



# 动态环境下 PPP 的 GNSS 大气水汽反演

## 摘要

利用静态 PPP(精密单点定位)处理稳定的 GNSS 地面站可以高精度反演大气中的水汽含量.对于运动的载体,静态 PPP 无法正确地估计待估参数.利用动态 PPP 数据处理方法,在解算载体动态位置的同时,可以估计动态载体 GNSS 的天顶总延迟,并在此基础上计算水汽含量.分别利用 PPP 动态和静态模型解算 3.5 h 的稳定可靠 GNSS 参考站数据,结果表明,动态 PPP 与静态 PPP 利用稳定 CORS 站解算大气可降水量(PWV)时,最大差别为 6.6 mm,且水汽的变化趋势基本一致.在快速运动平台下,旋转平台解算的 PWV 与相同环境下的 CORS 站解算的水汽结果在量级上一致,但不能像 CORS 站结果一样可以反映出水汽的变化趋势.针对地震等 GNSS 台站失稳问题,分别利用动态、静态 PPP 进行水汽的提取,结果表明,地震的短期形变对 PPP 水汽的提取无明显影响.建议使用静态 PPP 对失稳 GNSS 台站进行水汽提取.

## 关键词

卫星导航定位;精密单点定位(PPP);大气可降水量(PWV)

中图分类号 P228.4

文献标志码 A

收稿日期 2021-01-12

资助项目 国家自然科学基金(41704024);宁波市公益类项目(20181JCGY020386);南京信息工程大学人才项目(2019r034)

## 作者简介

唐旭,男,博士,副教授,主要从事 GNSS 气象学、组合导航、GNSS 高精度导航定位等方面的研究工作.Xu.Tang@nuist.edu.cn

1 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 南京,210044

2 淄博市勘察测绘研究院有限公司,淄博, 255000

## 0 引言

GNSS 技术广泛地应用于导航、定位与高精度形变监测领域.在这些应用领域中,对流层延迟往往被作为误差通过各种手段予以改正,以提高定位的精度<sup>[1-2]</sup>.部分学者还利用数值气象模型作为约束条件,实现高精度 GNSS 定位能力<sup>[3]</sup>.不同于定位过程中将对流层信息作为一种误差源来处理,GNSS 气象学利用对流层对 GNSS 信号的延迟信息估计大气中的可降水量.利用 GNSS 技术可以高时空分辨率地提取大气中的水汽,进而用于分析极端气象条件中的水汽变化情况<sup>[4-5]</sup>.文献[6-7]利用 GPS 提取的水汽进行台风过程中的短时降水预报,它们所利用的 GNSS 数据来自地面稳定、可靠的参考站.但是地面点因地震、滑坡等自然灾害时常发生,参考站发生位移对 GNSS PWV(大气可降水量)的估计可能带来的影响值得研究;此外,适用于运动载体的 GNSS PWV 提取方法可以获取运动路径上的 PWV,有更好的应用前景.近年来,有部分学者利用移动载体上的 GNSS 设备估计载体运动路径上的 PWV,但与载体上搭载的大气红外探测仪结果相比,吻合度并不高,这主要是多路径误差造成的<sup>[8]</sup>.

前期研究表明,静态 PPP(精密单点定位)可以利用稳定的 GNSS 参考站估计可靠的 PWV,并和周边的探空气球结果有很强的一致性<sup>[4]</sup>.本文设计了动态实验平台,以静态 PPP 测的大气水汽作为参考,评估动态 PPP 在不同运动场景下 PWV 估计精度.

## 1 精密单点定位数学模型

动态 PPP 可以实时解算运动载体的位置,同时解算对流层的天顶总延迟,在此基础上利用 GNSS 天线周围的温度和气压传感器等可以实时估计出大气中的可降水量.为了避免电离层延迟对观测值的影响,通常使用基于双频的无电离层组合观测值作为 PPP 观测方程的观测值.无电离层组合的相位、伪距 PPP 观测方程为

$$\varphi_{IF} = \rho + (\Delta T + \Delta t) \cdot c + \delta_{orb} + N_{IF} \cdot \lambda_{IF} + \delta_{trop} + (B_{IF} + b_{IF}) \cdot \lambda + \xi_{\varphi_{IF}}, \quad (1)$$

$$P_{IF} = \rho + (\Delta T + \Delta t) \cdot c + \delta_{orb} + \delta_{trop} + (D_{IF} + d_{IF}) + \xi_{P_{IF}}. \quad (2)$$

式中: $\varphi_{IF}$ 和 $P_{IF}$ 分别表示双频接收机的无电离层组合载波相位观测值和伪距观测值,单位为 m; $\rho$ 为接收机与卫星之间的站星几何距,单位为 m; $\Delta T$ 和 $\Delta t$ 分别表示跟踪卫星及接收机的钟差,单位为 s; $c$ 表示

光在真空中的速度,单位为  $m/s$ ;  $\delta_{orb}$  为卫星的轨道误差,单位为  $m$ ;  $\delta_{trop}$  为对流层延迟,单位为  $m$ ;  $B_{IF}$  和  $b_{IF}$  分别表示卫星和接收机的非认证小数偏差的无电离层组合形式,这也是破坏相位整周模糊度的主要参数;  $D_{IF}$  和  $d_{IF}$  分别为卫星和接收机的码偏无电离层组合形式;  $\xi_{\varphi_{IF}}$  与  $\xi_{P_{IF}}$  分别表示无电离层组合载波相位、伪距观测值的随机噪声。

利用映射函数可以将每颗卫星的倾斜路径对流层延迟  $\delta_{trop}$  转换到天顶方向,倾斜路径对流层延迟量和天顶总延迟的关系式为

$$\delta_{trop} = M \cdot \delta_{ZTD}, \quad (3)$$

式中,  $M$  表示映射函数,  $\delta_{ZTD}$  表示对流层天顶方向总延迟。

式(1)与(2)中站星几何距  $\rho$  隐藏了未知参数接收机的位置信息,利用泰勒级数可以将此非线性方程进行展开.此外,未知参数还包括接收机的钟差、天顶湿延迟.未知参数的估计采用扩展卡尔曼滤波方法.假设有  $s$  颗可跟踪卫星,则卡尔曼滤波的状态向量可以写成:

$$\mathbf{X} = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z \quad \Delta t \quad \delta_{ZTD} \quad N_1 \quad \cdots \quad N_s]^T, \quad (4)$$

式中,待估参数  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  分别表示接收机的位置在 3 个坐标方向的改正量,  $\Delta t$  为接收机的钟差,  $N_1, \cdots, N_s$  表示  $s$  颗卫星的非差无电离层组合观测值.观测方程系数矩阵可以写为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 & 1 & M_1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ l_1 & m_1 & n_1 & 1 & M_1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ l_2 & m_2 & n_2 & 1 & M_2 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ l_2 & m_2 & n_2 & 1 & M_2 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_s & m_s & n_s & 1 & M_s & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ l_s & m_s & n_s & 1 & M_s & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中:  $l_s, m_s, n_s$  表示第  $s$  颗卫星与接收机间的单位几何向量;  $M_s$  表示第  $s$  颗卫星对应的对流层映射函数系数。

## 2 大气水汽反演

由 GNSS 精密单点定位静态、动态模型可以获得 GNSS 天线上方的天顶总延迟.天顶总延迟主要包含天顶湿延迟 (Zenith Wet Delay, ZWD) 和天顶干延迟 (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD).其中天顶湿延迟是随时间与天气状况变化的变量,主要由 GNSS 监测点的温度、气压和相对湿度决定.对流层天顶干

延迟可以由模型精确获得,精度可达  $mm$  级。

$$\delta_{ZHD} = \frac{0.0022768 \times e_{site}}{1 - 0.00266 \times \cos(2\beta) - 2.8 \times 10^{-7} \times h}, \quad (6)$$

式中:  $e_{site}$  为天线高处的大气压,单位为  $hPa$ ;  $\beta$  为天线位置的纬度分量;  $h$  为天线的大地高. GPS 天线处的气压和温度通常可以由预先安置的气象传感器获得.此外,对于一些 GPS 天线周边缺失温度、气压的测站,可以利用再分析资料通过反距离加权插值计算方法获取. GNSS 天线处的气温  $T_{site}$  为

$$T_{site} = \frac{\sum_{i=1}^4 \left( \frac{T_i}{d_i^2} \right)}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i^2}}, \quad (7)$$

式中:  $d_i$  为天线与其周边最近的再分析资料 4 个格网点之间的距离;  $T_i$  为每个格网点的温度.利用式(7)可以计算 GNSS 天线处的温度.以相同的方式,利用等距离加权插值方法可以获得天线处的平均海平面大气压。

由 GNSS 天线处的温度、平均海平面大气压可以计算出式(6)中天线处的大气压为

$$e_{site} = P_{MSL} \times \left( 1 - \frac{0.0065 \times h}{T_{site} - 0.0065 \times h + 273.15} \right)^{5.257}, \quad (8)$$

式中,  $P_{MSL}$  为 GNSS 天线处的平均海平面大气压。

NCEP 等再分析资料通常每 6 h 记录一次数据,利用一些常用的插值方法可以将 GNSS 天线处 6 h 时间间隔的温度、平均海平面大气压插值成和 GNSS 采样率一致的温度、平均海平面大气压时间序列。

利用动态 PPP 或静态 PPP 估计的  $\delta_{ZTD}$  以及式(6)计算的  $\delta_{ZHD}$ , 可以计算出 GNSS 天顶方向湿延迟,即  $\delta_{ZWD} = \delta_{ZTD} - \delta_{ZHD}$ . 由天顶湿延迟可以计算出大气中可降水量,表示为

$$y_{PWV} = \frac{10^5}{R_v \times \left( k_2 - k_1 \times \frac{m_v}{m_d} + \frac{k_3}{T_m} \right)} \cdot \delta_{ZWD}, \quad (9)$$

式中:  $y_{PWV}$  表示大气可降水量;  $R_v$  表示水汽的气体常数;  $k_1, k_2$  及  $k_3$  为大气折射常数;  $m_v$  以及  $m_d$  分别表示大气水汽与干空气的摩尔质量常数;  $T_m$  为加权平均湿度.相关的常量如表 1 所示。

## 3 静态、动态实验验证

因 GNSS 天线在某些环境下不可能处于完全稳

表1 水汽气体常数、大气折射常数、摩尔质量常数

Table 1 Gas constant of water vapor, atmospheric refractivity constants, and the molar mass constants of water vapor and dry air

参数	数值	单位
$R_v$	461	$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$
$k_1$	77.6	$K \cdot hPa^{-1}$
$k_2$	71.98	$K \cdot hPa^{-1}$
$k_3$	$3.754 \times 10^5$	$K^2 \cdot hPa^{-1}$
$m_v$	18.015 2	$g \cdot mol^{-1}$
$m_d$	28.964 4	$g \cdot mol^{-1}$

定的状态,如地震等情景下.有必要评估动态单点定位与静态单点定位在不同动态场景下气象参数的提取能力,提高 GNSS 数据的利用率和不同应用场景下 GNSS 气象参数监测能力.

为了评估 GNSS 动态 PPP 对大气水汽的探测精度,在相同的观测环境、相同的观测时段内分别采集 3.5 h 静态和动态数据.图 1a 为 CORS 站观测环境;图 1b 为动态旋转平台,GNSS 天线可以在旋转平台上做单径为 2 m 的顺时针或逆时针圆周运动.旋转平台与 CORS 测站相距约 10 m,两种观测情景所处的气象环境相似.数据采样率为 10 Hz.卫星截止高度角为  $5^\circ$ .卫星钟产品为利用高频 IGS 站跟踪站估计的 1 Hz 改正产品.轨道采用 15 min 采样间隔的 CODE 精密轨道产品.此外,数据处理中还要顾及地球自转、载波相位缠绕改正、相对论效应等.

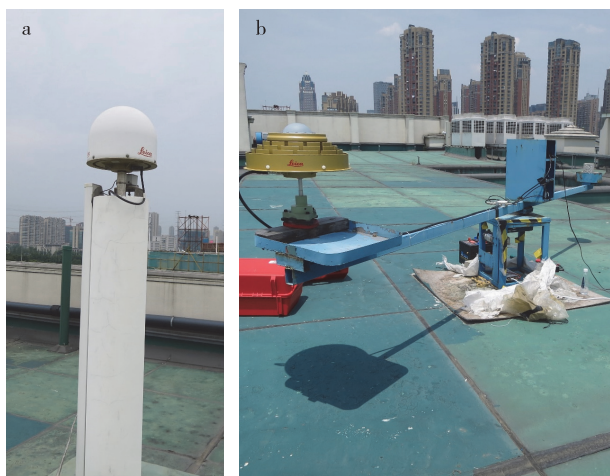


图1 GNSS 连续运行参考站(a),动态旋转平台(b)

Fig.1 GNSS continuously operating reference stations (a), and kinematic rotation armrig (b)

分别利用 PPP 静态与动态定位算法解算 GNSS CORS 站的静态 3.5 h 的观测数据,卫星截止高度角设为  $10^\circ$ ,绘制位置误差的时间序列.由图 2 可以

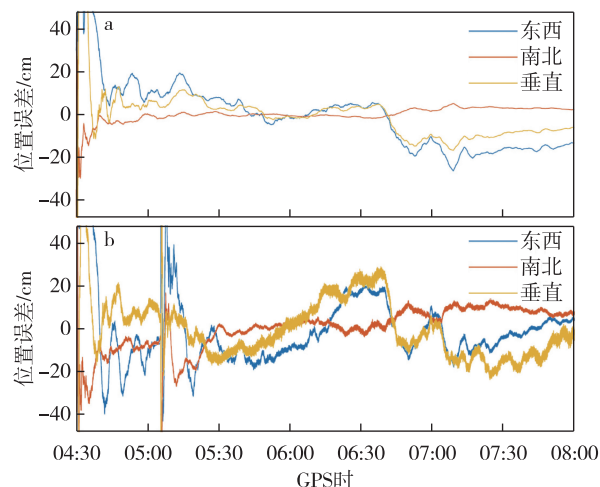


图2 GNSS CORS 站静态观测数据的 PPP 静态(a)与动态(b)定位时间序列

Fig.2 Static (a) and dynamic (b) PPP position time series for the GNSS CORS

看出静态、动态 PPP 都需要一定的时间进行收敛才可以得到比较稳定的定位结果.静态 PPP 的定位精度要明显好于动态 PPP 的结果.经过一段时间的收敛后静态 PPP 的定位精度能保证在数厘米以内.在 06:30 至 07:00 之间,静态 PPP 在东西方向和南北方向有一定的偏差,之后再次趋于稳定.动态 PPP 在 05:10 左右,经过一次收敛的过程.经过收敛后,定位精度大约在 20 cm 左右.

在 PPP 估计位置参数的同时估计了 GNSS 天线的天顶总延迟,并利用天线处的气压、气温等信息计算其大气可降水量.CORS 测站在实验过程中并没有实际的运动发生,分别利用动态 PPP 定位算法和静态算法估算水汽,可以客观地反映两种算法在计算水汽方面的异同.静态 PPP 定位算法在水汽的估计中已经有较多的应用,可以作为评估动态 PPP 大气水汽的参考.图 3 给出了在实验的 3.5 h 内,两种算法估算水汽的结果.可以看出,在实验期间,水汽的变化了大约 1.8 cm.在 04:30 到 07:00 之间,可降水量 PWV 一直呈现持续增长的趋势,但是 07:00 后, PWV 骤然下降.和静态 PPP 大气水汽时间序列相比,动态 PPP 结果更加平滑,时间序列的最大最小值相差 1.2 cm.04:30 至 06:30 之间, PWV 持续上升,同样在 07:00 后 PWV 有下降的趋势,但是相较于静态 PPP 结果,趋势比较平缓.两种方法估算的水汽最大差别为 6.6 mm.总体而言两种定位算法在大气水汽提取方面都可以反演出水汽的变化趋势,在 3.5 h 内,水汽的变化量超过了 1 cm.

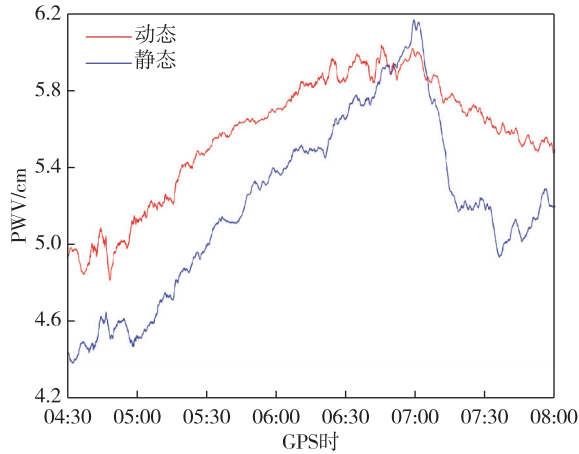


图3 GNSS CORS 站态、静态 PPP 大气水汽提取  
Fig. 3 PWV estimation from the GNSS CORS PPP  
in the static and dynamic models

CORS 站反演出的大气水汽表明 PPP 动态、静态数据处理方法可以成功提取大气水汽的 PWV,且一段时间内的水汽变化趋势也有较好的一致性.为了验证动态 PPP 在真实的动态载体上水汽提取的可能性,在 CORS 站附近设计了一个能快速旋转的载体,GNSS 天线可以在旋转载体上做标准的圆周运动.实验中,GNSS 数据的采样频率设置为 10 Hz,卫星截止高度角为  $5^\circ$ .为了降低高度角卫星的高噪声观测值对观测结果的影响,在数据的处理过程中,卫星截止高度角设置为  $10^\circ$ .天线在开始的 1 h 内处于静态状态,在 05:35 后,开始做匀速圆周运动,在 06:37 时,旋转平台由原来的顺时针改为逆时针运动.旋转平台每分钟转动 20 周,旋转半径为 2 m.图 4a 为动态 PPP 解算的 GNSS 天线在旋转平台上 3 个方向的轨迹,红色为东西方向、蓝色为南北方向,黑色为垂直方向.轨迹图显示,经过一段时间的初始化,位置时间序列处于稳定状态.在旋转平台开始转动后,动态 PPP 位置时间序列清晰地反映出该运动过程的变化.但在 06:00 和 07:10 左右,观测值出现短暂的中断,出现了收敛过程.

图 4b 为动态 PPP 处理的大气水汽 PWV,可以看出 PWV 的变化范围在 4.5~5.3 cm 之间.由于旋转平台和 CORS 站相距仅 10 m 左右,因此静态 PPP 获取的大气水汽可以作为旋转平台结果的参考.结果表明,在较为快速的运动平台下,动态 PPP 可以获得 PWV,量级和静态 PPP 的结果相当.但是在快速运动载体下,动态 PPP 并没有准确提取出在实验过程中 PWV 的变化趋势.这说明动态 PPP 中,载体

的动态变化影响到了水汽变化的提取.因其提取的水汽量级和静态 PPP 相当,所以在一些不太关注水汽短期变化的应用领域依旧实用.

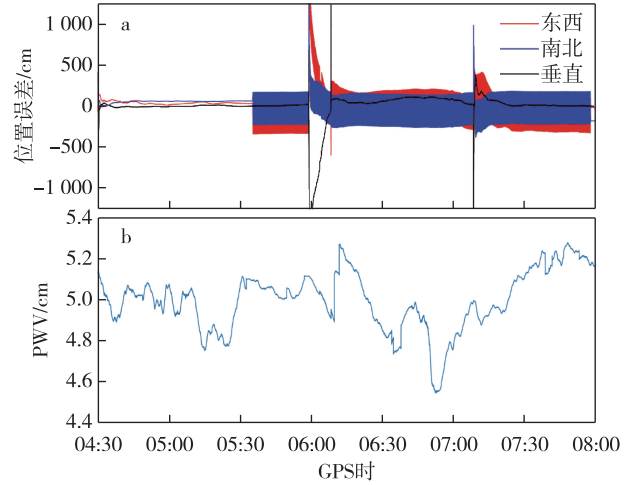


图4 旋转平台动态 PPP 估计的位置(a)与  
PWV 时间序列(b)

Fig. 4 Position error (a) and PWV (b) time series from the rotation arm rig's kinematic PPP

#### 4 智利地震网水汽反演

PPP 静态、动态模型在载体的不同运动状态下的估算结果差异较为明显,特别是在长时间快速运动的旋转载体上,其提取的水汽虽能客观反映 PWV 情况,但是很难描述在一段时间的大气水汽的变化趋势.在地震事件中,测站在短时间内可能发生米级形变.针对这一运动过程,如何利用测站进行大气水汽的反演值得探讨.

智利为地震频发国家,GNSS 地震网台站分布较为密集.图 5 给出了智利 GNSS 网台站的分布情况.2016 年 12 月 25 日 14:23 左右在智利梅林卡港发生 7.6 级地震,震源深度为 30 km,在其北方约 284 km 处 OSOR 台站受地震的影响较小.

图 6 为利用动态 PPP 估计的 QLLN 台站位移时间序列,时长约为 10 min.可以看出 14:22:54 开始有较大的形变,整个过程持续约 45 s.高程方向和南北方向的最大形变要小于东西方向,分别为 14.6 cm 和 16.5 cm,东西方向的最大形变为 36.6 cm.

图 7 为利用 QLLN GNSS 台站的动态、静态 PPP 估计的大气水汽 PWV 与 OSOR 台站估计的大气水汽 PWV 结果.从 QLLN 台站结果可以看出,动态与静态 PPP 的 PWV 估计结果在量级上一致性较好,变化趋势在 12:30 之前也具有较好的一致性,但是

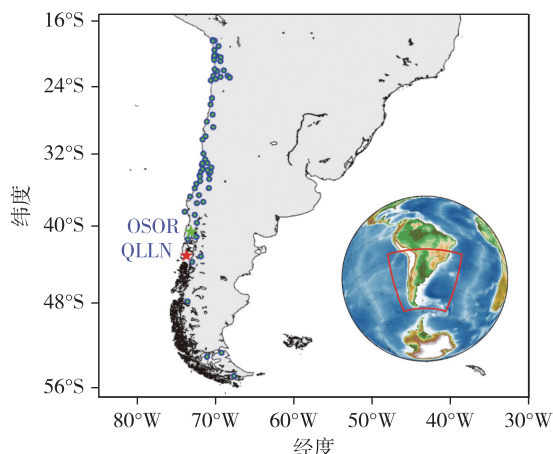


图5 智利地震网站点分布(红色五角星为 QLLN 台站, 距离震源最近;绿色五角星为 OSOR 台站位置)

Fig. 5 Distribution of Chilean seismic monitoring GNSS stations (red pentagram denotes the location of QLLN, which is nearest to the seismic focus; green pentagram denotes the location of OSOR station)

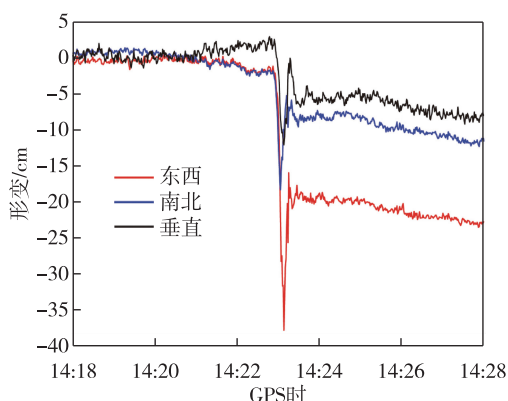


图6 智利 GNSS 地震网 QLLN 台站 PPP 地表形变时间序列  
Fig. 6 Displacement of QLLN station over the earthquake event

之后变化趋势一致性较差.同时在地震发生前后,动态、静态 PPP 提取的水汽并没有较大的变化,可以说明地震形变对 PPP 的水汽提取并没有显著影响.OSOR 台站在地震过程中所受到的影响非常有限,可以利用静态 PPP 进行水汽 PWV 的提取,其结果变化趋势与 QLLN 台站的静态结果一致性较好.但总体水汽 PWV 要高于 QLLN 台站的结果,这主要是由两个台站的地理位置决定的.

## 5 结束语

本文利用静态、动态 PPP 提取不同运动场景下的大气水汽 PWV,研究 PPP 在运动载体中提取大气水汽的可能性.研究结果表明,利用动态 PPP 可以成

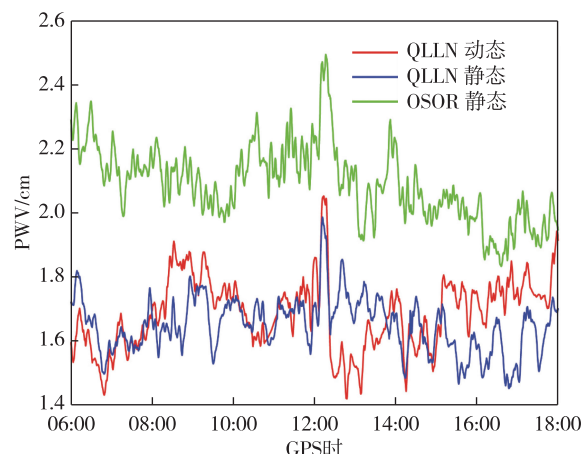


图7 QLLN 台站的动态、静态 PPP 水汽 PWV 与 OSOR 静态 PPP 水汽 PWV 比较

Fig. 7 Comparison of PWV time series from dynamic PPP, static PPP at QLLN station, and that from static PPP at OSOR station

功获取大气中的 PWV 情况,其估计的 PWV 与静态 PPP 估计结果在长时间序列下的一致性较好,但是其短期水汽结果的可靠性并不理想.在运动的车辆、轮船等应用场景中,静态 PPP 已经不适用,利用动态 PPP 提取长时间序列水汽是一种可行方案.在地震等瞬时短时间运动场景下,地表台站失稳并未对 PWV 的提取造成明显的差异.在地震发生前后,建议采用静态 PPP 进行 PWV 的提取.

## 参考文献

### References

- [ 1 ] Shi J B, Gao Y. A troposphere constraint method to improve PPP ambiguity-resolved height solution[J]. Journal of Navigation, 2014, 67( 2 ): 249-262
- [ 2 ] Hadas T, Kaplan J, Bosy J, et al. Near-real-time regional troposphere models for the GNSS precise point positioning technique [ J ]. Measurement Science and Technology, 2013, 24( 5 ): 055003
- [ 3 ] Alves D B M, Sapucci L F, Marques H A, et al. Using a regional numerical weather prediction model for GNSS positioning over Brazil[ J ]. GPS Solutions, 2016, 20( 4 ): 677-685
- [ 4 ] Tang X, Hancock C M, Xiang Z Y, et al. Precipitable water vapour retrieval from GPS precise point positioning and NCEP CFSv2 dataset during typhoon events[ J ]. Sensors ( Basel ), 2018, 18( 11 ): 3831
- [ 5 ] Song D S, Grejner-Brzezinska D A. Remote sensing of atmospheric water vapor variation from GPS measurements during a severe weather event [ J ]. Earth Planets and Space, 2009, 61( 10 ): 1117-1125
- [ 6 ] Yao Y B, Shan L L, Zhao Q Z. Establishing a method of short-term rainfall forecasting based on GNSS-derived PWV and its application[ J ]. Scientific Reports, 2017, 7

- (1):12465
- [ 7 ] Zhao Q Z, Yao Y B, Yao W Q. GPS-based PWV for precipitation forecasting and its application to a typhoon event[J]. *J Atmos Sol-Terr Phy*, 2018, 167:124-133
- [ 8 ] Sohn D H, Choi B K, Park Y, et al. Precipitable water vapor retrieval from shipborne GNSS observations on the Korean research vessel ISABU [J]. *Sensors (Basel)*, 2020, 20(15):4261

## Precipitable water vapor retrieving using precise point positioning in dynamic scenario

TANG Xu<sup>1</sup> WU Hao<sup>2</sup> ZHANG Di<sup>1</sup>

1 School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Zibo Survey and Mapping Research Institute Company Limited, Zibo 255000

**Abstract** Precise point positioning (PPP) has been well established for retrieving the precipitable water vapor (PWV) in the static model. Yet it is not always suitable for static PPP PWV retrieving, for an instance, the GNSS antenna keeps moving. Position and zenith total delay (ZTD) are coinstantaneously estimated in dynamic PPP model, which is an option for the PWV retrieving in dynamic scenario. GNSS data over 3.5 hours have been gathered from the Continuously Operating Reference Stations (CORS). Both static and dynamic PPPs have been applied for the CORS data processing. The result reveals that the maximum difference is 6.6 mm, and dynamic PPP PWV graduate movement agrees in magnitude with that from static PPP PWV. A rotation arm has been designed for GNSS receiver gathering data in dynamic scenario. PPP in dynamic model can retrieve the rotation arm PWV, which makes sense to the one from CORS PWV, but lose the capacity of detecting the PWV changes. GNSS station can have displacement in a short term in the earthquake event. Both static PPP and dynamic PPP have been assessed for this scenario. The result reveals that displacement due to the earthquake does not make an evident effect on the PWV retrieving both in static PPP and dynamic PPP. The static PPP is still recommended for the PWV retrieving over the earthquake period.

**Key words** satellite navigation; Precise Point Positioning (PPP); Precipitable Water Vapor (PWV)