

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2025.06.013

基于低成本北斗终端且无温压观测依赖的 实时大气水汽监测方法

叶寿洪¹, 李罗红^{2,3}, 周若⁴, 王一帆¹, 孙建文¹, 卢操⁵

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217;
2. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院精密大地测量与定位全国重点实验室, 武汉 430071;
3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049; 4. 湖北省气象信息与
技术保障中心, 武汉 430074; 5. 南方电网数字电网科技(广东)有限公司, 广州 510000)

摘要:随着高精度北斗(BDS)/GNSS终端硬件成本的不断降低和实时GNSS数据处理技术的发展,为实现大气水汽高密度、高时效观测提供了新机遇。聚焦BDS/GNSS水汽观测技术涉及的天顶对流层延迟(ZTD)实时计算和水汽反演的关键过程,开展了以下研究,研究了一种基于低成本高精度BDS/GNSS模块的实时ZTD计算方法,相较于传统利用测地型接收机的观测技术,该方法在保持高精度的同时,将终端硬件成本降低了约99%;提出了一种基于数值天气预报(NWP)模式的GNSS水汽反演辅助参数的实时计算方法,包括天顶静力学延迟(ZHD)和大气加权平均温度(T_m),该方法摆脱了传统反演过程对并址温压传感器的依赖,进一步降低了观测成本。在武汉气象站进行了为期50天的实验结果表明,基于低成本BDS/GNSS模块的实时ZTD计算精度达7.0 mm;基于NWP的ZHD和 T_m 实时计算精度分别为1.1 mm和1.8 K;以并址探空水汽资料为参考,联合低成本BDS/GNSS终端和NWP的实时水汽监测精度为2 mm,并对其在对流层大气扰动及降水事件中的应用效果进行了分析验证。该方法有望改进现有水汽监测业务模式,为极端天气场景下大气水汽场的高密度、高时效观测提供了重要参考。

关键词:BDS/GNSS; 水汽反演; 气象参数; 低成本终端

中图分类号:P228.4; V4

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2025)06-0136-11

A real-time atmospheric water vapor monitoring method based on low-cost BDS/GNSS terminals and without observed temperature and pressure data

YE Shouhong¹, LI Luohong^{2,3}, ZHOU Ruo⁴, WANG Yifan¹, SUN Jianwen¹, LU Cao⁵

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China;
2. State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement
Science and Technology (APM), Chinese Academy of Sciences (CAS), Wuhan 430071, China;
3. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. Hubei Meteorological Information and Technology Support Center, Wuhan 430074, China;
5. Southern Digital Power Grid Technology (Guangdong) Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

收稿日期:2024-10-11; 修订日期:2024-12-26

基金项目:中国南方电网云南电网有限责任公司科技项目(YNKJXM20222324);云南省基础研究计划项目(202301AU070101)

作者简介:叶寿洪(1997—),男,初级工程师,主要从事电力北斗应用及防灾减灾方面的研究。

通信作者:李罗红(1996—),男,博士后,主要从事GNSS高精度水汽方法及其低成本应用方面的研究。

Abstract: With the continuous reduction in hardware costs of high-precision BDS/GNSS terminals and the development of real-time GNSS data processing technology, new opportunities are emerging for achieving high-density and time-sensitive observation of atmospheric water vapor. Focusing on the key processes of real-time zenith tropospheric delay (ZTD) computation and water vapor retrieval using ground-based BDS/GNSS observations, the main contributions of this study are as follows: a real-time ZTD computation method based on low-cost BDS/GNSS terminals is investigated. Compared with the traditional techniques which use geodetic-grade receivers, this method reduces the hardware costs by approximately 99% while maintaining high accuracy. A real-time computation method for auxiliary parameters required for GNSS water vapor retrieval based on numerical weather prediction (NWP) is proposed, including zenith hydrostatic delay (ZHD) and atmospheric weighted mean temperature (T_m). This method eliminates the reliance of the traditional retrieval process on co-located temperature and pressure sensors, and further reduces the observation cost. The results of a 50-day experiment conducted at the Wuhan meteorological station show that the real-time ZTD computation using low-cost devices achieves a root mean square (RMS) accuracy of 7.0 mm; the real-time calculated accuracies of ZHD and T_m based on NWP are 1.1 mm and 1.8 K, respectively. The method combining low-cost terminals and NWP can provide real-time precipitable water vapor (PWV) with an accuracy of 2 mm, as validated by co-located radiosonde water vapor data. Additionally, the application performance of this method in tropospheric atmospheric disturbances and precipitation events are analyzed and verified. The combined method demonstrates the potential to improve the existing water vapor monitoring service and offers an important reference for high-density, real-time atmospheric water vapor observations in extreme weather scenarios.

Key words: BDS/GNSS; Water vapor retrieval; Meteorological parameters; Low-cost devices

0 引言

水汽是大气的重要组成成分之一,其时空变化与暴雨、寒流和台风等极端天气密切相关。传统水汽观测技术主要有无线电探空(radiosonde, RS)^[1]、微波辐射计^[2]和卫星遥感载荷探测^[3]等。但是这些技术在获取大气水汽的时效性和准确性方面存在一定局限性。全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)水汽观测技术是利用GNSS观测信息反演大气可降水量(precipitable water vapor, PWV),该技术能够有效弥补传统水汽观测手段的不足,具有高精度、全天候及高时空分辨率等优点。

GNSS水汽观测业务的实施通常分为3个步骤:首先,处理GNSS观测数据,计算测站天顶对流层延迟(zenith tropospheric delay, ZTD);其次,利用测站气压观测数据计算ZTD中的天顶静力学延迟(zenith hydrostatic delay, ZHD)部分,进而分离出天顶对流层湿延迟(zenith wet delay, ZWD);最后,利用测站气温观测数据计算大气加权平均温度

(weighted mean temperature, T_m),进一步得到转换因子,实现ZWD向PWV的反演^[4-5]。

围绕上述3个步骤,众多学者开展了相关研究。在GNSS ZTD计算方面,主要有双差网解和精密单点定位(precise point positioning, PPP)这2种数据处理技术^[6]。双差网解在计算绝对ZTD时,要求参考站与测站间距大于500 km^[7]。与双差网解相比,PPP技术具有模型简单、无需参考站及便于实时处理等优点^[8]。随着国际GNSS服务组织(International GNSS Service, IGS)实时流服务(real-time service, RTS)的发展^[9],多家分析中心发布了精密卫星轨道和钟差实时流产品,有效推动了实时PPP技术的应用^[10]。实时PPP技术利用实时GNSS观测值数据和实时精密产品状态空间域(state space representation, SSR)改正数,可实现ZTD的实时计算^[8]。在GNSS观测终端方面,现有的GNSS水汽监测业务均采用测地型GNSS接收机,如湖北省气象局的GNSS气象观测网络使用的均为天宝R9或者Alloy接收机,接收机和天线硬件成本不低于10万元,其造价和维护成本

较高^[11],这限制了其进一步开展加密观测应用。低成本 GNSS 接收机相较于测地型设备具有显著的成本优势,具备开展高密度水汽监测的应用潜力^[10]。Zhao 等^[12]提出了一种单频 PPP 算法模型,并初步验证了后处理模式下低成本全球定位系统(global positioning system, GPS)终端反演 PWV 的精度。随着 GNSS 技术的发展,多数低成本 GNSS 终端已具备跟踪多频多模信号和实时数据流传输能力,为大气水汽的实时、高密度观测提供了可能^[13-14]。同时,部分高精度 GNSS 芯片和模组的成本不断降低,将这些基础模块开发成面向水汽应用的监测终端也是未来构建密集化低成本观测网络的重要途径。

在 GNSS PWV 反演方面,ZHD 和 T_m 是实现 GNSS PWV 反演的 2 个关键辅助参数。为计算 ZHD 和 T_m ,GNSS 测站均需配备温度和气压气象传感器^[11]。然而,在实际应用中,多数 GNSS 观测站无法获取有效的温度和气压观测数据,进而限制了其在水汽反演中的应用。针对无温压观测的 GNSS 水汽反演应用,诸多学者开展了相关研究,提出可采用气象参数内插、经验模型或者再分析资料等方式获取 ZHD 和 T_m 参数^[15]。气象参数内插对站点间距和高差有较高要求,在站点稀疏区域的应用效果较差。经验模型虽可提供任意时间和位置的 ZHD 和 T_m ,但精度较低,且无法反映大气异常短时变化,这限制了其在极端天气场景下的应用^[16]。再分析资料能够为水汽反演提供准确的 ZHD 和 T_m ^[17],但是产品发布存在时间延迟,无法应用于实时水汽监测应用^[18-19]。随着数值天气预报(numerical weather prediction, NWP)技术的发展,其可提供全球高时空分辨率的大气状态预报信息,并且免费向全球用户开放,这为 ZHD 和 T_m 的实时计算提供了可能。国际上有多家天气预报中心可提供 NWP 产品,如欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的集成预报系统(integrated forecast system, IFS)和美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的全球预报系统(global forecast system, GFS)。Pany 等^[20]利用 ECMWF 的 NWP 产品计算对流层延迟,并将其用于改正 GPS 信号中的对流层误差。Zhang 等^[21]利用 NCEP 的 GFS 产品和实时 GNSS ZTD 产品构建对流层延迟改正模型,该模

型可在中国区域提供精度优于 16 mm 的实时 ZTD。此外,Chen 等^[22]基于后处理方式评估了 ECMWF 和 NCEP 的再分析资料及 NWP 产品提供的 ZHD 和 T_m 精度,结果分别在 3 mm 和 1.5 K 左右。以上结果初步验证了利用 NWP 提供对流层延迟及水汽反演辅助参数的可行性。

综上,在 GNSS ZTD 计算方面,现有研究尚未充分分析并验证利用低成本北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system, BDS)/GNSS 终端计算实时 ZTD 的能力。在 GNSS PWV 实时反演方法中,现有方法高度依赖并址气象传感器采集的实测气象参数,这限制了低成本 BDS 终端在水汽监测业务中的规模化应用。因此,亟需研发一种低成本且无气象参数依赖的实时水汽观测方法,以满足高密度、高时效水汽监测的应用需求。

1 研究方法

1.1 基于 BDS 终端的实时 ZTD 计算方法

本文采用基于双频无电离层组合(ionosphere-free combination, IF)PPP 模型,其观测方程表示为

$$\begin{cases} \Delta P_{if} = -e_r^s \Delta x + c \cdot dt_r + M_r^s \cdot dZ + \epsilon_p \\ \Delta \phi_{if} = -e_r^s \Delta x + c \cdot dt_r + M_r^s \cdot dZ + \lambda_{if} \cdot N_r^s + \epsilon_\phi \end{cases} \quad (1)$$

式中: ΔP_{if} 和 $\Delta \phi_{if}$ 分别为伪距和相位 IF 观测值减计算值(observed-minus-computed values, OMC); e 为卫星到接收机的单位向量; Δx 为测站坐标相对于先验值的改正量; dZ 为对流层延迟相对于先验值的改正量; M_r^s 为对应的投影函数; N_r^s 和 λ_{if} 分别为 IF 形式的浮点模糊度参数及其对应的波长; ϵ_p 和 ϵ_ϕ 分别为伪距和相位 IF 观测值的测量噪声。卫星轨道和钟差已经通过 SSR 改正数和广播星历匹配恢复得到。

本文中采用先验干延迟模型确定对流层静力学延迟量^[23],湿分量部分作为未知参数进行计算,基于此,实时 PPP 计算的 ZTD 如式(2)所示。

$$Z_{ZTD} = dZ + Z_0 \quad (2)$$

其中: Z_0 为根据对流层模型计算的 ZHD 先验值; Z_{ZTD} 为对流层延迟的计算值。

实时 PPP 所采用的算法模型和处理策略如表 1 所示。本文采用的实时 PPP 软件和策略在研究团队之前的工作中已得到充分验证^[24]。

表1 实时 PPP 所采用的处理策略
Tab. 1 Processing strategies used in real-time PPP

项目	策略和模型
观测值及频率	GPS:L1/L2 BDS-3:B1I/B3I
实时精密产品	SSRA00WHU0 实时数据流
采样率	1 s
模糊度	浮点解
参数计算方法	卡尔曼滤波(forwards)
加权策略	伪距和相位噪声方差分别为 0.6 m 和 0.003 m 高度角度加权: $\sigma = \sigma_0 \sqrt{1 + \cos^2 e}$ [25]
截止高度角	5°
电离层延迟	IF 消除
站坐标	常量计算
湿延迟	随机游走($10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$)计算
干延迟	GPT3 模型
投影函数	GMF 模型
相对论、地球自转、相位绕转	模型改正

1.2 基于 NWP 的实时 ZHD 和 T_m 计算方法

NCEP 的 GFS 是当前主流的数值天气参数预报模式, 其在 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 空间网格上提供 41 个等压层的全球大气变量。GFS 通常每天运行 4 次, 分别从 UTC 时间 00 时, 06 时, 12 时和 18 时开始。前 120 h 的逐小时预报产品由 GFS 生成并发布。

考虑到预报产品的时效性, 利用其 5~11 h 预报的产品计算站点处的 ZHD 和 T_m , 进而实现全球任意位置处的 ZHD 和 T_m 预报服务。该服务是基于 GFS 的三维预报产品获取站点附近的 4 个格网点的位势高度、温度、气压和比湿廓线, 再利用数值积分和线性插值计算站点位置的 ZHD 和 T_m 。其中, ZHD 和 T_m 的计算公式如下

$$Z_{\text{ZHD}} = 10^6 \sum_{H_{\text{sta}}}^{H_{\text{top}}} \left[\frac{(H_i - H_{i+1})(N_{H_i} - N_{H_{i+1}})}{\ln N_{H_i} - \ln N_{H_{i+1}}} \right] + Z_{\text{ZHD}_{\text{top}}} \quad (3)$$

$$N_{H_i} = k_1 R_d \left(\frac{P_{d,i}}{T_i R_d} - \frac{P_{v,i}}{T_i R_v} \right) \quad (4)$$

$$T_m = \frac{\sum_{H_{\text{sta}}}^{H_{\text{top}}} \left[\left(\frac{P_{v,i}}{T_i} \right) (H_i - H_{i+1}) \right]}{\sum_{H_{\text{sta}}}^{H_{\text{top}}} \left[\left(\frac{P_{v,i}}{T_i^2} \right) (H_i - H_{i+1}) \right]} \quad (5)$$

$$P_{v,i} = \left(\frac{q_i}{0.622 + 0.378 q_i} \right) P_i \quad (6)$$

$$P_{d,i} = P_i - P_{v,i} \quad (7)$$

其中: H_{sta} 为 GNSS 站点高度(m); H_{top} 为最顶部等压层高度(m); H_i 和 N_{H_i} 分别为高度(m)和第 i 层的静力学折射系数(mm/km); T_i , P_i 和 q_i 分别为第 i 层的温度(K)、大气压(hPa)和比湿; $P_{d,i}$ 和 $P_{v,i}$ 分别为第 i 层的干空气分压和水汽分压; $Z_{\text{HD}_{\text{top}}}$ 为最顶部等压层上部的静力学延迟, 可根据 Saastamoinen 模型计算得到; k_1 为大气折射常数, 经验值为 77.689 0 K/hPa; R_d 和 R_v 分别为干空气和水汽的气体常数, 经验值分别为 287.053 J/(kg · K) 和 461.495 J/(kg · K)。

考虑到站点高度不一定在 GFS 预报资料提供的气压层高度上, 需要根据站点高度对气压层参数进行插值或者延拓。当站点高度位于第 i 和第 $i+1$ 气压层之间时, 以气压 P_d 为例说明垂向插值过程。

$$P_{d,\text{sta}} = \left(\frac{H_{\text{sta}} - H_1}{H_{i+1} - H_i} \right) \cdot (P_{d,i+1} - P_{d,i}) + P_{d,i} \quad (8)$$

当站点高度位于最底层气压层以下时, 其 $P_{d,\text{sta}}$ 归算过程如式(9)所示。

$$P_{d,\text{sta}} = \left(\frac{H_{\text{sta}} - H_1}{H_2 - H_1} \right) \cdot (P_{d,2} - P_{d,1}) + P_{d,1} \quad (9)$$

其中, $P_{d,\text{sta}}$ 为归算后站点处的气压, 其他参数的推算过程也与站点气压类似。GFS 资料提供的气象数据为格网数据, 经过上述计算, 可得到与测站高度相同的周围 4 个格网点处的 ZHD 和 T_m , 随后采用双线性插值法得出测站处的 ZHD 和 T_m 参数。

由于 NWP 产品提供的站点处气象参数的时间间隔为 1 h, 而面向分钟级的实时水汽反演通常需要对气象参数进行时间域插值, 本文采用的插值方式如下

$$P_{d,\text{sta}}(t) = \left(\frac{t - t_{\text{last}}}{t_{\text{next}} - t_{\text{last}}} \right) \cdot (P_{d,\text{sta}}(t_{\text{next}}) - P_{d,\text{sta}}(t_{\text{last}})) + P_{d,\text{sta}}(t_{\text{last}}) \quad (10)$$

其中: t 为当前时刻; t_{last} 为 t 时刻的上一个小时; t_{next} 为 t 时刻的下一个小时; $P_{d,\text{sta}}(t)$ 为对应 t 时刻的站点处气压值。同样地, T_m 可以基于线性插值方法获取。

1.3 联合低成本 BDS/GNSS 终端与 NWP 的实时水汽反演方法

ZWD 可以通过 ZTD 和 ZHD 求差获得, 再利用 T_m 计算转换系数 Π , 即可获得站点垂直上空的 PWV。在传统水汽反演方法中, ZHD 和 T_m 一般是根据经验模型或者实测气象参数获取。在本文提出的预报对流层参数的实时水汽反演方法中, 这

2 个辅助参数是从上述基于 NWP 预报资料的对流层模型中实时获取的, 实现过程如图 1 所示。

GNSS 反演 PWV 的过程如下

$$Z_{\text{ZWD}} = Z_{\text{ZTD}} - Z_{\text{ZHD}} \quad (11)$$

$$P_{\text{PWV}} = \Pi \cdot Z_{\text{ZWD}} \quad (12)$$

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho_w R_v \left(\frac{k_3}{T_m} + k'_2 \right)} \quad (13)$$

式中: ρ_w 为液态水密度, 取值为 $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; k_2' 和 k_3 为大气折射常数, 取值分别为 22.13 K/hPa 和 $3.739 \times 10^5 \text{ K}^2/\text{hPa}$; T_m 和 ZHD 从 NWP 预报资料中获取。

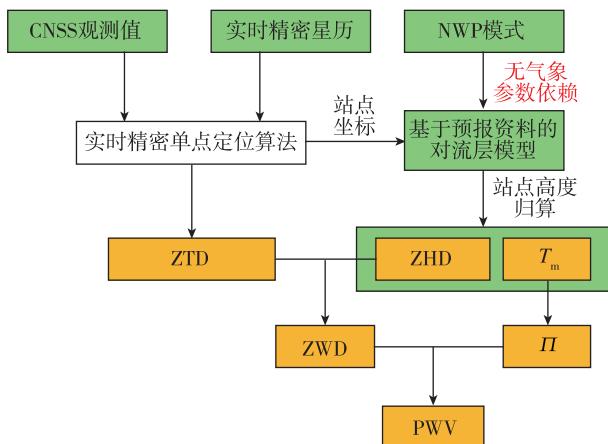


图 1 基于 NWP 预报资料的实时 PWV 反演方法流程

Fig. 1 Flow of real-time PWV retrieval method based on NWP forecast data

基于实测气象参数的水汽监测方法主要分为 3 步:首先,利用站点处实测气压和温度转换为 ZHD 和 T_m ;然后,根据式(11)和式(13)分别计算 ZWD 和 Π ;接着,转换得到 GNSS-PWV,并将气压转换为 ZHD 参考 Saastamoinen 模型^[26],见式(14)和式(15)。最后,将实测温度转换为 T_m 参考 Bevis 模型^[7],见式(16)。

$$ZHD = 0.0022768 \times \frac{P_{\text{sta}}}{f(\varphi, H)} \quad (14)$$

$$f(\varphi, H) = 1 - 0.00266 \cos(2\varphi) - 0.00028H \quad (15)$$

$$T_{m\text{sta}} = 0.72T_{\text{sta}} + 70.2 \quad (16)$$

式中: H 为站点或格网高度(km); φ 为站点的纬度; T_{sta} 和 P_{sta} 分别为站点处的温度(K)和气压。

ZHD 和 T_m 的高度换算。通过实测气压获取 ZHD 时,需对气压进行高度归算。一般分为 2 步:第一步是对实测气压进行高度修正,得到站点处气压 P_{sta} ;第二步是将站点处气压转换为站点处的 ZHD。

$$P_{\text{sta}} = P_{\text{observed}} \cdot \left(1 - \frac{\alpha \cdot dh}{T}\right)^{5.257} \quad (17)$$

$$T_{m\text{sta}} = T_{m\text{observed}} - \alpha \cdot dh \quad (18)$$

式中: P_{sta} 和 P_{observed} 分别为 GNSS 台站处和气压计实测的大气压(hPa); $T_{m\text{sta}}$ 和 $T_{m\text{observed}}$ 分别为 GNSS 台站处和实测温度转换的 T_m (K); dh 为 GNSS 台站和气象站的高度差(m); α 为气温垂直递减率因子,取值为 $6.5 \times 10^{-3} \text{ K/m}$ 。

2 研究数据

2.1 GNSS 数据

为对本文提出的水汽反演算法进行长期验证,研究团队在武汉气象站部署了一台自主研发的 BDS/GNSS 终端。考虑到水汽监测的可靠性和稳定性,GNSS 终端采用了和芯星通 UM980 高精度 GNSS 模块,该模块具备优良的跟踪性能和观测值质量,GNSS 天线则选用了司南导航 AT360。单台接收机和天线组成的终端成本约为 1 500 元人民币,仅为我国现有 GNSS 水汽监测网络终端成本的 1% 左右。研究团队基于 UM980 高精度模块进行了嵌入式开发,使终端能够获取实时数据流和预报资料,并能实时计算 ZTD 及反演 PWV。反演得到的 5 min 间隔水汽产品可自动上传至远程服务器。基于低成本接收机的 ZTD 计算与实时 PWV 反演方法的完整流程如图 2 所示。

实时 PPP 实验在真实的实时环境中开展。GNSS 接收机终端实时获取 BDS/GPS 双频观测值和广播星历,数据通过串口通信协议传输,格式为接收机厂商自定义的二进制数据流。实时 PPP 软件需逐条解码接收机模块输出的二进制电文,以提取 BDS/GPS 卫星的观测数据。GNSS 卫星轨道和钟差的 SSR 改正数数据流由武汉大学 IGS 分析中心的 SSRA00WHU0 挂载点提供,多系统广播星历数据流则来自 IGS 分析中心之一的德国联邦制图和大地测量局(Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, BKG)的 BCEP00BKG0 挂载点。卫星精密产品与综合广播星历数据通过武汉大学分析中心的 NTRIP(networked transport of RTCM via internet protocol)Caster 获取,数据编码和解码遵循 RTCM(radio technical commission for maritime services)3.0 协议,数据接收软件为课题组自主研发的 IGG NTRIP。IGG NTRIP 软件能够解码从 NTRIP Caster 获取的最新 RTCM 电文,并将其写入本地共

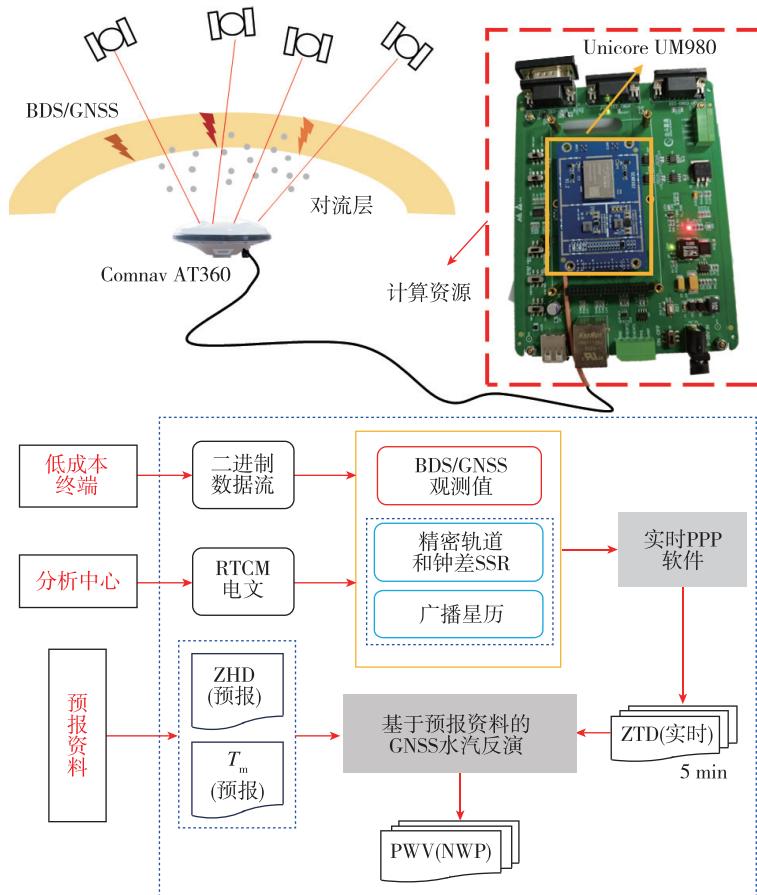


图2 联合低成本 BDS 终端和 NWP 的实时 ZTD/PWV 计算流程

Fig. 2 Flow of ZTD and PWV calculation based on low-cost BDS/GNSS terminal and NWP forecast data

享内存，供实时 PPP 软件在解算时直接读取。服务端基于 GFS 预报资料计算未来 6 h 内站点的 ZHD 和 T_m ，并将结果推送至 GNSS 接收机终端。实时 PPP 软件根据当前时间对预报产品进行必要的线性插值，并结合实时估计的 ZTD 反演 GNSS PWV。

2.2 GNSS 对流层产品和气象数据

为评估基于 NWP 预报资料的实时水汽反演方法在长期实时水汽监测中的性能，首先使用自研的实时 PPP 软件处理原始观测数据流，并实时计算 ZTD。随后，基于 NWP 预报资料的对流层延迟模型计算 GNSS 站点的静力学延迟和 T_m ，并进一步用于反演 PWV，其中 ZTD 和 PWV 计算间隔均为 5 min。实验时间跨度为 2024 年 9 月 24 日—11 月 14 日，共计 50 天。此外，利用加拿大自然资源局(NRCAN)提供的基于 PPP-AR 的 GNSS 在线后处理服务 CSRS-PPP 处理存档观测数据，生成后处理 ZTD 产品(时间间隔 30 s)，以验证基于实时 PPP 软件计算的 ZTD 结果。

武汉气象站(编号 57494)为国家基本气象站，每日定时自动记录温度、湿度及气压等气象参数，并通过探空气球测量大气廓线数据。低成本 GNSS 终端位于观测场内，与上述气象传感器并址。武汉气象站的气象参数数据从中国气象数据网下载，时间间隔为 3 h；探空站大气廓线数据则来自美国怀俄明大学气象探空数据存档网站。通过积分计算探空廓线数据，得到站点高度的 PWV(时间间隔 12 h)，记为 RS-PWV。同时，利用 GNSS-ZTD 结合实测气压和温度数据反演 PWV(时间间隔 3 h)，记为 MET-PWV。以上 2 类 PWV 产品用于比较和检核基于新方法反演的水汽产品。此外，为比较降水天气与非降水天气下 GNSS 水汽反演方法的精度表现，从中国气象数据网获取了同期降水数据，该数据由自动雨量计采集，时间分辨率为 3 h。GNSS 站、气压计和探空站点分布和高度差异以及 GNSS 天线周围净空环境如图 3 所示。

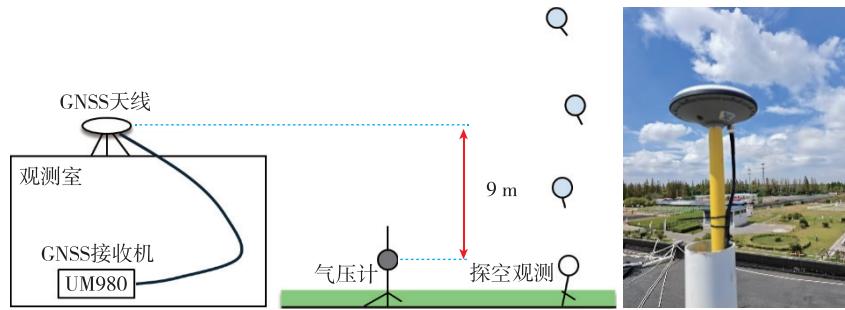


图 3 观测设备位置和环境示意图

Fig. 3 Diagram of the device setup and observation environment

3 结果分析

3.1 对流层延迟的计算精度分析

采用实时 PPP 软件得到的 ZTD 产品,记为 RT-ZTD;利用加拿大 CSRS-PPP 服务计算的后处理 ZTD,记为 Reference (PPP-AR)-ZTD。CSRS 利用 PPP-AR 技术处理低成本观测值,平均模糊度固定率在 95%以上,这也反映了低成本观测值具有较高的精度。以 Reference(PPP-AR)-ZTD 为参考,评估了基于低成本观测值的实时 GNSS ZTD 估计质量。

图 4(a)所示为实时 PPP 软件计算的 ZTD 和 CSRS-PPP 后处理的 ZTD 结果的对比,红色线表示 Reference(PPP-AR)-ZTD,蓝色线表示 RT-ZTD。Reference(PPP-AR)-ZTD 和 RT-ZTD 的偏差、标准差和均方根误差分别为 0.3 mm, 7.0 mm 和 7.0 mm。从图 4(a)可以看出,RT-ZTD 与 Reference(PPP-AR)-

ZTD 结果在总体上有较好的一致性,验证了基于低成本观测数据的实时 ZTD 计算方法的稳定性和高精度。因此,近 50 天的实验结果证实,低成本接收机在实时提取对流层延迟方面具有长期稳定性和可靠性,具备应用于长期水汽监测业务的潜力。

为具体说明实时计算的 ZTD 在天气状态发生剧烈变化时的表现,以事后结果为参考,分别展示实时 ZTD 结果在 DOY 277~281 和 DOY 295.5~296.5 这 2 个时间段的时间序列,如图 4(b)和图 4(c)所示。在图 4(b)中,ZTD 从 2 378 mm 抬升到 2 637 mm,增加约 260 mm。从中可以看出,实时计算得到的 RT-ZTD 依旧与后处理结果基本一致,没有发生明显偏差和剧烈抖动。在图 4(c)中,ZTD 也发生了剧烈波动,24 h 内下降了 210 mm,但是实时计算的 RT-ZTD 与后处理的 Reference(PPP-AR)-ZTD 的变化趋势一致。这表明,基于低成本观测数据的实时 ZTD 计算方法精度较高,并能在对流层快速变化时准确计算 ZTD。

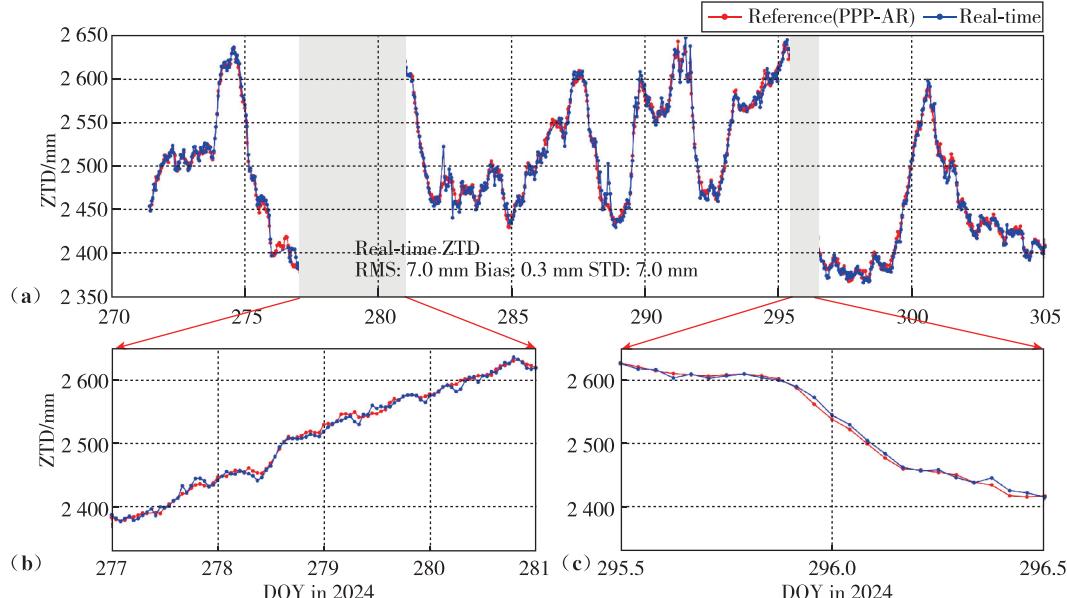


图 4 低成本 GNSS 终端的实时 ZTD 结果

Fig. 4 The real-time ZTD performance from low-cost GNSS terminal

综上,基于 BDS/GNSS 终端的实时估计的 ZTD 与经 PPP-AR 后处理的高精度结果基本一致,说明本文提出的实时方案能够发挥 BDS/GNSS 终端低成本高精度的性能优势,给后续实时水汽反演提供可靠且高时效的对流层延迟产品。

3.2 静力学延迟和加权平均温度的质量分析

为分析 NWP 预报资料提供的 ZHD 的质量,利用实测气压计算参考 ZHD,评估基于 NWP 资料的 ZHD 的预报精度。基于 NWP 计算的 ZHD 与参考 ZHD 的比较结果如图 5 所示。图 5 中,红色曲线代表 NWP 预报资料提供的 GNSS 站点处的 ZHD 序列,蓝色曲线代表利用实测气压参数归算到 GNSS 站点高度处的 ZHD^[26],青色曲线代表利用经验模型 GPT3 计算的 ZHD。

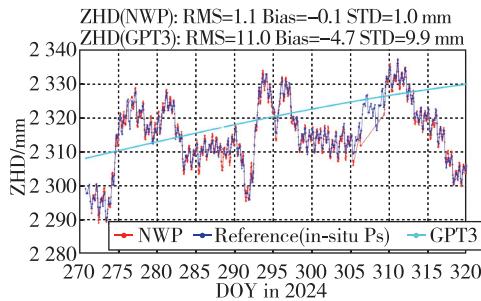


图 5 利用 NWP 和 GPT3 计算的实时 ZHD 与参考值的对比,以实测气压导出的 ZHD 为参考

Fig. 5 Comparison of real-time NWP-ZHD and GPT3-ZHD, using the observed pressure-derived ZHD as reference

从图 5 可以看出,NWP 预报资料提供的站点 ZHD 与通过实测气压参数计算的 ZHD 高度一致,两者的偏差在 -0.1 mm ,标准差和均方根误差分别为 1.0 mm 和 1.1 mm ;GPT3 提供的 ZHD 的均方根误差为 11.0 mm 。在体现 ZHD 日变化方面,NWP 预报资料可以较为准确地反映 ZHD 小时变化。但 GPT3 模型难以实际刻画真实的静力学延迟变化,在气压发生快速变化时,与真实 ZHD 相差可达 20 mm 。这说明 GPT3 提供的 ZHD 精度较低,会给 PWV 反演引入约 $2\sim3 \text{ mm}$ 的误差。相较于 GPT3 模型,NWP 预报资料提供的 ZHD 在均方根误差上减小约 10 mm ,显著降低了 ZHD 误差对实时 PWV 反演的影响。

图 6 所示为通过 NWP 预报资料、GPT3 模型和探空数据积分这 3 种方式得到的 T_m 时间序列。

以探空廓线数据经数值积分得到的 $T_m(\text{RS}-T_m)$ 为参考,预报资料的 T_m 的均方根误差为 1.8 K ;GPT3 模型提供的 T_m 的均方根误差为 5.3 K 。在体现 T_m 日变化方面,间隔 12 h 的 $\text{RS}-T_m$ 存在明显不足,而预报资料能够较好地反映 T_m 的变化。由于 GPT3 在建模过程中未考虑日周期因素,无法准确表达 T_m 的日变化,会造成约 $2\sim4 \text{ K}$ 的偏差。因此,NWP 预报资料提供的 T_m 参数,相较于 GPT3 在均方根误差上降低了 66% ,具有精度更高、实时性更好及能够反映参数日变化等优点,在实时水汽反演中具有较好的应用潜力。

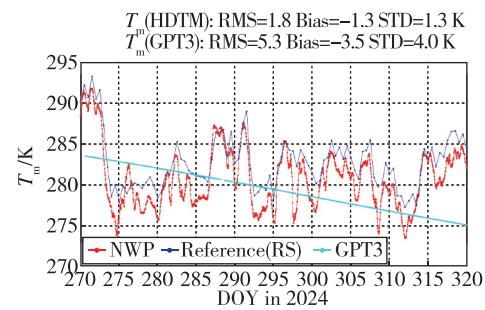


图 6 利用 NWP 和 GPT3 计算的 T_m 和参考值的对比,以 RS- T_m 为参考

Fig. 6 Comparison of NWP- T_m and GPT3- T_m , using RS- T_m as reference

综上,NWP 预报资料提供的 ZHD 和 T_m 与通过实测气象参数得到的结果基本一致,其均方根误差分别为 1.1 mm 和 1.8 K ,满足水汽反演对这 2 个辅助参数的精度要求。相较于经验模型,NWP 预报资料提供的 ZHD 和 T_m 更为精确,减小了辅助参数给 PWV 反演结果带来的误差,并适用于极端天气等场景。因此,基于 NWP 预报资料获取的对流层延迟参数可以有效解决实时 GNSS 水汽反演对气象参数依赖的问题,支持无气象传感器的 GNSS 台站开展水汽监测应用。

3.3 GNSS 水汽反演质量分析

为了详细说明联合低成本 BDS/GNSS 终端和 NWP 预报资料的实时 GNSS 水汽反演方法的优势,图 7 展示了基于 NWP 预报资料的实时水汽反演方法得到的 PWV(NWP+GNSS)(绿色)、基于探空数据积分得到的 RS-PWV(红色)及基于实测气象参数反演得到的 GNSS PWV(紫色),分别记为 PWV(RS) 和 PWV(MET+GNSS)。其中,RS-PWV 作为评估 GNSS-PWV 的参考结果。

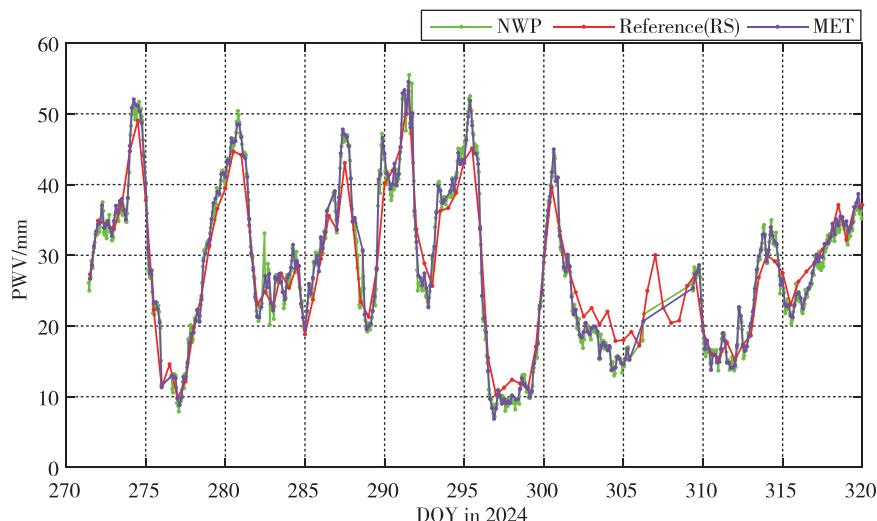


图 7 联合低成本 BDS 终端与 NWP 实时反演的 GNSS PWV 与参考 PWV 的比较

Fig. 7 The comparison of real-time PWV retrieved using low-cost BDS terminal and NWP with reference PWV

从图 7 可以看出,以无线电探空结果作为参考,基于 NWP 预报资料和低成本观测值实时反演的 PWV(NWP)与 RS-PWV 在总体趋势上基本一致,其偏差为 0.1 mm,均方根误差和标准差均在 2.0 mm 左右。在连续 50 天的实时运行中,反演结果稳定可靠。以 PWV(MET+GNSS)为参考,基于 NWP 预报资料反演得到的实时 PWV 均方根误差约为 0.5 mm,在水汽峰值和谷值区域,二者结果也基本一致。这说明 NWP 预报资料提供的辅助参数可作为实测气象参数的高质量替代,不会引入明显的 PWV 误差。以上结果表明,本文提出的联合方案能够支持快速水汽监测,实现均方根误差约 2 mm 的实时 PWV 反演。另外,实验结果表明,联合方案在不损失 PWV 精度的同时,利用高精度预报资料让实时水汽反演摆脱了对气象传感器的依赖。这样不仅显著降低了水汽监测站的硬件成本,还简化了水汽反演过程。

图 8 反映了 PWV 变化与实测降雨量之间的关系。其中,绿线代表基于 NWP 预报资料的 GNSS PWV 反演结果,红线表示基于探空廓线数据计算的 PWV,紫线则是利用实测气象数据反演得到的 GNSS PWV 结果。红色柱状图表示同期 3 h 累计降水量。

在 DOY 291~292 期间,武汉发生了一次集中降雨。PWV 在降雨前快速抬升,这代表水汽在快速积累;降水事件发生后,水汽迅速减少。相较于 PWV(RS)和 PWV(MET+GNSS),PWV(NWP+GNSS)提供了具有更高时间分辨率的反演结果,能够有效反映水汽的细节变化。而基于廓线数据(12 h 间隔)和气象观测(3 h 间隔)的 PWV 在捕捉水汽峰值和快速

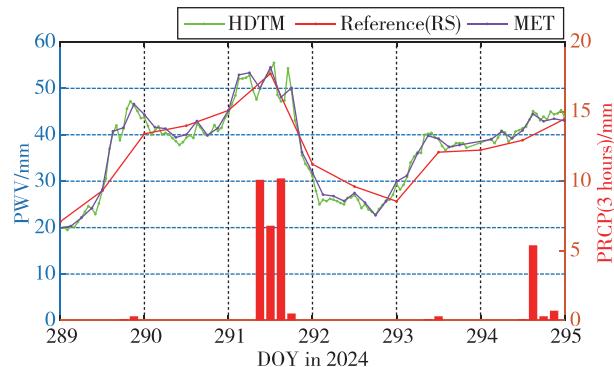


图 8 降雨事件中不同 PWV 反演方法的性能比较

Fig. 8 Performance comparison of PWV retrieval methods during the rain event

变化方面存在一定局限性。值得强调的是,这种对水汽快速变化的响应是由一台硬件成本仅 1 500 元的 GNSS 接收机所捕获的。由此可见,本文提出的水汽监测方法能够方便地将低成本 GNSS 接收机转化为高精度水汽监测终端,不仅降低了硬件成本和维护负担,还能灵敏地实时监测降水事件中的水汽变化。

与平静天气相比,降水事件中水汽会发生快速波动,导致 PWV 快速抬升和下降。表 2 统计了有无降水事件发生时实时 PWV 的反演精度。以基于实

表 2 在有无降水发生场景下实时 PWV 的反演精度统计

Tab. 2 Accuracy statistics of the real-time PWV retrieved in scenarios with or without precipitation mm

场景	偏差	标准差	均方根误差
有降水	-0.19	0.49	0.52
无降水	0.19	0.37	0.42

测气象参数反演的 PWV 作为参考,基于 NWP 预报资料的水汽反演方法得到的 PWV 偏差为 0.19 mm,均方根误差略有增加,不过与平静天气下的水汽反演结果基本相当。

综合来看,降水事件不会显著降低实时水汽反演的质量,这充分证明了 NWP 预报资料提供的辅助参数的有效性,同时也证明了基于低成本接收机的实时反演方法的可靠性,该方法能够有效监测强降雨等天气过程中的快速水汽变化。

综上所述,低成本 GNSS 设备具备实时高精度 PWV 反演的可行性和潜力。与传统测地型接收机相比,低成本 GNSS 设备成本低廉,更有利于对现有观测网络的密集化补充。基于 NWP 预报资料的实时水汽反演方法,在摆脱对实测气象参数依赖的前提下,能够提供高时效性和精确的 PWV 结果,进一步提升了地基监测网络对低成本 GNSS 接收机的兼容性。

4 结论

为了实现大气水汽的高密度、高时效监测,本文提出了一种基于低成本 BDS/GNSS 终端、无需温压观测的实时大气水汽监测新方法。与传统测地型接收机的监测方法相比,新方法在保持高精度的同时,将 GNSS 终端硬件成本降低了约 99%。在此基础上,进一步提出了基于 NWP 模式的 GNSS 水汽反演方法,摆脱了传统水汽反演对并址气象传感器的强依赖。结合并址探空数据和实测气象数据,评估了新方法的精度和可靠性,结论如下:

1) 基于低成本高精度的 BDS/GNSS 终端,实时计算对流层延迟的精度可达 7.0 mm,充分发挥了其成本低、性能高的优势。该方法能够以现有水汽监测业务终端约 1% 的硬件成本获得同等精度的对流层延迟信息,为高密度水汽监测提供关键技术支撑。

2) 基于 NWP 计算的 ZHD 和 T_m 精度分别为 1.1 mm 和 1.8 K,该方法能够精确刻画 ZHD 和 T_m 的短时及日变化特征,摆脱了水汽反演对实测气象参数的强依赖,进一步降低了硬件成本。

3) 以并址探空水汽资料为参考,本文提出的联合低成本 BDS 终端与 NWP 的实时 PWV 反演精度为 2.0 mm,该方法能够精确描述降水过程中的 PWV 短时变化。

本文提出的基于低成本 BDS 终端且无需温压观测的实时大气水汽监测新方法,不仅革新了 GNSS 水汽监测业务模式,还能推动水汽监测向高

密度和高时效方向发展。展望未来,研究团队将继续研发成本更低、性能更优的水汽反演方案,并计划在武汉市区部署低成本 GNSS 观测网,开展在多种极端天气场景下的二维、三维等多维水汽监测与应用研究。

致 谢

感谢武汉市国家基本气象站提供场地支持,中国气象数据网和美国怀俄明州大学提供气象观测数据和探空数据以及加拿大自然资源局提供 CSRS PPP 在线服务。

参 考 文 献

- [1] 梁宏, 张人禾, 刘晶淼, 等. 青藏高原探空大气水汽偏差及订正方法研究[J]. 大气科学, 2012, 36(4): 795-810.
LIANG Hong, ZHANG Renhe, LIU Jingmiao, et al. Systematic errors and their calibrations for radiosonde precipitable water vapor on the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2012, 36(4): 795-810(in Chinese).
- [2] MEMMO A, FIONDA E, PAOLUCCI T, et al. Comparison of MM5 integrated water vapor with microwave radiometer, GPS, and radiosonde measurements[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(5): 1050-1058.
- [3] KING M D, KAUFMAN Y J, MENZEL W P, et al. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer(MODIS)[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(1): 2-27.
- [4] BEVIS M, BUSINGER S, HERRING T A, et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97(D14): 15787-15801.
- [5] ASKNE J, NORDIUS H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data[J]. Radio Science, 1987, 22(3): 379-386.
- [6] 姚宜斌, 赵庆志. GNSS 对流层水汽监测研究进展与展望[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 935-952.
YAO Yibin, ZHAO Qingzhi. Research progress and prospect of monitoring tropospheric water vapor by GNSS technique[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(6): 935-952(in Chinese).
- [7] DUAN J, BEVIS M, FANG P, et al. GPS meteorology: direct estimation of the absolute value of precipi-

- table water[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1996, 35(6): 830-838.
- [8] 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 Shirong, ZHANG Shuangcheng, LIU Jingnan. Precision analysis of precise point positioning based tropospheric delay estimation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(8): 788-791(in Chinese).
- [9] WEBER G, MERVART L, LUKES Z, et al. Real-time clock and orbit corrections for improved point positioning via NTRIP[C]// Proceedings of 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2007). Fort Worth: ION, 2007.
- [10] LI B, GE H, BU Y, et al. Comprehensive assessment of real-time precise products from IGS analysis centers [J]. Satellite Navigation, 2022, 3(1): 12.
- [11] LIANG H, CAO Y, WAN X, et al. Meteorological applications of precipitable water vapor measurements retrieved by the national GNSS network of China[J]. Geodesy and Geodynamics, 2015, 6(2): 135-142.
- [12] ZHAO C, ZHANG B, LI W, et al. Simultaneous retrieval of PWV and VTEC by low-cost multi-GNSS single-frequency receivers[J]. Earth and Space Science, 2019, 6(9): 1694-1709.
- [13] STEPNIAK K, PAZIEWSKI J. On the quality of tropospheric estimates from low-cost GNSS receiver data processing[J]. Measurement, 2022, 198: 111350.
- [14] MARUT G, HADAS T, KAPLON J, et al. Monitoring the water vapor content at high spatio-temporal resolution using a network of low-cost multi-GNSS receivers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-14.
- [15] ZHANG H, YUAN Y, LI W, et al. GPS PPP-derived precipitable water vapor retrieval based on T_m/P_s from multiple sources of meteorological data sets in China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmosphere, 2017, 122(8): 4165-4183.
- [16] 范士杰, 袁建飞, 刘焱雄, 等. GPT/2 模型用于 GPS 大气可降水汽反演的精度分析[J]. 测绘工程, 2016, 25(3): 1-5.
FAN Shijie, ZANG Jianfei, LIU Yanxiong, et al. Accuracy analysis on GPS precipitable water vapor inversion using GPT/2 models[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2016, 25(3): 1-5(in Chinese).
- [17] 莫智翔, 黄玲, 郭希, 等. 利用 ERA5 资料进行桂林地区 GNSS 水汽反演精度分析 [J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2021, 13(2): 131-137.
MO Zhixiang, HUANG Ling, GUO Xi, et al. Accuracy of ERA5 reanalysis data in retrieving GNSS precipitable water vapor over Guilin[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2021, 13(2): 131-137(in Chinese).
- [18] HUANG L, MO Z, LIU L, et al. Evaluation of hourly PWV products derived from ERA5 and MERRA-2 over the Tibetan Plateau using ground-based GNSS observations by two enhanced models[J]. Earth and Space Science, 2021, 8(5): e2020EA001516.
- [19] LI T, WANG L, CHEN R, et al. Refining the empirical global pressure and temperature model with the ERA5 reanalysis and radiosonde data[J]. Journal of Geodesy, 2021, 95: 1-17.
- [20] PANY T, PESEC P, STANGL G. Elimination of tropospheric path delays in GPS observations with the ECMWF numerical weather model[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A, 2001, 26(6-8): 487-492.
- [21] ZHANG H, YUAN Y, LI W. Real-time wide-area precise tropospheric corrections (WAPTCs) jointly using GNSS and NWP forecasts for China[J]. Journal of Geodesy, 2022, 96(6): 44.
- [22] CHEN B, YU W, WANG W, et al. A global assessment of precipitable water vapor derived from GNSS zenith tropospheric delays with ERA5, NCEP FNL, and NCEP GFS products[J]. Earth and Space Science, 2021, 8(8): e2021EA001796.
- [23] LANDSKRON D, BÖHM J. VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions [J]. Journal of Geodesy, 2018, 92: 349-360.
- [24] LI L, ZHANG H, YUAN Y, et al. On the real-time tropospheric delay estimates using low-cost GNSS receivers and antennas[J]. GPS Solutions, 2024, 28(3): 1-13.
- [25] HADAS T, HOBIGER T, HORDYNIEC P. Considering different recent advancements in GNSS on real-time zenith troposphere estimates[J]. GPS Solutions, 2020, 24(4): 99.
- [26] SAASTAMOINEN J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites[J]. The Use of Artificial Satellites for Geodesy, 1972, 15: 247-251.

(编辑:孟彬)