

地基北斗大气水汽反演及其精度分析

刘佳¹, 刘艺朦², 葛艳斌³

¹山西省大气探测技术保障中心, 山西 太原

²海南省气象探测中心, 海南 海口

³山西省气象局机关服务中心, 山西 太原

收稿日期: 2024年4月29日; 录用日期: 2024年7月10日; 发布日期: 2024年7月18日

摘要

本文研究了基于北斗三号全球卫星导航系统(BDS-3)的大气水汽反演技术及其精度分析。大气水汽是气象演变中的重要参数, 对降水、天气系统演变和全球气候变化等具有重要影响。传统的大气水汽探测方法存在成本高、时空分辨率低等问题。因此, 本文利用北斗三号地球静止轨道(GEO)卫星播发的PPP-B2b信号, 采用实时精密单点定位技术, 实现了台站处分布式高时效、高精度对流层延迟解算和大气水汽含量反演。在上海、河池和海口三个地区进行了水汽试验, 并利用同址探空和GPS水汽数据进行试验数据准确性对比评估分析。结果表明, 实时水汽产品的平均RMS在3 mm左右, 与目前准业务运行的GPS水汽产品精度相当。该研究为大气水汽含量反演、水汽业务建设提供了重要的参考依据, 对于中小尺度极端强对流天气系统监测、台风监测和短临预报具有重要的应用价值。

关键词

北斗三号, 精密单点定位, 大气水汽反演

Retrieval of Atmospheric Water Vapor from Beidou System and Its Accuracy Analysis

Jia Liu¹, Yimeng Liu², Yanbing Ge³

¹Shanxi Provincial Atmospheric Detection Technology Support Center, Taiyuan Shanxi

²Hainan Provincial Meteorological Observation Center, Haikou Hainan

³Shanxi Provincial Meteorological Bureau Organ Service Center, Taiyuan Shanxi

Received: Apr. 29th, 2024; accepted: Jul. 10th, 2024; published: Jul. 18th, 2024

Abstract

This paper investigates the atmospheric water vapor retrieval technology based on the BeiDou-3

文章引用: 刘佳, 刘艺朦, 葛艳斌. 地基北斗大气水汽反演及其精度分析[J]. 自然科学, 2024, 12(4): 703-711.

DOI: 10.12677/ojns.2024.124080

Global Satellite Navigation System (BDS-3) and analyzes its accuracy. Atmospheric water vapor is a crucial parameter in meteorological evolution, significantly impacting precipitation, weather system evolution, and global climate change. Traditional methods for detecting atmospheric water vapor have issues such as high cost and low spatial and temporal resolution. Therefore, this paper utilizes the PPP-B2b signal broadcast by the BeiDou-3 Geostationary Orbit (GEO) satellite, adopting real-time precise point positioning technology to achieve distributed, high-efficiency, high-precision tropospheric delay resolution, and atmospheric water vapor content retrieval at stations. Water vapor experiments were conducted in Shanghai, Hechi, and Haikou, and the accuracy of the experimental data was compared and evaluated using collocated radiosonde and GPS water vapor data. The results show that the average RMS of real-time water vapor products is around 3 mm, which is comparable to the accuracy of currently quasi-operational GPS water vapor products. This study provides an important reference for atmospheric water vapor content retrieval and water vapor service construction, and has significant application value for monitoring small and medium-scale extreme severe convective weather systems, typhoon monitoring, and short-term forecasting.

Keywords

BeiDou-3, Precise Point Positioning, Atmospheric Water Vapor Retrieval

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大气水汽(Precipitable Water Vapor, PWV)是地球大气中的重要组成部分,其变化与降水直接相关,并在大气能量传输、天气系统演变、大气辐射收支、全球气候变化等多种气象演变中扮演着重要的角色[1]。因此,系统全面地监测并分析水汽的时空分布对研究各种复杂的气候特征、短期天气预报和气候灾害预警具有重要意义。

传统的大气水汽探测方法主要包括无线电探空站、微波辐射计、雷达观测和卫星遥感等,但因其使用费用昂贵,且时空分辨率低,离监测和预报中小尺度灾害性天气的要求还有很大差距。在上世纪 80 年代,Askne 等人提出基于 GPS 技术探测大气水汽的构想,通过实验发现大气湿延迟随着 GNSS 信号传播路径上的大气可降水量的升高而增加[2]后,GNSS 的反演在气象领域的应用越来越广泛。2002 年,Gradinarsky 等人研究表明利用地基 GNSS 资料可以反映大气水汽含量的长期动态变化,为地基 GNSS 在监测水汽动态变化方面奠定了基础[3]。2017 年,Benevides 等结合 Galileo 与 GPS 系统进行了水汽探测讨论,有效提高了水汽反演精度[4]。目前,美国国家宇航局已经研究出了可以利用 GNSS 数据实时获取大气可降水量的方法。随着 GNSS 气象学的发展与应用,各国都逐渐建立起了 GNSS 观测网,加快了对 GNSS 气象学的研究和应用。在我国,GNSS 研究也受到了广泛关注。赵静旻等验证了在中国地区利用 ERA-Interim 资料获取气象参数的可行性并且计算通过气象参数得到 GPS/PWV 的精度[5]。王俊杰等综合利用 GPS 和 NCEPCFSv2 来提高 PWV 的估测精度[6]。张双成还将 GNSS 水汽结果与 $PM_{2.5}$ 进行对比,得出了 GNSS-PWV 与 $PM_{2.5}$ 之间存在一定的相关性,有利于局部地区的雾霾监测[7]。黄良珂等证明了 GPT 系列模型计算出的大气平均加权温度(T_m)精度较高,可用于水汽计算[8]。

虽然很多学者对于 GNSS 气象学的研究已经取得了一定成果,但这些研究普遍为准实时,通常存在

十分钟到数小时的时延,不能很好地满足短时天气预报特别是剧烈极端天气的应用需求。随着中国北斗卫星导航系统的不断地完善,现已能提供覆盖全球的高精度定位服务,并且应用于气象领域研究。鉴于此情况,本文通过北斗三号地球静止轨道(GEO)卫星播发 PPP-B2b 信号,采用实时精密单点定位技术进行数据处理,实现台站处分布式高时效、高精度对流层延迟解算和大气水汽含量反演,创新性实现台站级水汽产品的实时提供,满足中小尺度极端强对流天气系统监测、台风监测和短临预报需求。

2. 大气水汽反演原理及方法

2.1. 北斗高精度实时 PPP 处理

采用平方根信息滤波(SRIF),对北斗观测数据进行实时 PPP 处理,解算获取对流层天顶总延迟(ZTD)。对流层天顶总延迟(ZTD)包含两部分,即天顶静力延迟 ZHD (也称为天顶干延迟)和天顶非静力延迟 ZWD (也称为天顶湿延迟)。在给定测站精确气压的情况下,ZHD 通过模型(Saastamoinen 模型)精确求得(优于 1 mm),而 1 hPa 的气压误差可造成近 3 mm 的 ZHD 误差。在 ZTD 解算中使用先验温度气压模型提供的先验气压计算测站处的先验 ZHD,ZWD 则作为待估参数进行估计,将两者之和作为最终 ZTD 估值。由于干延迟投影函数和湿延迟投影函数差异小(虽然低高度角的差异增大,但可通过对观测值高度角加权的策略减小其影响),先验 ZHD 的误差绝大部分能被待估的 ZWD 吸收,因此,即使在测站处气象观测缺失的情况下,通过先验气压温度模型提供 ZHD 仍然能够获得高精度的 ZTD 产品。

2.2. 高精度大气水汽的反演

高精度大气水汽的反演主要有两步,首先将气象观测值改正到 GNSS 天线处,其后利用改正后的气压值求出干延迟分量(ZHD),进而从 ZTD 中扣除干延迟(ZHD)分量获取湿延迟分量(ZWD);第二步先是根据台站处的改正后气温观测值和 Tm-Ts 转换模型计算得到的 Tm,之后将 ZWD 转换得到时间分辨率优于 5 分钟的高精度大气水汽产品,解算结果保存在台站本地并通过网络传输上传至中心服务器,具体的 PWV 反演流程如下:

根据获得的测站处气压 Ps,基于 Saastamoinen 模型计算天顶静力延迟 ZHD 将 ZHD 从 ZTD 中分离,获得天顶湿延迟 ZWD。

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (1)$$

根据获得的 Tm, 计算转换系数 Π

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho_w R_v \left[(k_3/T_m) + k'_2 \right]} \quad (2)$$

其中, ρ_w 表示液体水的密度; R_v 为水汽的气体常数(461.51 J/K/kg); k'_2 和 k_3 为大气折射率常数,其值分别为 (17 ± 10) K/hPa 和 $k_3 = (377,600 \pm 400)$ K²/hPa。

将 ZWD 转换为 PWV。

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \quad (3)$$

先验气温气压模型(如 GPT 和 GPT2 模型)获得的气压精度一般在 5 hPa 左右,少数区域误差大于 10 hPa,因此为了获取高精度的 ZWD 产品,必须采用气象观测值来计算 ZHD。然而通常气象观测设备和 GNSS 天线有一定的高度差异,地表附近 10 m 的高程差异对应的气压差异超过了 1 hPa,进而给 ZHD 引入近 3 mm 的误差。为了获得尽可能高精度 ZWD 产品,需要考虑高度差异的影响,将气象观测值改正到 GNSS 天线处。而对水平位置的差异带来的水平梯度变化可忽略其影响。对于气压改正的流程如图 1 所示。

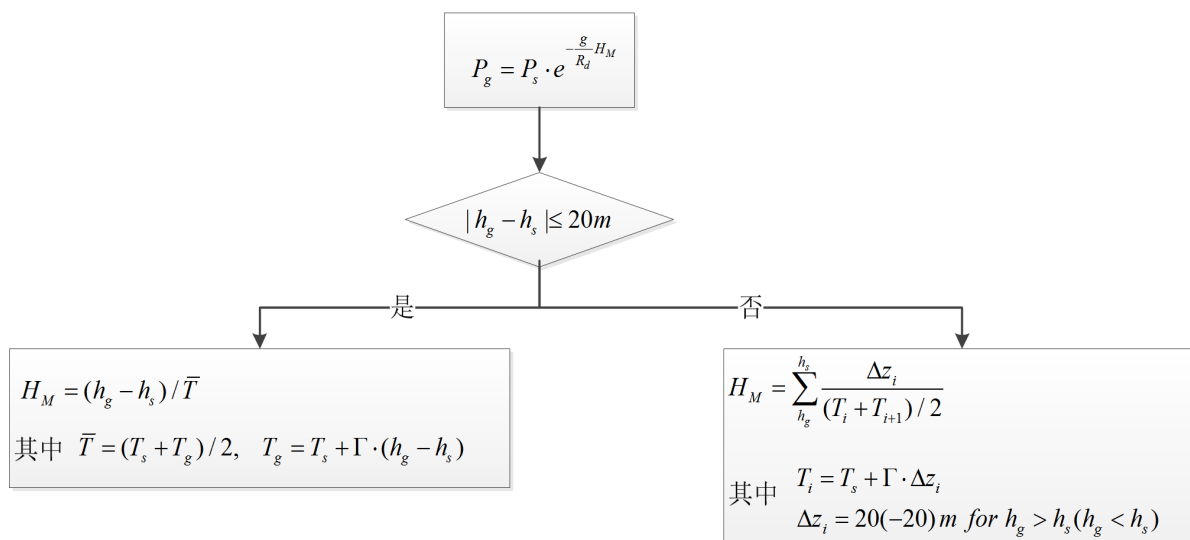


Figure 1. Flow chart of air pressure elevation correction

图 1. 气压高程改正流程图

其中下标 g 表示 GNSS 天线，下标 s 表示气象观测设备。 P 、 T 、 h 分别表示气压(hPa)、温度(K)和高程(m)。重力加速度 $g = 9.8067 \text{ m/s}^2$ ，干空气气体常数 $R_d = 287.058 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，温度随高度变化率 $\Gamma = -6.5 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

获得高精度湿分量 ZWD 后，再根据台站处的气温观测和建立的 T_m - T_s 转换模型计算得到的 T_m ，转换得到时间分辨率优于 5 分钟的台站处高精度大气水汽产品。

3. 数据获取及实验方法

3.1. 数据获取

试验在上海、河池和海口三个地方监测站进行部署，利用司南提供的 K803 接收机接收原始观测数据，并将原始数据流转发至解算主机上。同时主机通过 TCP/IP 接取 IGS (国际 GNSS 服务组织)或武汉大学服务器上的实时精密产品和气象数据流，完成数据处理并生成分辨率分别为五分钟和一小时的水汽产品。每周收集整理试验数据，跟踪评估实时水汽自动观测软件的稳定性、可靠性、时效性，以台站探空数据和现行 GPS/MET 水汽业务数据为参考标准，比对北斗实时水汽观测大气水汽总量(PWV)，检验评估被其观测精度和准确性。

3.2. 实验方法

3.2.1. 无线电探空水汽数据处理

从探空资料计算大气可降水量需先利用温度(t)、气压(p)、相对湿度(U)以及饱和水汽压(E)计算出水汽压(e)得到水汽混合比湿(q):

$$E = 6.112 \exp\left(\frac{at}{b+t}\right) \quad (4)$$

当 $t > 0^\circ\text{C}$ 时， $a = 17.27$ ， $b = 237.3$ ；当 $t < 0^\circ\text{C}$ 时， $a = 21.87$ ， $b = 265.5$ 。

$$e = \frac{UE}{100} \quad (5)$$

$$q = \frac{\varepsilon e}{p - (1 - \varepsilon)e} \quad (6)$$

再通过积分计算 PWV:

$$\text{PWV} = \frac{1}{g} \int_0^{p_0} q dp \quad (7)$$

其中 $\varepsilon = 0.622$, 表示经验常数; p_0 为测站地面气压; g 为地球重力加速度。

最终即可通过公式(7)计算得到无线电探空 PWV 值。

3.2.2. 评估方法

评估方法是将实时解算的水汽产品与同一时刻气象局 GAMIT 软件准实时解算的 GPS 水汽产品和无线电探空水汽结果进行比较, 计算一段时间内的均方根误差 RMS, RMS 计算公式如下:

$$\text{RMS}_{\text{PWV}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{PWV}_{\text{RT}} - \text{PWV}_{\text{REF}})^2}{n}} \quad (8)$$

式中 n 为样本个数, PWV_{RT} 为实时水汽, PWV_{REF} 为参考水汽。

4. 实验结果

4.1. 完整性分析

水汽产品的完整性分析主要统计一小时分辨率水汽产品和五分钟分辨率水汽产品, 统计方法为实际解算生成的水汽产品数量除以理论水汽产品数量。

4.1.1. 一小时分辨率产品完整性

统计时段为 2023 年 7 月 1 号至 10 月 31 号, 统计产品为 1 小时分辨率水汽产品, 如表 1 所示。

1) 河池站产品完整率为 85.08%, 因缺失精密产品占比 4.47%, 因设备维护或硬件故障导致数据缺失占比 6.40%, 因软件调试或误操作导致中断占比 4.05%。

2) 海口站产品完整率为 74.80%, 因缺失精密产品占比 3.71%, 因设备维护或硬件故障导致数据缺失占比 19.67%, 因软件调试或误操作导致中断占比 1.73%。

3) 宝山站产品完整率为 89.14%, 因缺失精密产品占比 6.27%, 因设备维护或硬件故障导致数据缺失占比 0.84%, 因软件调试或误操作导致中断占比 3.74%。

Table 1. 1 Hour product integrity statistics

表 1.1 小时产品完整性统计

测站名	河池	海口	宝山
产品完整率	85.08%	74.80%	89.14%
精密产品缺失	4.47%	3.71%	6.27%
设备维护或硬件故障	6.40%	19.67%	0.84%
软件重启或中断	4.05%	1.73%	3.74%

4.1.2. 五分钟分辨率产品完整性

统计时段为 7 月 1 号至 10 月 31 号, 统计产品为 1 小时分辨率水汽产品, 如表 2 所示。

- 1) 河池站的产品完整率为 85.32%，单天完整率超过 90%占比 70.49%，未缺失产品占比 38.52%；
- 2) 海口站的产品完整率为 75.34%，单天完整率超过 90%占比 59.84%，未缺失产品占比 33.00%；
- 3) 宝山站的产品完整率为 89.01%，单天完整率超过 90%占比 70.49%，未缺失产品占比 39.00%。

Table 2. 5 Minutes product integrity statistics
表 2. 5 分钟产品完整性统计

测站名	河池	海口	宝山
产品完整率	85.32%	75.34%	89.01%
完整率大于 90%占比	70.49%	59.84%	70.49%
完整率为 100%占比	38.52%	33%	39%

4.2. 精度分析

统计的产品为 1 小时分辨率的水汽产品，统计时段分为 7 月~8 月和 9 月~10 月两段时间，在试验测试初期由于解算软件算法功能有缺陷，播发精密产品的服务器不稳定等等原因导致解算结果较差。在经过不断修改与完善后，9 月至 10 月水汽解算更为稳定。

4.2.1. 7~8 月水汽产品精度

统计 7 月~8 月的水汽结果如表 3 所示，以气象局 GPS 解算软件作为参考，河池站平均 RMS 为 6.52 mm，相关系数为 0.69。上海站平均 RMS 为 24.65 mm，相关系数为 0.38。海口站平均 RMS 为 7.36 mm，相关系数为 0.78。

Table 3. Statistical accuracy of water vapor products from July to August
表 3. 7 月~8 月水汽产品精度统计表

7~8 月	与 GPS 对比			与探空对比		
	河池站	上海站	海口站	河池站	上海站	海口站
平均偏差(mm)	3.3	13.17	3.9	4.97	14.41	4.72
RMS (mm)	6.52	24.65	7.36	10.45	25.05	9.57
STD (mm)	6.51	23.91	7.32	10.3	23.76	9.53
相关性	0.69	0.38	0.78	0.77	0.43	0.8

以无线电探空结果作为参考，河池站平均 RMS 为 10.45 mm，相关系数为 0.77。上海站平均 RMS 为 25.05 mm，相关系数为 0.43。海口站平均 RMS 为 9.57 mm，相关系数为 0.8。

图 2 为 7~8 月海口、河池和宝山水汽产品时序图，上海站在 7 月 15 号~7 月 27 号水汽解算异常，主要是由于 14 号精密产品出现跳变，大量粗差进入滤波器中，导致后面多天解算异常，在 27 号重启程序后恢复正常。

在 7 月份的试验中，接收精密产品的服务器是国际 IGS 服务器，由于网络环境导致其非常不稳定，影响解算的完整性和精度(开始解算时需要重新收敛，这段时间水汽反演精度较差)。在 8 月份的试验中更换连接国内服务器(由武汉大学维护的产品播发服务器)，8 月份的解算结果也明显有提升。

8月21号左右,三个台站的水汽解算均发生大的跳变,主要是由于当天精密产品有跳变,导致解算异常。

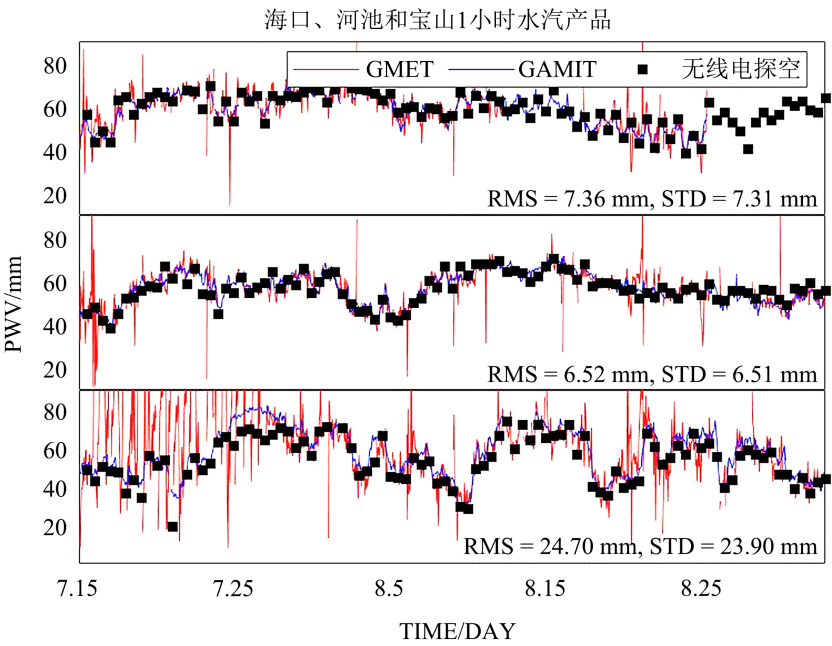


Figure 2. Time sequence diagram of water vapor product from July to August
图 2. 7~8 月水汽产品时序图

4.2.2. 9~10 月水汽产品精度

统计 9 月~10 月的水汽结果如表 4 所示,以基于 GPS 观测采用 GAMIT 软件准实时解算结果作为参考,河池站平均 RMS 为 2.33 mm,相关系数为 0.95。上海站平均 RMS 为 4.15 mm,相关系数为 0.97。海口站平均 RMS 为 2.2 mm,相关系数为 0.93。

Table 4. Statistical accuracy of water vapor products from September to October
表 4. 9 月~10 月水汽产品精度统计表

9~10 月	与 GPS 对比			与探空对比		
	河池站	上海站	海口站	河池站	上海站	海口站
平均偏差(mm)	1.53	2.9	1.5	2.81	3.22	2.33
RMS (mm)	2.33	4.15	2.2	3.26	4.14	3.12
STD (mm)	2.32	4.05	2.2	2.18	4.14	3.00
相关性	0.95	0.97	0.93	0.97	0.97	0.95

以无线电探空结果作为参考,河池站平均 RMS 为 3.26 mm,相关系数为 0.97。上海站平均 RMS 为 4.14 mm,相关系数为 0.97。海口站平均 RMS 为 3.12 mm,相关系数为 0.95。

如图 3 所示,9 月至 10 月的水汽反演试验中,由于播发北斗精密的产品恢复正常,所以在试验中加入了北斗卫星,使用北斗、GPS 和伽利略的卫星进行解算,水汽反演精度明显优于前两个月。

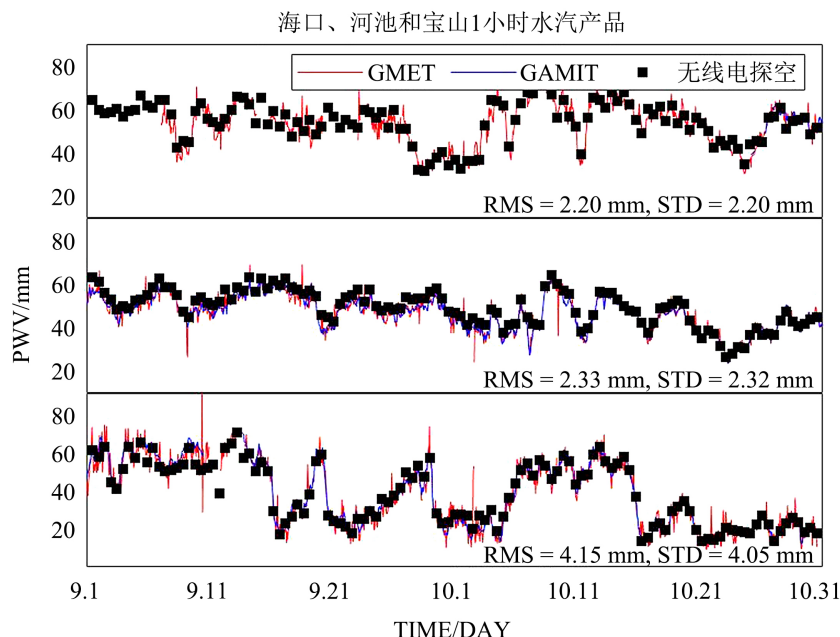


Figure 3. Time sequence diagram of water vapor product in October
图 3. 9~10 月水汽产品时序图

5. 结语

本文基于北斗三号全球卫星导航系统提供的精密单点定位服务, 进行大气水汽反演。选择上海、河池和海口三个地区进行水汽试验, 并利用同址探空和 GPS 水汽数据进行试验数据准确性比对评估分析, 得到以下结论:

1) 通过对实时水汽产品完整性分析得出, 数据完整率平均值为 83.22%, 排除由播发精密产品服务器不稳定或硬件问题等外部因素造成的数据缺失后, 水汽产品的完整率平均值可达 96.82%。

2) 解算系统在运行前期(7 月至 8 月)时, 由于软件算法不完善和精密产品不稳定等等原因导致解算水汽产品精度较差。在经过一系列改进与优化后, 解算系统可以稳定解算出高精度的水汽产品, 统计 9 月~10 月的实时水汽产品的平均 RMS 在 3 mm 左右, 与目前准业务运行的 GPS 水汽产品精度相当。

总之, 通过北斗卫星播发 PPP-B2b 信号, 实现单站小时和分钟级的水汽产品反演, 具有较高的精度, 该研究结果可为大气水汽含量反演、水汽业务建设提供重要的参考依据。

参考文献

- [1] 姚宜斌, 张顺, 孔建. GNSS 空间环境学研究进展和展望[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1408-1420.
- [2] Askne, J. and Nordius, H. (2016) Estimation of Tropospheric Delay for Microwaves from Surface Weather Data. *Radio Science*, **22**, 379-386. <https://doi.org/10.1029/RS022i003p00379>
- [3] Gradinarsky, L.P., Johansson, J.M., Bouma, H.R., et al. (2002) Climate Monitoring Using GPS. *Physics & Chemistry of the Earth Parts A/B/C*, **27**, 335-340. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00009-8](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00009-8)
- [4] Benevides, P.C.G., Pardini, M., de Paula, E.R., et al. (2017) Comparative Analysis between Galileo and GPS Systems to Detect Water Vapour Changes in the Atmosphere. *GPS Solutions*, **21**, 1-12.
- [5] 赵静昀, 解琨, 刘经南. 利用 ERA-Interim 资料在中国区域获取高精度气象参数的方法及其在 GPS/PWV 解算中的应用[J]. 地球物理学报, 2018, 61(5): 1725-1739.
- [6] 王俊杰, 何秀凤. 综合 GPS 和 NCEP CFSv2 的区域 PWV 估计方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017(3): 328-333.

-
- [7] 张双成, 赵立都, 吕旭阳, 等. GPS 水汽在雾霾天气监测中的应用研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(3): 451-456.
 - [8] 黄良珂, 李琛, 王浩宇, 等. 基于 GPT2w 模型计算中国地区对流层加权平均温度的精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(5): 496-501.