PWV 一直维持在 63.8 mm(探空为 65.3 mm)附近轻微波动(振幅不超过 0.4 mm)。

当概略坐标与实际坐标之间的距离大于一定值后, 解算的 GPS PWV 不仅会出现异常高的现象, 还会出现异常低的现象。如: 由于江西省高安 GPS 监测站的搬迁(搬迁距离约为 65 m), 而江西省 GPS/MET 水汽解算系统(基于 GAMIT 软件)未及时更新高安站的概略坐标, 解算的高安 GPS PWV 在 2016 年 2 月 18 日 19 时和 2016 年 3 月 5 日 12 时分别出现了一个异常大($> 30 \text{ mm}$)的和一个小($< 10 \text{ mm}$)的孤立中心, 其中心的 GPS PWV 值是周边地区的 2 倍(图 6a)和 0.3 倍(图 6b), 这是一个明显的 GSP PWV 解算错误, 且这个错误是由于较大的概略坐

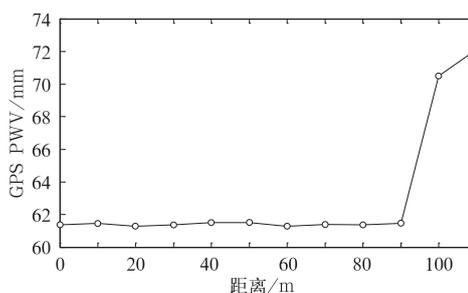


图 5 各组试验中 2016 年 5 月 30 日 00 时南昌站 GPS PWV 的演变情况
Fig. 5 The GPS PWV at Nanchang Station in each test at 00:00 UTC 30 May 2016

标误差造成天顶总延迟的偏强(较周边高约85 mm)和偏弱(较周边低约 120 mm)所致。更新高安站概

略坐标后,江西省 GPS/MET 水汽解算系统成功地解决了高安站 GPS PWV 解算错误的问题(图 7)。

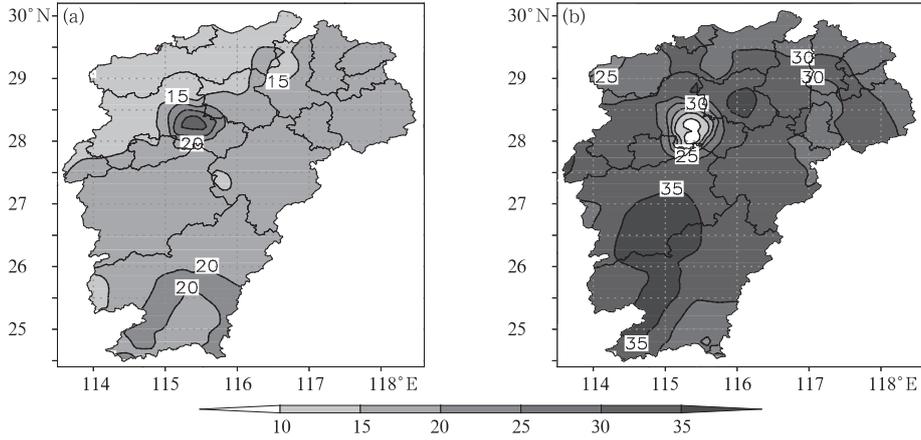


图 6 2016 年(a)2月18日19时,(b)3月5日12时未更新高安站概略坐标前江西省 GPS/MET 水汽解算系统解算的江西省 GPS PWV (单位:mm)

Fig. 6 Distribution of GPS PWV (unit: mm) solved by old approximately coordinates of Gao'an at (a) 19:00 UTC 18 February and (b) 12:00 UTC 5 March 2016

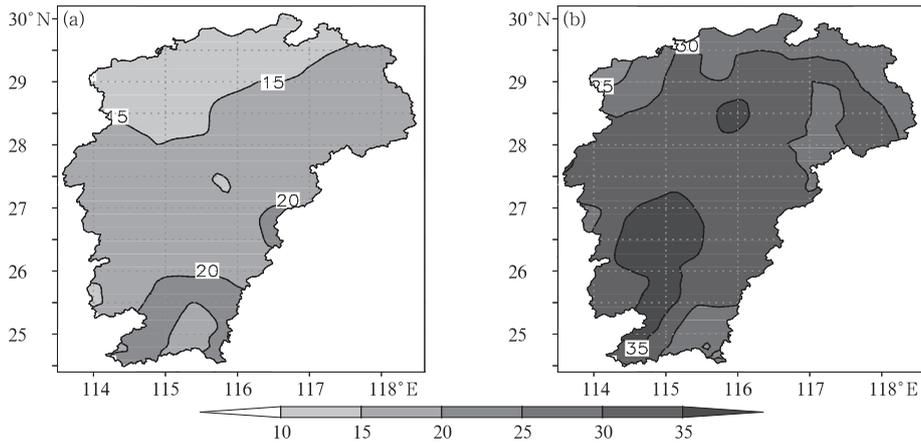


图 7 同图 6, 但为更新高安站概略坐标后

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for improved approximate coordinate of Gao'an Station

4 结 论

在 GPS 水汽解算过程中,针对概略坐标精度对 GPS PWV 的影响,本文利用 GMAIT 10.6 和 2016 年第 101 天至第 160 天南昌站 GPS 观测资料,开展了 1 组控制性 CTR(南昌站概略坐标为真实坐标)试验和 12 组敏感性 SES(南昌站概略坐标经度以 10 m 等间隔逐渐向西偏移)试验,对试验结果分析发现:

(1) 当概略坐标与实际坐标的偏离在 60 m 以内时,概略坐标对基线的相对误差影响不大,南昌至

拉萨的基线相对误差为 5.7×10^{-9} 。但当偏离 ≥ 70 m 以后,基线的相对误差快速增大,在偏离为 90 m 时,基线相对误差超过了 2.0×10^{-8} ,偏离为 120 m 时,基线相对误差超过了 2.0×10^{-7} 。

(2) 当概略坐标偏离实际坐标 60 m 以内时,均方根残差(NRMS)一直维持在 0.215。随着概略坐标的进一步偏离,NRMS 也开始逐渐增大,当概略坐标与实际坐标偏离达到 120 m 时,NRMS 为 0.24,且 NRMS 的变化不仅受单站概略坐标精度的影响,还与较大误差概略坐标站数的比例有关,较大误差概略坐标站数的比例占 50%时,概略坐标与实际坐标偏离为 120 m 后,NRMS 会超过 0.6。

(3) 与基线相对误差和 NRMS 相似,在概略坐标与实际坐标的偏离 ≤ 60 m 时, GPS PWV 与探空 PWV 的相关系数和标准偏差一直维持一个固定值附近,但当偏离 ≥ 70 m 以后,相关系数(标准偏差)开始下降(上升),其中标准偏差上升较快,当概略坐标偏差从 60 m 上升至 100 m 时, GPS PWV 与探空 PWV 的标准偏差从 2.92 mm 上升至 3.84 mm。

(4) 概略坐标的变化不仅对基线相对误差、NRMS 和 GPS PWV 精度有明显的影响,还影响着 GPS PWV 能否被顺利解算。当概略坐标与实际坐标偏离 ≤ 70 m 时,南昌站 GPS PWV 成功解算的日数均为 60 天,当偏离 > 70 m 后,南昌 GPS PWV 成功解算的日数急剧下降,偏离为 80 m 时,在 60 天中仅有 40 天被成功解算,当偏离为 120 m 时,60 天中无 1 天能解算出 GPS PWV。

(5) 概略坐标变化对基线相对误差、GPS PWV 精度以及 GPS PWV 能否被成功解算的影响仅限于本站,某站概略坐标的偏移不会对其他站的基线相对误差和 GPS PWV 精度造成明显影响。

参考文献

- 毕研盟,杨忠东,李元,2011.应用全球定位系统、太阳光度计和探空仪探测大气水汽总量的对比分析[J].气象学报,69(3):528-533.
- 陈敏,范水勇,仲跻芹,等,2010.全球定位系统的可降水量资料在北京地区快速更新循环系统中的同化试验[J].气象学报,68(4):450-463.
- 陈小雷,景华,全美然,等,2007.地基 GPS 遥测大气可降水量在天气分析诊断中的应用[J].气象,33(6):19-24.
- 楚艳丽,郭英华,张朝林,等,2007.地基 GPS 水汽资料在北京“7·10”暴雨过程研究中的应用[J].气象,33(12):16-22.
- 丁金才,黄炎,叶其欣,等,2004.2002 年台风 Ramasan 影响华东沿海期间可降水量的 GPS 观测和分析[J].大气科学,28(4):613-624.
- 顾莹,日下博幸,束炯,等,2010.实时 GPS 可降水量资料的变分同化个例研究[J].气象科学,30(2):172-178.
- 郝丽萍,邓佳,李国平,等,2013.一次西南涡持续暴雨的 GPS 大气水汽总量特征[J].应用气象学报,24(2):230-239.
- 李红莉,万蓉,谢有才,2010.利用 LAPS 系统同化地基 GPS 水汽资料的应用研究[J].热带气象学报,26(6):702-709.
- 李毓麟,刘经南,葛茂荣,等,1996.中国国家 A 级 GPS 网的数据处理和精度评估[J].测绘学报,25(2):81-86.
- 梁宏,张人禾,刘晶森,2012.青藏高原大气水汽探测误差及其成因[J].气象学报,70(1):155-164.
- 梁伟锋,2002.华北 GPS 网 GAMIT 计算结果与 IGs 站选取的关系探讨[J].测绘工程,11(4):55-58.
- 刘晶,杨莲梅,2017.一次中亚低涡造成的天山北坡暴雨 GPS 大气水汽总量演变特征[J].气象,43(6):724-734.

- 刘经南,葛茂荣,1995. '92 中国 GPS 会战(A 级网)数据处理分析[J].武汉测绘科技大学学报,20(1):40-45.
- 苗长明,丁一汇,郭品文,等,2015.水汽输送与江南南部初夏雨季及降水变化的联系[J].气象学报,73(1):72-83.
- 万蓉,付志康,李武阶,等,2015.地基 GPS 斜路径水汽反演技术及资料应用初探[J].气象,41(4):447-455.
- 王佳津,王春学,陈朝平,等,2015.基于 HYSPLIT4 的一次四川盆地夏季暴雨水汽路径和源地分析[J].气象,41(11):1315-1327.
- 王宇虹,徐国强,贾丽红,等,2015.太行山对北京“7·21”特大暴雨的影响及水汽敏感性分析的数值研究[J].气象,41(4):389-400.
- 姚建群,丁金才,王坚捍,等,2005.用 GPS 可降水量资料对一次大暴雨过程的分析[J].气象,31(4):48-52.
- 张家国,黄小彦,周金莲,等,2013.一次梅雨锋上中尺度气旋波引发的特大暴雨过程分析[J].气象学报,71(2):228-238.
- 张晶,顾松山,楚志刚,等,2014. LAPS 同化 GPS/PWV 资料在暴雨预报中的应用研究[J].气象,40(1):76-85.
- 张守信,2001.外弹道测量与卫星轨道测量基础:第 2 版[M].北京:国防工业出版社:511.
- 朱丰,徐国强,李莉,等,2014.同化青藏高原地区 GPSPW 数据对长江中下游地区降水预报的影响评估[J].大气科学,38(1):171-189.
- 朱喜明,王存良,2004.卫星导航定位系统中用户机概略坐标算法及仿真[J].飞行器测控学报,23(3):60-62,94.
- 邹海波,单九生,吴珊珊,等,2010.利用 GAMIT 对江西省 GPS 可降水量的反演应用[J].气象与减灾研究,33(3):56-60.
- 邹海波,单九生,吴珊珊,等,2013. GPS 水汽反演方法的改善及其在台风暴雨中的应用[J].中山大学学报(自然科学版),52(6):17-25.
- Benjamin S G, Jamison B D, Moninger W R, et al, 2010. Relative short-range forecast impact from aircraft, profiler, radiosonde, VAD, GPS-PW, METAR, and mesonet observations via the RUC hourly assimilation cycle[J]. Mon Wea Rev, 138(4):1319-1343.
- Bevis M, Businger S, Herring T A, et al, 1992. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. J Geophys Res, 97(D14):15787-15801.
- Dixon T H, Gonzalez G, Lichten S M, et al, 1991. First epoch geodetic measurements with the global positioning system across the northern Caribbean plate boundary zone[J]. J Geophys Res, 96(B2):2397-2415.
- Dong Da'nan, Bock Y, 1989. Global positioning system network analysis with phase ambiguity resolution applied to crustal deformation studies in California[J]. J Geophys Res, 94(B4):3949-3966.
- Herring T A, King R W, Floyd M A, et al, 2015. GAMIT reference manual: GPS analysis at MIT[R]. Release 10.6. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
- Smith T L, Benjamin S G, Schwartz B E, et al, 2000. Using GPS-IPW in a 4-D data assimilation system[J]. Earth Planets Space, 52(11):921-926.