



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

低成本北斗/GNSS 终端高时效水汽监测方法和关键技术研究

作者姓名: 李罗红

指导教师: 袁运斌 研究员

中国科学院精密测量科学与技术创新研究

学位类别: 工学博士

学科专业: 测绘科学与技术

培养单位: 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院

2025 年 6 月

**Research on the method and key technologies of timely water
vapor monitoring with low-cost BDS/GNSS terminals**

A dissertation/thesis submitted to

University of Chinese Academy of Sciences

in partial fulfillment of the requirement

for the degree of

Doctor of Engineering

in Surveying and Mapping

By

Luohong Li

Supervisor: Professor Yunbin Yuan

Innovation Academy for Precision Measurement Science and

Technology, Chinese Academy of Sciences

June 2025

中国科学院大学
研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。承诺除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体享有著作权的研究成果，未在以往任何学位申请中全部或部分提交。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人或集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日 期：

中国科学院大学
学位论文使用授权声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院大学有关收集、保存和使用学位论文的规定，即中国科学院大学有权按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则，保留并向国家指定或中国科学院指定机构送交学位论文的电子版和印刷版文件，且电子版与印刷版内容应完全相同，允许该论文被检索、查阅和借阅，公布本学位论文的全部或部分内容，可以采用扫描、影印、缩印等复制手段以及其他法律许可的方式保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：

摘要

大气水汽是一种的重要温室气体，它在大气能量交换、云雨雷电等天气事件的形成与演变、全球水循环以及地球-大气系统的能量平衡中扮演着关键角色。随着全球气候变暖，极端天气事件愈发频繁和强烈，诸如极端强降水、台风、洪涝等突发性和局地性显著的气象灾害给人类生产生活带来严重威胁。作为表征极端天气和气候变化的重要参数，大气水汽的高时空分辨率高时效监测对于灾害性天气的预报预警和气候变化研究具有重要意义。

目前，现有的实时水汽监测模式依赖于高成本的测地型全球卫星导航系统（Global Navigation Satellite Systems, GNSS）终端和气象观测设备，其建设维护费用高，在短期内难以扩充。廉价的北斗/GNSS 终端具有“低成本、高精度”的优点，是现有水汽监测网络潜在的加密设备，但是其在高时效水汽监测上还存在研究局限和应用瓶颈。为实现高密度、高精度和高时效的精细水汽监测，本文以低成本北斗/GNSS 终端设备为核心，围绕实时对流层精确估计方法及影响因素、实时水汽反演辅助参数模型及服务和低成本高时效水汽监测方法及其复杂环境应用三方面开展研究。主要的研究工作和创新点总结如下：

1. 提出了基于超短基线的相对 PCV 估计方法并探究了低成本天线 PCV 的特性及其对 ZTD 估计的影响，同时分析了低成本设备的实时 ZTD 估计质量及其在扰动天气下的表现。

高精度天顶对流层延迟（Zenith Total Delay, ZTD）估计是利用低成本北斗/GNSS 终端获取高精度水汽资料的基础。为提高低成本设备 ZTD 解算的精度和一致性，本文分析了低成本天线的相位中心变化（Phase Center Variation, PCV）改正对 ZTD 估计的影响并给出了量化结果，同时提出了一种基于超短基线相对定位计算天线相对 PCV 差异的方法并分析了低成本天线的 PCV 特征和规律。为探究 ZTD 的估计精度和可靠性，本文布设了两组独立的 GNSS 阵列开展为期两周的实时实验，对比分析了低成本在后处理和实时模式下 ZTD 估计质量以及与测地型设备结果的差异，并利用武汉强降雨事件探究了低成本设备在对流层发生剧烈扰动变化时的 ZTD 实时估计表现。结果表明：低成本设备可以在后处理和实时分别获得优于 6.3 mm 和优于 10.0 mm 的对流层延迟估计，且估计精度在对流层延迟发生约 224 mm 扰动变化的情况下仍表现稳定。在季节上，冷季的 ZTD 估计精度要略优于暖季。通过比较低成本/测地型设备在后处理和实时模式下的 ZTD 差异，发现低成本设备的 ZTD 与并址测地型设备的估计结果基本相当，在实时获取高精度对流层延迟上具有性价比优势，同时结果也表明实时精密产品和处理策略是引起实时 ZTD 精度损失的主要因素。在雨强超过 33 mm/h 的强降雨

事件中，低成本设备的实时对流层估计能够较为准确地刻画 ZTD 的趋势变化，并具有高时效和高时间分辨率的优势，在面向极端天气的水汽反演中具有显著的应用潜力。

2. 提出并建立了基于数值天气预报的实时水汽反演对流层辅助参数 ZHD 和 Tm 模型，并命名为 HDTM 模型，同时建立了对应的应用方法和实时服务模式。

天顶对流层静力学延迟（Zenith Hydrostatic Delay, ZHD）和大气加权平均温度（Weighted Mean Temperature, Tm）是水汽反演过程中的重要关键参数，它的实时获取也是在无并址气象设备时制约 GNSS 台站反演实时水汽的瓶颈问题。为解决实时水汽反演中高精度 ZHD 和 Tm 的高时效获取问题，本文利用两种典型的数值天气模式 NCEP-GFS 和 ECMWF-IFS，研发了实时水汽反演辅助参数模型（HDTM）并建立了对应的应用方法和服务模式，为无并址气象传感器的台站提供可靠的 ZHD 和 Tm 参数。为详细探讨 HDTM 模型的应用精度，本文通过 HDTM 模型与 ERA5、探空数据和实测气压等多源数据的对比实验，分别验证了 ZHD 和 Tm 在中国区域的建模精度和应用表现，还通过对比 HDTM 模型与 VMF3 产品和 GPT3 模型在模拟站点参数短期变化上的差异，详细论证了 HDTM 模型在表现短时扰动及变化上更具优势。最后，以覆盖中国的 GNSS/气象观测(GNSS/MET) 网络的水汽产品为参考，本文详细讨论分析了 HDTM 模型 ZHD 和 Tm 参数引起的大气可降水量（Precipitable Water Vapor, PWV）反演误差，以及与基于实测气象参数的水汽反演方法的结果一致性。研究结果表明：以 ERA5 为参考，HDTM 模型 ZHD 和 Tm 的格网点精度分别优于 2.7 mm 和 1.2 K；以实测结果为参考，ZHD 和 Tm 的站点精度分别优于 3.2 mm 和 1.5 K；以 953 个测站的 GNSS/MET 的水汽产品为参考，HDTM 模型 ZHD 和 Tm 参数引起的 PWV 平均误差在 2.1 mm 左右。除此之外，1 小时间隔的 HDTM 模型能够较好地反映参数的短时变化。以站点实测结果为参考，HDTM-Tm 相较于 Bevis 模型在均方根误差上减少了 40%；HDTM-ZHD 均方根误差要较 VMF3 ZHD 明显减少约 50%。以上结果充分说明，HDTM 模型具有高时效和高时间分辨率优势，能够在引入反演差异小于 2.1 mm 的前提下，为无并址气象设备的台站提供 ZHD 和 Tm 参数，进而辅助其实时水汽反演。

3. 提出了无实测气象参数依赖的实时水汽反演方法，并开发了低成本北斗/GNSS 实时水汽监测终端，同时验证了新方法和终端在海洋浮标、长航时调查船和极端天气等复杂场景下的应用表现。

为解决高时效水汽反演方法在复杂场景下应用的瓶颈问题，本文基于 HDTM 模型提出了无实测气象参数依赖的水汽反演方法和服务模式，并从硬件平台、应用场景和天气响应三方面论证了新型 GNSS 水汽监测模式的应用优势。首先，本文以武汉市强降水和台风“三巴”两次极端天气事件为例，验证了提出的水汽方

法在监测强降水过程中水汽变化的应用表现。研究结果表明：新方法可以摆脱实测气象参数的依赖，其反演的 PWV 与参考结果基本一致。相较于 6 小时分辨率的 TUW-PWV，新方法还能以较高的时间分辨率清晰反映水汽蓄积和衰减过程中的细节变化，能够准确捕获降水事件中的水汽峰值，足以证明其在扰动天气变化下的可靠性能。然后，针对于海洋水汽资料难获取的问题，本文建立了适用于海洋动态观测的低成本高时效水汽监测方法，利用低成本终端观测值解算 ZTD，然后采用 HDTM 模型来提供终端动态位置的水汽反演辅助参数。研究结果表明：两组低成本浮标的 ZTD 估计质量分别为 9.6 mm 和 10.4 mm，反演的水汽精度为 1.6 mm。船载低成本终端可以在动态环境下获得精度优于 6.0 mm 的 ZTD，而 HDTM 模型为动态船载终端提供的 ZHD 精度为 1.8 mm，反演的 PWV 与传统方法的差异仅为 0.8 mm。以上结果充分说明，本文提出的新方法可以显著改进海洋水汽资料获取的便捷性，未来可以结合北斗 PPP-B2b 实现兼具高精度和高时效的低成本海洋水汽监测服务。最后，本文研制了一种低成本且无温压观测依赖的实时 GNSS 水汽监测终端和应用方案，造价成本在 1500 元人民币左右，约为现有测地型水汽网络 GNSS 设备的 1%。通过将该北斗/GNSS 水汽监测终端布设在武汉气象站进行长期实时验证，约 50 天的实时实测结果表明，利用低成本终端反演的 PWV，与探空观测和基于气象参数的水汽反演结果差异分别在 2.0 mm 和 0.5 mm，且在降水事件中没有明显的精度损失。以上结果充分说明本文提出的水汽监测方法和终端可以满足复杂天气条件和海洋动态场景的高精度水汽应用的精度要求，为开展高时效水汽监测应用提供研究参考。

关键词：全球卫星导航系统(GNSS)，天线相位中心变化，实时对流层延迟估计，低成本北斗/GNSS 终端，HDTM 模型，实时水汽反演，海洋水汽监测，极端天气

Abstract

Atmospheric water vapor is an important greenhouse gas that plays a key role in atmospheric energy exchange, the formation and evolution of weather events such as clouds, rain, and lightning, the global water cycle, and the energy balance of the Earth-atmosphere system. With global climate warming, extreme weather events are becoming more frequent and intense, such as extreme heavy rainfall, typhoons, and floods, which pose significant threats to human production and daily life. As an important index for characterizing extreme weather and climate change, high spatiotemporal resolution and high-timeliness monitoring of atmospheric water vapor is of great significance for the forecasting and early warning of disaster weather and climate change research.

Currently, existing real-time water vapor monitoring systems rely on high-cost geodetic GNSS (Global Navigation Satellite System) terminals and meteorological equipment, which are expensive to construct and maintain and difficult to expand in the short term. Low-cost BDS (BeiDou Navigation Satellite System)/GNSS terminals, with advantages of low cost and high accuracy, have potential for densifying the existing water vapor monitoring network, but there are still research limitations and application bottlenecks in real-time water vapor monitoring. To achieve high-density, high-precision, and high-timeliness water vapor monitoring, this study focuses on low-cost BDS/GNSS terminal equipment and explores methods for real-time tropospheric estimation, auxiliary parameter models for real-time water vapor retrieval, as well as low-cost and high-timeliness water vapor monitoring method and application in complex environments.

The main research work and innovations are summarized as follows:

- 1. A relative PCV estimation method based on ultra-short baselines is proposed, and the characteristics of low-cost antenna PCV and its impact on ZTD estimation are explored. The real-time ZTD estimation quality of low-cost equipment was analyzed, along with its performance under disturbed weather conditions.**

High-precision zenith total delay (ZTD) estimates are the basis for obtaining high-precision water vapor data using low-cost BDS/GNSS devices. To improve the accuracy and consistency of ZTD estimation with low-cost devices, the impact of low-cost antenna PCV (Phase Center Variation) corrections on ZTD estimation is analyzed, and quantitative results of the bias are provided. A method for calculating relative antenna PCV differences based on ultra-short baseline relative positioning is proposed, and the PCV characteristics and regularities of low-cost antennas are analyzed. To investigate the accuracy and reliability of ZTD estimation, two independent groups of co-located GNSS arrays were deployed for a two-week real-time experiment. The ZTD

estimation quality of low-cost equipment in both post-processing and real-time modes was compared with that of geodetic-grade equipment. The real-time ZTD estimation performance of low-cost equipment was further investigated during a heavy rainfall event in Wuhan, where significant tropospheric disturbances occurred. The results show that low-cost equipment can achieve tropospheric delay estimates of better than 6.3 mm in post-processing and better than 10 mm in real-time, with stable performance under approximately 224 mm of tropospheric disturbance. Seasonally, the ZTD estimation accuracy in the cold season is slightly better than in the warm season. A comparison between low-cost and geodetic equipment's ZTD differences in both post-processing and real-time modes reveals that the primary factor causing real-time ZTD accuracy loss is the real-time precision product and processing strategy. However, the ZTD estimates from low-cost equipment are comparable to those of co-located geodetic equipment, offering a cost-effective advantage for real-time high-precision tropospheric monitoring. During heavy rainfall events with precipitation intensity exceeding 33 mm/h, low-cost equipment suffers from deviations and noises caused by weather disturbances, but its real-time ZTD estimation accurately captures the trend of ZTD changes, demonstrating high timeliness and time resolution advantages for tropospheric monitoring and significant application potential in water vapor retrieval for extreme weather events.

2. A numerical weather prediction model-based auxiliary parameters (ZHD and Tm) model for real-time water vapor retrieval is proposed and named HDTM. The corresponding application methods and service models of HDTM are established.

Zenith hydrostatic delay (ZHD) and weighted mean temperature (Tm) are two key parameters in the water vapor retrieval process. Its timely access is a prerequisite for retrieving real-time water vapor without co-located meteorological equipment. To solve the problem of acquiring high-precision ZHD and Tm in real-time water vapor retrieval, this study uses two typical numerical weather prediction (NWP) models, including NCEP-GFS and ECMWF-IFS, to develop an auxiliary parameter model (HDTM), which is suitable for real-time water vapor retrieval. The application methods and service models are established to provide reliable ZHD and Tm parameters for GNSS stations without co-located meteorological sensors. To explore the application accuracy of the HDTM model in the China region, experiments comparing the HDTM model with ERA5, radiosonde data, and actual atmospheric pressure measurements are designed. The modeled accuracy of ZHD and Tm is verified, and the performance in representing parameter diurnal variations and short-term disturbances are discussed. Finally, by referring to water vapor products from the GNSS/MET network covering China, the study analyzes the PWV (Precipitable Water Vapor) retrieval errors caused by the HDTM model's ZHD and Tm parameters and their consistency with water vapor retrieval results based on measured meteorological parameters. The results show that

using ERA5 as a reference, the ZHD and Tm accuracy at grid points in the HDTM model is better than 2.7 mm and 1.2 K, respectively. Using measurements as a reference, the sites accuracy of ZHD and Tm is better than 3.2 mm and 1.5 K, respectively. Referring to GNSS/MET water vapor products from 953 stations, the average error in PWV caused by ZHD and Tm parameters from HDTM model is around 2.1 mm. Moreover, the HDTM model with a 1-hour time interval can accurately reflect short-term parameter variations. Comparing the HDTM-Tm model with the Bevis model shows a 40% improvement in root mean square error (RMSE), while the HDTM-ZHD model's RMSE is about 50% smaller than that of the VMF3-FC ZHD. These results fully demonstrate that the HDTM model has advantages in high timeliness and high time resolution, capable of providing ZHD and Tm parameters for stations without co-located meteorological equipment, assisting in real-time water vapor retrieval with differences of less than 2.1 mm.

3. A new real-time water vapor retrieval method that does not rely on observed meteorological parameters and a low-cost BeiDou/GNSS real-time water vapor monitoring terminal are proposed and verified for their application in dynamic oceanic and extreme weather environments.

To address the bottleneck in applying high-timeliness water vapor retrieval methods in complex environments, this study proposes a water vapor retrieval method and service model based on the HDTM model, which does not rely on measured meteorological parameters. The application advantages of the new GNSS water vapor monitoring model are demonstrated from hardware platforms, application scenarios, and extreme weather response perspectives. First, the proposed water vapor retrieval method is validated through two extreme weather events: heavy rainfall in Wuhan and Typhoon "Sanba". The results show that the new method can eliminate the reliance on measured meteorological parameters, and the retrieved PWV matches the reference results well. Compared with TUW-PWV with a 6-hour resolution and reference results, the new method can reflect the water vapor accumulation and decay processes in detail with higher time resolution, accurately capturing the PWV peak during precipitation events, proving its reliability under disturbed weather conditions. Then, a low-cost and high-timeliness water vapor monitoring method was developed in this study, which is suitable for dynamic marine observations. ZTD was derived from GNSS observations obtained by low-cost terminals, and the HDTM model was employed to provide auxiliary parameters for water vapor retrieval at dynamic terminal positions. The results show that the ZTD estimation of two sets of low-cost buoys is 9.6 mm and 10.4 mm, respectively. The accuracy of retrieved PWV is 1.6 mm. For shipborne low-cost terminals in dynamic environments, the ZTD accuracy is better than 6.0 mm, and the ZHD accuracy provided by the HDTM model is 1.8 mm. The retrieved PWV differs from traditional methods by only 0.8 mm. These results demonstrate that the proposed new method significantly improves the convenience of acquiring oceanic water vapor

data and can be combined with PPP-B2b for high-precision, high-timeliness, low-cost oceanic water vapor monitoring services in the future. Finally, a low-cost real-time GNSS water vapor monitoring terminal was developed, operating without requiring measured temperature and pressure observations. With an approximate cost of 1,500 RMB, this represents only about 1% of the expense of geodetic-grade GNSS equipment currently deployed in existing monitoring networks. Long-term real-time validation of the low-cost terminal at the Wuhan meteorological station for about 50 days shows that the PWV retrieved by the low-cost terminal differs by 2.0 mm from radiosonde observations and 0.5 mm from meteorological parameter-based retrievals, with no significant accuracy loss during precipitation events. These results fully demonstrate that the proposed water vapor monitoring method and terminal in this study can meet the accuracy requirements for high-precision water vapor applications under complex weather conditions and dynamic marine scenarios, providing valuable references for developing high-timeliness water vapor monitoring applications.

Key Words:

Global Navigation Satellite System (GNSS) , Antenna Phase Center Variation (PCV) , Real-time Tropospheric Delay Estimation , Low-cost BDS/GNSS Terminals , HDTM , Real-time Water Vapor Retrieval , Marine Water Vapor Monitoring , Extreme Weather

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 基于 PPP 的 GNSS 实时对流层延迟估计.....	3
1.2.2 GNSS 高时效水汽反演方法研究	5
1.2.3 低成本北斗水汽监测终端及应用研究.....	7
1.3 研究目的与意义.....	8
1.4 研究内容与结构安排.....	9
第 2 章 GNSS 对流层水汽反演的理论基础及方法.....	11
2.1 对流层的基本性质.....	11
2.1.1 大气分层结构.....	11
2.1.2 中性大气折射率.....	12
2.1.3 对流层延迟的计算.....	13
2.2 GNSS 精密单点定位模型及其对流层估计	14
2.2.1 精密单点定位数学模型.....	14
2.2.2 对流层的估计策略.....	17
2.2.3 参数估计方法.....	18
2.2.4 实时精密单点定位.....	20
2.3 GNSS 水汽反演方法和其他水汽反演资料	22
2.3.1 GNSS 水汽反演方法	22
2.3.2 其他水汽反演资料.....	22
2.4 本章小结.....	24
第 3 章 低成本 GNSS 实时高精度对流层估计方法研究	25
3.1 引言	25
3.2 数据采集方案与处理策略.....	26
3.2.1 数据采集方案.....	26
3.2.2 GNSS 数据质量分析	29
3.2.3 GNSS 数据处理策略	30
3.3 低成本天线 PCV 的影响及其估计方法.....	31
3.3.1 天线 PCV 对 GNSS ZTD 的影响.....	31
3.3.2 相位中心变化的估计方法.....	35
3.3.3 基于相对定位的 PCV 估计方法.....	36
3.3.4 算例结果.....	37

3.4 低成本北斗/GNSS 设备的后处理 ZTD 精度	39
3.5 低成本北斗/GNSS 终端的实时对流层延迟估计	41
3.6 强降雨天气下的实时 ZTD 响应	44
3.7 本章小结	47
第 4 章 高时效 GNSS 水汽反演关键辅助参数模型研究	49
4.1 引言	49
4.2 数值天气预报模式	51
4.3 对流层辅助参数模型	53
4.3.1 HDTM 模型的建立和发布	53
4.3.2 HDTM 模型的应用方法	54
4.4 HDTM 模型的 ZHD 和 Tm 精度评估	58
4.4.1 数据来源	58
4.4.2 ZHD 的精度和特征分析	60
4.4.3 Tm 的精度和特征分析	65
4.4.4 ZHD 和 Tm 对 PWV 的反演误差分析	69
4.5 一种定制化的 HDTM 模型实时服务模式	72
4.5.1 工作框架	72
4.5.2 编码规则	74
4.6 本章小结	77
第 5 章 低成本高时效水汽监测方法及其在复杂环境的应用研究 .	79
5.1 引言	79
5.2 基于 HDTM 模型的实时水汽反演方法及应用	80
5.2.1 实时水汽反演方法	80
5.2.2 武汉降雨天气事件	82
5.2.3 台风“三巴”天气事件	83
5.3 基于海上动态平台的低成本水汽反演方法及其应用	86
5.3.1 适用于海洋动态观测的低成本高时效水汽监测方法	86
5.3.2 低成本 GNSS 浮标的 ZTD 估计和水汽反演表现	87
5.3.3 船载低成本终端的水汽监测表现	92
5.4 一种低成本且无温压观测依赖的实时 GNSS 水汽监测方案	97
5.4.1 低成本北斗/GNSS 终端和工作流程	98
5.4.2 实验数据及资料	99
5.4.3 结果分析	100
5.5 本章小结	105
第 6 章 总结与展望	107
6.1 本文工作总结	107
6.2 下一步工作设想	110

参考文献.....	113
致 谢.....	121
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果	125

图目录

图 1-1 论文的研究框架	10
图 2-1 大气分层结构及其温度变化规律	12
图 3-1 九峰山观测站和东湖园区 GNSS 阵列相对位置示意图.....	27
图 3-2 基于低成本和测地型接收机 GNSS 实时流的对流层延迟计算方案.....	28
图 3-3 低成本和测地型设备的伪距多路径差异	30
图 3-4 低成本和测地型设备的相位周跳差异	30
图 3-5 GNSS 接收机天线 PCO 和 PCV 的示意图	32
图 3-6 测地型天线 (TRM59800.00 None) PCV 引起的 ZTD 差异的分布和累积频次曲线	34
图 3-7 测地型天线 (TRM159900.00 None) PCV 引起的 ZTD 差异的分布和累积频次曲线	34
图 3-8 测量型天线 (CNTAT360) PCV 引起的 ZTD 差异的分布和累积频次曲线.....	35
图 3-9 基于超短基线相对定位的天线 PCV 估计流程图	37
图 3-10 Ublox ANN-MB-00 天线相对于参考天线在 GPS L1 和 L2 的 PCV 差异	38
图 3-11 Ublox ANN 天线在 L2 频点的 PCV 图	39
图 3-12 JFNG 站在夏季实验中的后处理 ZTD 序列.....	39
图 3-13 JFSP (低成本站) 和 JFTA (测地型站) 在夏季和冬季实验中的 ZTD 序列.....	40
图 3-14 JFSP (低成本站) 和 JFTA (测地型站) 在夏季实验中的实时 ZTD 序列.....	42
图 3-15 JFSP (低成本站) 和 JFTA (测地型站) 在冬季实验中的实时 ZTD 序列.....	43
图 3-16 JFSP 在武汉强降雨事件中实时估计 ZTD 的精度表现.....	45
图 3-17 APMM、APMB3T 和 APMB3S 在武汉强降雨事件中实时估计 ZTD 的精度表现.....	47

图 4-1 NCEP-GFS 预报产品使用策略	53
图 4-2 双线性平面插值示意图	57
图 4-3 GNSS/MET 测站、HDTM 格网点和探空站点的分布	60
图 4-4 HDTM 模型 ZHD 相对于 ERA5 的偏差和标准差分布	62
图 4-5 HDTM 模型的 ZHD 在 GNSS/MET 站点处的精度表现	63
图 4-6 HDTM(NCEP-GFS)、TUW VMF-3 和 GPT3 模型在 JSYZ、 BGNW 和 BFTO 站点处的 ZHD 表现	64
图 4-7 HDTM(NCEP-GFS)和 TUW VMF-3 ZHD 精度的周日变化差 异	65
图 4-8 HDTM 模型 Tm 参数的偏差和标准差分布	66
图 4-9 HDTM Tm 在 64 个探空站点的表现	68
图 4-10 HDTM、GPT3 和 Bevis 三种 Tm 在日变化尺度的表现	69
图 4-11 HDTM 参数对 PWV 反演误差影响的比较流程	70
图 4-12 PWV 误差在 953 个 GNSS/MET 站的表现	71
图 4-13 HDTM 模型服务的工作框架	72
图 4-14 HDTM 模型网页访问服务和目录结构	73
图 4-15 HDTM 格网文件格式	73
图 4-16 HDTM 站点产品的文件格式	74
图 4-17 HDTM 格网实时数据电文编码结构	75
图 4-18 HDTM 格网站点数据电文编码结构	77
图 5-1 基于 HDTM 模型的 GNSS 实时水汽反演工作模式	81
图 5-2 武汉强降水期间的 PWV 变化	83
图 5-3 台风“三巴”的移动路径和接近北海站时的风暴状态	84
图 5-4 台风“三巴”过境期间实时水汽反演方法的表现	85
图 5-5 适用于海洋动态平台观测的低成本高时效水汽监测方法实现 流程图	86
图 5-6 低成本 GNSS 浮标外观	88
图 5-7 GNSS 浮标与探空站和基站的相对位置	88
图 5-8 GNSS 基站和浮标跟踪卫星数量(GPS+BDS)变化	89

图 5-9 GNSS 浮标获取的 ZTD 与探空、ERA5 结果的比较.....	90
图 5-10 GNSS 浮标与基准站间的对流层差异.....	90
图 5-11 低成本 GNSS 浮标的平面运动轨迹.....	91
图 5-12 低成本 GNSS 浮标的 ZTD 估计表现和水汽反演表现.....	92
图 5-13 船载 GNSS 终端安装情况.....	93
图 5-14 数据集 III 的低成本和测地型终端估计的 ZTD 序列.....	94
图 5-15 北部湾船载 GNSS 水汽监测试验航迹.....	95
图 5-16 HDTM 模型和 TUW 产品提供的海洋船载动态平台的 ZHD 的比较.....	96
图 5-17 基于 HDTM 模型的 GNSS 水汽反演方法在北部湾航试中的表现.....	97
图 5-18 联合低成本北斗终端和 HDTM 模型的实时 ZTD/PWV 计算流程图.....	99
图 5-19 观测终端的相对位置示意图	100
图 5-20 利用低成本北斗终端计算实时 ZTD 序列与参考序列	101
图 5-21 用 HDTM 和 GPT3 模型计算的实时 ZHD 与参考值的对比	102
图 5-22 用 HDTM 和 GPT3 模型计算的 Tm 和参考值的对比	103
图 5-23 联合低成本北斗终端与 HDTM 模型反演的实时 PWV 与参考值的对比.....	103
图 5-24 在降水场景下的反演的实时 GNSS PWV 序列.....	104

表目录

表 3-1 GNSS 测站的接收机和天线配置情况.....	26
表 3-2 实时和后处理模式的 GNSS 处理策略.....	31
表 3-3 九峰山 GNSS 阵列的 ZTD 在改正 PCV 前后的质量差异	33
表 3-4 东湖园区 GNSS 阵列的后处理 ZTD 交叉验证结果	41
表 3-5 7 个台站实时 ZTD 估计质量统计	44
表 4-1 NCEP-GFS 和 ECMWF-IFS 模式的特征	52

表 4-2 NCEP-GFS、ECMWF-IFS 和 TUW 的 ZHD 精度	61
表 4-3 HDTM 模型 Tm 在格网点的精度	66
表 4-4 HDTM 和 Bevis 模型 Tm 在 64 个探空站的精度	67
表 4-5 ZHD 和 Tm 参数引起的 PWV 差异统计结果	71
表 4-6 HDTM 实时数据电文说明	76
表 5-1 相对于 ERA5 和探空结果的基站和浮标 GNSS ZTD 精度 ...	89
表 5-2 航试任务中低成本终端后处理 ZTD 的精度	93
表 5-3 低成本北斗终端中实时 PPP 处理策略	98
表 5-4 在有无降水发生场景下实时反演 PWV 的质量统计	105

第1章 绪论

针对 GNSS 气象学研究中涉及的实时对流层延迟参数估计、实时水汽反演关键辅助参数获取及复杂环境下的 GNSS 大气水汽监测等研究主题,结合极端天气下的水汽监测、海洋水汽资料获取和低成本水汽监测终端研制的实际应用需求,本章在系统总结国内外相关研究进展及其局限性的基础上,给出本文的总体研究思路及主要研究内容安排。

1.1 研究背景

对流层 (Troposphere) 位于大气层中的最底层, 在所有圈层中密度最大, 约占据整个大气质量的 75~80%, 包含了大气中几乎所有的水汽 (Water Vapor), 是绝大部分天气现象出现的地方, 也是与人类生产生活联系最密切的大气圈层。其中, 水汽虽然在整个大气总质量中占比较低, 却是地球大气层中最活跃且最重要的组成成分之一。一方面, 水汽作为重要的温室气体, 能够吸收地球长波辐射, 在固态、液态和气态的三相变化过程中会吸收或者释放大量潜热, 影响云雨雷电等天气事件的形成和演变; 另一方面, 水汽的形成和输送是全球水循环中的重要环节, 影响地球-大气系统中的能量平衡, 与地球气候系统有着密切的联系(Moran, 2009)。

随着全球气候变暖, 极端天气事件增多增强趋势明显, 诸如极端强降水、台风、洪涝等突发性强且局地性明显的气象灾害事件显著增加, 给人类生产生活带来巨大威胁。水汽是表征极端天气事件和气候变化的重要参数, 准确监测水汽含量及其时空变化, 对于精准预测各类灾害性天气事件与研究气候变化具有重要意义(张克非 et al., 2022)。全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) 是一种全天候、高精度的空间大地测量技术和时空信息基础设施, 其最初为导航、定位和授时 (Positioning, Navigation and Timing, PNT) 应用而设计, 在大地测量学、地球动力学、空间天气和气候变化等科学的研究和民生应用中发挥重要作用(Teunissen and Montenbruck, 2017)。目前, GNSS 主要包括美国的全球定位系统 (Global Positioning System, GPS)、中国的北斗导航卫星系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS)、俄罗斯的格洛纳斯 (GLObal NAVigation Satellite System, GLONASS)、欧盟的伽利略 (Galileo)。BDS 作为中国独立研制的卫星导航系统, 如今已经发展至北斗 3 号系统 (BDS-3), 并从 2018 年 12 月 27 日起开始提供全球 PNT 服务(杨元喜 et al., 2018)。在提供基本 PNT 服务外, BDS-3 还集成了 PPP-B2b 和星基增强等功能, 具有高完好性和高精度, 实现了区域和全球短报文通信和国际搜救服务, 在大气研究、减灾救灾和无人驾驶等方面发挥重

要作用(Yang et al., 2021)。

GNSS 信号从卫星到达地面穿过地球的大气层，会发生时延和弯曲两种延迟效应，产生的大气延迟是影响 GNSS 精密定位的重要误差源之一。在空间大地测量学中，一般根据大气层中自由电子的分布状况，将大气层分为电离层和中性大气层两部分(袁运斌, 2002)。而在中性大气（涵盖对流层、平流层和中间层）中产生的延迟，由于主要发生在对流层（约占 80%），因此被称为对流层延迟(宋淑丽, 2004)。根据成因不同，对流层延迟(Tropospheric Delay)又可分为静力学延迟（占 90%左右）和非静力学延迟（占 10%左右），由于非静力学延迟主要是由水汽引起的，一般情况下也会将非静力学延迟称为湿延迟。其中，静力学延迟变化相对稳定，易于计算、建模和改正。由于水汽具有典型的时空非平稳特征，受水汽影响的湿延迟也会随之剧烈变化，导致其难以精确计算、建模和处理。因此，对流层延迟对于 GNSS 信号来说是一项重要的误差源。精细处理 GNSS 对流层延迟是 GNSS 数据处理的前沿问题，也是实现 GNSS 高精度大气反演的基础。

在 GNSS 数据处理中，通常将任意高度角方向的斜向对流层延迟(Slant Tropospheric Delay, STD)模型化为天顶对流层延迟(Zenith Tropospheric Delay, ZTD)与对应映射函数(Mapping Function)的乘积，并通过给定精确的天顶静力学延迟(Zenith Hydrostatic Delay, ZHD)，继而对天顶湿延迟(Zenith Wet Delay, ZWD)进行参数估计。Askne and Nordius (1987) 利用大气加权平均温度 Tm 建立 ZWD 与大气可降水量(Precipitable Water Vapor, PWV)的数学关系，为利用地基 GNSS 反演水汽奠定数学理论基础。Bevis et al. (1992)首次提出 GNSS 气象学概念，并发展出利用 GNSS 对流层延迟反演大气可降水量的方法。从此，对流层延迟的认识从单纯的 GNSS 误差源转变为一种可靠的水汽观测信息，使得 GNSS 成为一种可以全天候量测大气水汽的可靠技术。

水汽的空间分布十分复杂，容易受到地形和季风等多种因素影响，具有时空分布不均匀及变化迅速的特性，这给高精度和高时空分辨率的水汽连续监测造成了极大的困难(王明华, 2019)。相比探空气球、星基微波辐射计和地基微波辐射计等其他水汽探测手段，地基 GNSS 具有高精度、低成本、全天候等综合优势，能够实现高时效和高时空分辨率的水汽连续监测，已经成为大气水汽监测的基础设施和关键技术(姚宜斌 and 赵庆志, 2022)。随着 GNSS 系统和地基跟踪网络的不断发展，GNSS 水汽反演技术的理论和方法不断完善，获得的对流层延迟和水汽信息被用作数值天气预报(Numerical Weather Prediction, NWP)的同化数据，在水汽监测和气象学上的作用和贡献日益增强(Dousa and Vaclavovic, 2014 , Rohm et al., 2019)。近年来，得益于实时 GNSS 服务的发展，地基 GNSS 对流层延迟和水汽产品的时效性得到进一步提高，可用于改善天气预报精度和极端天气预警(Poli et al., 2007 , Iwabuchi et al., 2006)。基于此，美国、欧盟和日本则先后实施和建设 COSMIC、E-GVAP 和 GEONET 网络，为实时水汽监测提供高密度的 GNSS

观测。中国气象局也联合中国地震局率先在国内建设 GPS/MET 观测网，并实现水汽监测与天气预报相结合的业务化运行(Liang et al., 2015)。

而水汽监测需要依赖密集的地基观测，测地型基准站建设和维护成本较高，使得当前地基网络难以进一步扩充。随着终端技术的不断进步，特别是 GNSS 芯片和天线等硬件技术以及卫星信号捕获算法的不断成熟，北斗/GNSS 终端的成本效益优势逐渐显现。部分 GNSS 板卡和模组(如 Septentrio Mosaic X5、Ublox F9P、司南导航 K803 和芯星通 UM980)能以低廉的成本获得多频多模 GNSS 观测值，还具备实时网络通讯能力(Stępiak and Paziewski, 2022 , Krietemeyer et al., 2018b)。低成本 GNSS 设备有望成为现有水汽监测网络的加密和补充终端，在建立面向天气预报和极端天气预警的密集化高时效大气监测服务等方面具有较大的应用潜力。此外，大众北斗/GNSS 模组级终端广泛应用在智能手机、可穿戴设备、无人机和智能汽车等物联网智能设备上，为用户提供可靠的实时位置和时间信息。同时，大众 GNSS 设备在大气监测方面具有密集化优势，可以显著改善大气建模空间分辨率，在获取大气异常信息上具有灵敏的感知力(Smith et al., 2024)。

本文主要关注以低成本北斗/GNSS 终端为核心的高时效 GNSS 对流层和水汽监测方法研究，涉及的关键内容有：实时北斗/GNSS 对流层延迟估计方法、实时水汽反演关键辅助参数模型及服务、低成本北斗/GNSS 实时水汽监测方案和终端研制、以及强降水极端天气和海洋动态平台等复杂环境下的高精度水汽监测方法，为高时空分辨率和高时效水汽监测服务的实施与应用提供理论方法和关键技术支撑。

1.2 国内外研究现状

本节详细梳理 GNSS 对流层延迟估计、水汽反演方法及其监测应用和低成本北斗水汽监测终端研制及应用的国内外重要研究成果和最近进展，并阐明既往相关研究存在的局限性和问题，为本文后续工作厘清研究脉络和思路。

1.2.1 基于 PPP 的 GNSS 实时对流层延迟估计

对流层延迟是 GNSS 数据处理的一项重要误差，主要有两种解算方法，分别是双差网解法(Duan et al., 1996)和精密单点定位法(Zumberge et al., 1997)。双差网解法可以消除接收机钟差和卫星钟差的影响，一般获得的是相对于参考站的 ZTD 差异。只有通过引入 500 km 以外的 GNSS 参考站参与解算，消除测站间对流层延迟参数的相关性后，才可以估计绝对天顶对流层延迟(Rocken et al., 1993)。精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 技术利用国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 发布的精密产品计算精确的卫星轨道和钟差，在单站解算时能直接估计出高精度的绝对 ZTD。同时，PPP 技术具有无需参考基准站、站间不相关、无作用距离限制、单机作业灵活和数据处理效率高等优势，

其解算的 ZTD 精度与双差网解法基本相当(Emardson et al., 1998)。因此，精密单点定位技术较双差技术具有明显的优势，逐渐成为对流层延迟估计的主要技术手段。

在 PPP 数据处理中，由于对流层是非色散介质，不能同电离层一样采用双频组合进行消除。每个 GNSS 观测值中都含有斜路径上的对流层延迟，直接在每个观测值上估计斜延迟会导致函数模型出现秩亏。一般假设天顶对流层延迟相同，并利用映射函数将斜路径方向上延迟量投影到天顶方向进行估计，从而避免模型秩亏 (Teunissen and Montenbruck, 2017)。在 ZTD 估计时，一般会采用先验模型改正 ZHD 部分（易模型化且精度高），然后采用合适的估计方法对 ZWD 进行解算，最后再将解算的 ZWD 与 ZHD 先验值相加来计算 ZTD。除此之外，部分研究者发现测站上空对流层延迟并不完全符合各向同性分布，需要增加估计南北和东西方向的两个梯度参数来削弱对流层延迟投影误差(Davis et al., 1993)。综上，对流层延迟高精度估计是获得高精度水汽资料的前提，也是 GNSS 气象学的基础。

随着 GNSS 气象学的不断深入，地基高精度对流层延迟产品被同化到天气预报系统，并在对流层中低层大气水汽结构、对流层高层温度以及降水预报均有显著改善作用(Poli et al., 2007)。与此同时，随着地基 GNSS 对流层延迟产品同化研究的不断深入，对产品时空分辨率和时效性要求也在不断提高。既往研究中，计算对流层延迟一般采用精密单点定位后处理方法，需要依赖 IGS 提供的事后精密星历。IGS 的最终精密星历存在一周以上的延迟，其快速和超快速精密星历分别存在 17 小时和 3 小时左右的延迟，难以满足实时获取对流层产品的现实需求(Fang et al., 2001 , Choi et al., 2013)。为开展实时精密单点定位和推动相关高时效应用的发展，IGS 于 2001 年成立了实时工作组 (<http://www.igs.org/rts>)，并在 2007 年启动了实时试验计划 (Real-time Pilot Project, RTPP)。随着 2013 年 4 月 GNSS 实时服务 (Real-Time Service, RTS) 产品的发布，用户可实时获取国际 GNSS 服务组织及其实时分析中心的 SSR (State Space Representation) 改正数信息，这给 GNSS 用户利用实时精密单点定位来获取高时效对流层延迟产品带来极大的便利 (Wang et al., 2018 , 刘腾, 2018)。除此之外，IGS 专门成立对流层工作组，开展 GNSS 对流层处理方法和应用研究，还为对流层延迟产品制定统一的文件格式标准，有效推动了 IGS 对流层延迟产品的使用(张红星, 2019)。

上述研究工作已经初步解决高精度对流层产品的高时效获取问题，但是现有的对流层产品在时空分辨率还存在局限性，受限于测地型基准站的布设成本和后期维护支出，用于实时监测的地基 GNSS 网络难以进一步加密和扩充(Hamza et al., 2024)。随着 GNSS 硬件技术的发展，低成本 GNSS 终端在硬件性能上不断提升，能够同时跟踪四个星座及其主要频点，为高精度对流层解算提供丰富的观测值。其次，现有低成本终端可以利用网络通信模块实现 GNSS 数据实时传输与远

程控制，能够将实时解算的对流层延迟即时回传到服务端进行对流层产品综合(Marut et al., 2022)。因此，低成本 GNSS 终端兼具成本效益优势和灵活布设的特点，为开展规模化密集监测和获取高时空分辨率对流层产品提供了机遇，推动水汽监测模式发生革新变化。

但是，出于成本考虑，低成本 GNSS 接收机一般采用温补晶体振荡器，这导致其接收机钟差发生剧烈跳变且观测值噪声更大，不利于对流层参数的实时估计(赵传宝, 2021)。另外，低成本终端配置的天线并非测地型天线，而是测量型或者贴片天线，天线相位中心偏差 (Phase Center Offset, PCO) 和变化 (Phase Center Variation, PCV) 没有得到官方的标定，未经改正的 PCV 误差会影响高程方向和对流层延迟的精确估计(Mader, 1999)。因此，研究分析适用于低成本 GNSS 终端的实时对流层估计方法，削弱引起对流层延迟偏差的不利影响因素，获取高精度实时对流层延迟产品，是利用低成本终端加密高时效水汽监测的重要基础。

1.2.2 GNSS 高时效水汽反演方法研究

水汽是大气中重要的成分，直接影响大气垂直稳定性，对监测和预报全球或局地气候变化及中小尺度恶劣天气至关重要。当前水汽观测手段包括无线电探空仪 (Radiosonde, RS)、地基微波辐射计 (Microwave Radiometer, MWR)、卫星微波辐射计、MODIS 影像和地基 GNSS 等，但上述水汽探测手段在获取水汽资料还存在不足，例如地面疏密不均、观测不连续、时间分辨率低、数据质量不一及海洋区域数据匮乏等问题(姚宜斌 and 赵庆志, 2022)。而地基 GNSS 水汽监测技术可以很好地回避和解决上述水汽探测技术的不足和局限。相关研究也证实 GNSS 水汽产品与 RS 和 MWR 水汽监测技术的结果具有一致性，精度在 1-2 mm(Rocken et al., 1995, Wolfe and Gutman, 2000, Braun et al., 2003)。随着地基 GNSS 跟踪网络不断发展，地基 GNSS 水汽监测技术逐渐成为主要的水汽探测技术。例如，美国内华达大地测量实验室就处理并发布了 1994 年至今全球超过 17000 个测站的对流层延迟和水汽产品，为研究强对流等极端天气、大尺度异常气候事件和天气人工智能提供可靠的历史观测资料(Blewitt et al., 2018, Crocetti et al., 2024)。张卫星(2016)利用中国陆态网在 1999-2015 年间的历史资料研究了中国区域水汽地理分布及变化。以上研究都说明水汽产品在长时间和大范围气象气候变化研究中的重要意义。

在 GNSS 水汽反演方法中，利用 PPP 解算得到 ZTD 产品后，可以进一步反演 PWV，基本原理如下：利用 GNSS 台站处气压，基于 Saastamoinen 模型计算出 ZHD；将 ZHD 从 ZTD 中分离，得到 ZWD；将 ZWD 转换成 PWV。从中可以看出，高精度 GNSS 水汽反演需要依赖两类重要参数：其一，高精度的对流层延迟，在前文已经讨论；其二，则是高精度对流层辅助参数：静力学延迟 ZHD 和加权平均温度 Tm。而且既往大部分 GNSS 水汽探测方法研究大多是基于后处理

模式，这对短临极端天气预警预报来说是不够及时的。由于当前地基 GNSS ZTD 可以实时解算得到，所以对流层辅助参数 ZHD 和 Tm 的实时获取成为实现高时效 GNSS 水汽反演的瓶颈问题。

在有地面气象观测的情况下，采用 Hopfield(Hopfield, 1971)、Saastamoinen(Saastamoinen, 1972)和 Black(Black, 1978)等模型可以实现 ZHD 高精度计算；而针对于 Tm，可以采用 Bevis(Bevis et al., 1992)提出的线性模型进行计算。因此，基于气象参数的 GNSS 水汽反演方法也是当前 GNSS/MET 监测业务的主要模式。

然而，由于相当一部分 GNSS 测站未配备气象观测终端，ZHD 和 Tm 难以采用 Saastamoinen 和 Bevis 模型进行计算，只能从再分析数据和经验模型中获取。ERA5 (ECMWF ReAnalysis 5) 是继 ERAI (ERA-Interim) 之后，由 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 提供的新一代大气再分析资料，利用格网系统提供全球的三维大气参数。再分析资料计算 ZHD 的精度高，但发布存在一周左右的时间延迟，不能服务高时效水汽应用。与此同时，数值天气预报模型根据大气流体力学和热力学的物理条件以及气象观测资料对未来全球大气场状态的精确预报，在提供高时效 ZHD 和 Tm 上极具潜力。

而对流层经验模型根据输入的站点位置和时间，可以直接获得测站点处的气压和 Tm。目前在 GNSS 水汽监测中使用最广泛的对流层经验模型是 GPT 系列模型(Landskron and Böhm, 2018 , Lagler et al., 2013 , Böhm et al., 2015)。Yao et al. (2015)综合利用 10 年 ERAI 再分析资料建立的 ITG 模型也可以提供气压和温度。同时还有其他类似的经验模型被构建，并在垂向改正、日周期项和拟合数据上有所改进(Huang et al., 2019 , Li et al., 2020 , Sun et al., 2017 , Mateus et al., 2020)。但是经验模型是通过拟合历史数据中参数的周年、半年项和周日项得到的，在实时高精度水汽应用中精度受限：一方面，受限于建模模型参数个数和空间分辨率等原因，在表达参数周日规律和短时变化上精度不足；另一方面，模型的时效性不足，难以反映参数在极端天气下的短时剧烈变化。除此之外，利用临近气象站温压观测进行插值也可以获取站点处气象参数进而辅助反演水汽(Chen et al., 2018)。但是插值方法会显著降低气象参数的精度，精度好坏取决于站点密度，本质上没有摆脱对气象观测网络的依赖。

还有部分学者提出利用人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 技术对 ZHD 和 Tm 参数进行建模和预报，或者直接对 ZTD 反演为 PWV 的过程进行建模，为 GNSS 台站独立获取水汽创造了条件(Zheng et al., 2022 , Huang et al., 2023b , Li et al., 2024 , Li et al., 2021)。由于 AI 技术的可解释性差且是数据驱动，基于 AI 的方法和模型的精度难以保证，在历史数据缺失较大的地区表现不佳，且在实时情况难以对扰动变化进行精确预测。

综上，在现有水汽反演方法和模式中，对流层辅助参数 (ZHD 和 Tm) 获取

的精度不足且时效性差；需要依赖于测地型 GNSS/MET 网络，且不适用于低成本 GNSS 设备，导致其难以独立反演水汽。因此，顾及低成本设备等终端独立反演水汽的需要，解决高精度对流层辅助参数的实时获取并建立无实测气象参数依赖的实时水汽反演方法是实现水汽观测资料高时效获取的关键手段。

1.2.3 低成本北斗水汽监测终端及应用研究

面向强降雨等极端天气的预报预警，利用低成本北斗/GNSS 终端加密测地型地基网络是实现水汽密集化观测的重要手段，有望成为未来水汽观测地基设施的基本雏形。在水汽发生剧烈扰动或者大范围输运时，出现小尺度的异常水汽结构或者短时变化，原有基于固定网形的水汽监测手段会稍显不适用。然而，低成本 GNSS 终端造价低廉且灵活便携，适用于应急加密和动态观测，有望在上述情形提供更为丰富和可靠的水汽观测(Barindelli et al., 2018)。此外，北斗系统是我国重要的时空基础设置，在水汽监测、海洋定位和灾害预警等方面展现了独特的应用优势和巨大潜力。为此，研制北斗/GNSS 高精度水汽监测终端，研发基于动态平台的水汽监测方法，有助于为新型水汽监测模式提供研究思路和方案。

考虑到低成本北斗/GNSS 终端给现有水汽监测方法和模式带来的潜在成本效益和应用价值，许多研究者对基于低成本终端及其网络的对流层提取和水汽监测开展一系列相关研究。[Stępnia and Paziewski \(2022\)](#) 计算 Ublox ZED F9P 的后处理对流层延迟，发现低成本终端的 ZTD 精度与测地型终端相当。[Krietemeyer et al. \(2018a\)](#)应用基于参考网络的卫星历元差分电离层延迟模型来获得单频 GNSS 接收机的 ZTD 和水汽信息，初步验证单频设备的水汽精度。[Zhao et al. \(2019\)](#)基于单频接收机提出了一种同步估计 PWV 和垂向电离层含量的估计方法，PWV 估计精度优于 3 mm。上述研究结果都采用后处理策略，单站低成本终端的实时水汽反演方法研究相对匮乏。在单站水汽反演性能研究的基础上，还有部分研究者率先建立低成本 GNSS 演示观测网并取得初步的研究结果。[Marut et al. \(2022\)](#)介绍由 16 台 ZED-F9P 接收机组成的低成本 GNSS 网络，覆盖整个波兰华沙市区，反演的水汽与测地型终端和 MWR 的结果差异在 1.0 kg/m² 左右。[Aichinger-Rosenberger et al. \(2023\)](#)在瑞士阿尔卑斯山区建立低成本观测网 MPG-NET (Multi-Purpose GNSS NETwork)，可以同步获取对流层延迟、土壤湿度含量和水汽。[Bosser et al. \(2024\)](#)利用覆盖法国的低成本观测网 Centipede，结合地基降水观测网络数据，初步验证其在监测大气河流的应用优势。以上研究结果都初步证实低成本 GNSS 网络可以为大气水汽提供高时空分辨率的地基观测，为基于混合水汽监测网络的水汽监测模式提供研究平台。但是，前述研究大多是后处理模式，缺少对低成本终端高时效应用的探讨，且没有建立明确适用于低成本终端的实时水汽反演方法和模式。

另外，海洋是大气水汽的主要来源，也是水汽输送的重要载体([Wang et al.](#),

2023), 然而海洋水汽观测资料和手段十分匮乏。GNSS 水汽反演技术具有高精度和连续性的优点, 在海洋水汽监测中独具优势。然而, 既往的海洋水汽监测大多是基于测地型终端, 而低成本 GNSS 终端可以显著降低终端的硬件成本, 提高观测的时空分辨率, 为海洋天气预报和海洋灾害预警提供高时效的水汽观测。当前, 利用低成本终端开展相关水汽监测研究工作已取得初步成果(Wu et al., 2022, Chadwell and Bock, 2001, Bosser et al., 2022, 郭博峰 et al.)。但是以往研究过多地依赖于后处理软件和 ERA5 等再分析资料, 未能考虑其在实时海洋环境下的真实表现, 缺少对适用于实时水汽获取的辅助参数模型和方法研究。因此, 利用低成本 GNSS 浮标和船载 GNSS 平台, 研究低成本北斗/GNSS 终端在海洋动态模式下的水汽探测表现, 有助于为海洋水汽反演方法创新和海洋水汽观测终端研制和布设提供研究参考。

综上, 研制低成本 GNSS 水汽监测终端, 开展低成本 GNSS 终端的高精度水汽监测方法和方案研究, 验证其在强降水天气和海洋动态平台等多复杂环境下的应用表现, 给在大地测量水汽监测网络中应用低成本北斗/GNSS 终端提供研究参考, 对建立和发展低成本 GNSS 水汽监测方法和模式尤为重要。

1.3 研究目的与意义

北斗系统是我国自主研制的全球卫星导航系统, 也是重要的时空基础设施。北斗/GNSS 终端是北斗系统应用的基础, 也是北斗系统发挥作用、产生贡献的重要载体。随着 GNSS 接收机技术的不断进步, 低成本北斗/GNSS 终端的成本效益优势逐渐显现, 具有成本低廉、高精度和高可靠性的优点, 能够满足高精度水汽监测的功能需要。因此, 基于低成本北斗/GNSS 终端开展高时效、高精度和高时空分辨率的水汽监测方法研究, 建立兼容低成本北斗/GNSS 终端的水汽监测服务模式, 有助于在面向极端天气的预警预报中发挥北斗/GNSS 的应用优势, 促进 GNSS 水汽监测技术和模式的技术革新。

基于前文关于实时 GNSS 对流层估计方法、高时效 GNSS 水汽反演方法以及低成本北斗水汽监测终端及应用的研究现状分析以及当前研究存在的问题, 本节详细阐明本文工作的研究目的及意义:

基于低成本北斗/GNSS 终端的实时高精度对流层估计方法研究: 本文聚焦于低成本北斗/GNSS 终端实时对流层估计及其影响因素, 探讨了天线 PCV 延迟改正对 ZTD 精度的影响, 还应用超短基线相对定位法估计低成本天线的相对 PCV 差异; 进一步研究其在后处理和实时工作模式下的对流层延迟估计表现和特征; 并利用武汉强降水事件探索了其在扰动天气下的应用潜力。本部分从 PCV 影响及估计、实时 ZTD 估计和极端天气下的响应三方面厘清并精化低成本终端的实时对流层估计方法。

高时效 GNSS 水汽反演辅助参数模型研究：为解决现有实时水汽反演方法对并址气象观测的依赖，本文聚焦于 ZHD 和 Tm 的实时获取，提出利用数值天气预报模式建立水汽反演辅助参数模型并命名为 HDTM；利用再分析资料、探空观测和实测气象数据等多源数据验证了 ZHD 和 Tm 参数在中国区域的精度表现和应用优势；并利用覆盖全国的独立水汽产品分析讨论了 ZHD 和 Tm 参数对 PWV 反演误差的影响，有效论证了 HDTM 模型对反演高精度 PWV 的作用；同时编制了适用于实时流传输服务的 HDTM 模型电文编码规则。本部分从辅助参数模型、实时水汽反演方法和实时服务三方面提出并建立兼容低成本终端的高时效水汽反演辅助参数模型和服务。

基于 HDTM 模型的低成本水汽监测方法和应用研究：提出并建立了基于 HDTM 模型的水汽反演方法并应用在极端天气的水汽监测中，论证了新方法在捕获剧烈水汽变化上的时间分辨率和高精度优势；结合提出的水汽反演方法和低成本北斗/GNSS 设备，开发低成本北斗/GNSS 水汽监测终端，并利用武汉气象站并址观测对监测终端进行长时间的实时验证；在此基础上，提出低成本海洋水汽反演方法并在浮标和调查船等动态平台上进行长期精度验证与分析。本部分从终端研制、海洋动态平台水汽反演和极端天气水汽监测三方面拓展低成本终端水汽监测方法的应用场景。

上述研究聚焦于基于低成本北斗/GNSS 终端的水汽反演方法研究，从“实时 ZTD 精确估计”、“水汽反演辅助参数和方法”和“复杂环境应用”等三方面研究并论证低成本终端在实施水汽监测中从实现到应用的主要关键问题和核心技术，为开展兼具高时效、高时空分辨率和高精度水汽监测模式提供创新思路。

1.4 研究内容与结构安排

本节根据前述的本文研究工作的目的与意义，以及国内外研究现状分析及当前研究存在的问题，给出本文工作的研究思路和框架结构，如图 1-1 所示。

具体内容及章节安排如下：

第一章，从介绍 GNSS 对流层研究背景、目的及意义出发，对当前国内外研究现状进行详细的梳理，阐明论文的研究问题和技术路线，简要介绍本文的研究目的和主要内容。

第二章，详细介绍 GNSS 对流层研究的基本原理及方法，主要包括中性大气和对流层的基本性质、GNSS 对流层延迟实时估计方法、实时精密单点定位技术及利用对流层延迟反演大气可降水量方法。为后续开展低成本终端对流层估计性能研究、GNSS 水汽反演重要辅助参数建模和实时水汽监测应用奠定理论基础。

第三章，以“低成本 GNSS 实时高精度对流层估计方法研究”为核心，详细分析了低成本天线 PCV 改正对对流层估计的影响及其量级，并提出应用超短基

线相对定位法来估计天线 PCV；研究 ZTD 实时和后处理模式下精度表现，验证低成本设备与测地型 ZTD 的差异；利用武汉一次强降雨事件验证了低成本终端对流层延迟估计在扰动天气下的实时表现，探索了低成本北斗/GNSS 终端在大气监测研究中的应用潜力。

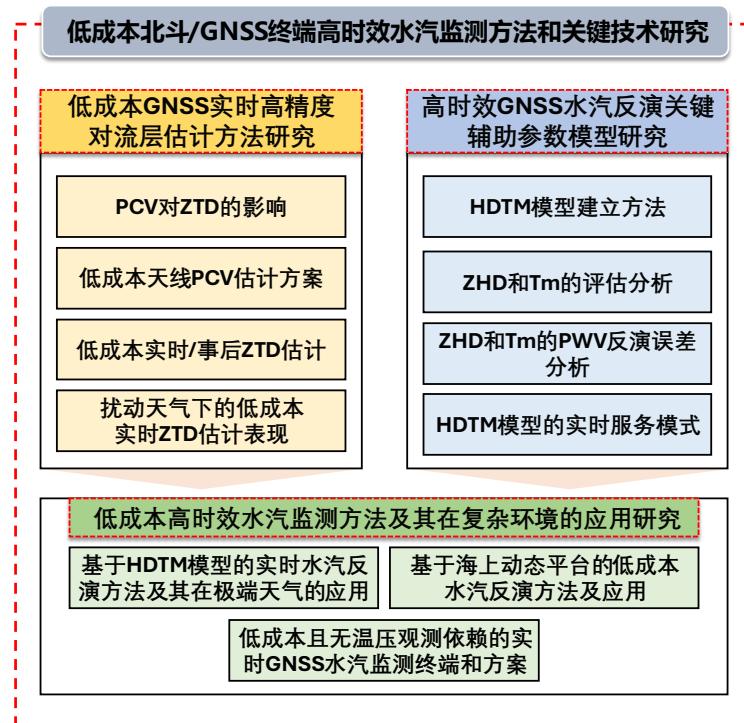


图 1-1 论文的研究框架

第四章，以“高时效 GNSS 水汽反演关键辅助参数模型研究”为核心，建立了实时对流层辅助参数预报模型 HDTM，为实时水汽反演提供高时效和高精度的 ZHD 和 Tm 参数，摆脱了对实测气象参数的依赖；利用多源数据验证了 HDTM 模型 ZHD 和 Tm 参数在中国区域的应用精度，并以 GNSS/MET 水汽产品为参考，研究分析 ZHD 和 Tm 参数引起的 PWV 反演差异及其空间分布；还提出一种适用于实时流传输的 HDTM 模型服务，为 GNSS 实时用户提供更为简便的 HDTM 模型获取手段，有助于实时水汽反演的实施。

第五章，以“低成本高时效水汽监测方法及其在复杂环境的应用研究”为核心，提出了基于 HDTM 模型的水汽反演方法，并利用两次极端天气事件检验了其在剧烈水汽变化下的应用表现；基于 HDTM 模型和低成本终端提出适用于海洋动态平台的高时效水汽监测方法，并基于浮标和船载平台上验证了其在感知海洋水汽上的应用效果；开发了一种无需实测气象参数的低成本 GNSS 实时水汽监测终端，并利用并址探空结果验证了其长时间实时工作的精度可靠性。

第六章，系统梳理和总结了本文的研究内容、结论和贡献，并为后续研究工作做出初步展望和计划。

第 2 章 GNSS 对流层水汽反演的理论基础及方法

对流层延迟是利用 GNSS 进行无线电测量的主要误差源之一，也是反演大气水汽含量的重要参量。本章详细介绍 GNSS 对流层研究的基本原理及方法，主要包括对流层的基本性质、实时对流层延迟估计方法及利用 ZTD 反演大气可降水量方法，为后续开展基于低成本北斗/GNSS 终端的实时 ZTD 估计方法、GNSS 水汽反演重要辅助参数模型构建与实时水汽监测方法及其复杂环境应用等研究奠定理论基础。

2.1 对流层的基本性质

本节主要介绍大气分层结构、中性大气折射率和计算 GNSS 对流层延迟的基本理论和方法。

2.1.1 大气分层结构

大气层是指从地球表面一直延伸到上万公里以上，因受到引力作用而环绕包裹着地球，为地球上的生命活动提供保护。大气层中含有大量的气体分子、电子和离子以及水滴、冰晶、尘埃等液态和固态颗粒，质量约为固体地球质量的百分之一，其中约 90% 质量集中在 16 km 以下的大气层，约 99.9% 质量集中在 48 km 以下的大气层(周要宗, 2022)。另外，在底层大气中聚集大量的水汽，它是最重要的温室气体，其三相变换过程会吸收和释放大量潜热，影响云雨雷电等天气事件的形成和演变，还在全球水循环中、台风、暴雨等极端降水天气事件和地球能量平衡中发挥重要作用(Held and Soden, 2000)。因此，水汽也是监测全球气候变化时需要关注的重要对象之一(Kiehl and Trenberth, 1997)。

按照大气温度随高度分布特征，地球大气从低到高由五个主要层组成，分别为对流层、平流层、中间层、热层和外层，具体分层结构如图 2-1 所示 (<https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/layers-of-atmosphere>)。

其中，对流层是指从地面向上 12 km 的大气范围，位于大气层最底部，集中了整个大气层约 75% 的质量以及 90% 以上的水汽，也是绝大部分天气现象出现的地方。对流层温度随高度升高而降低（约 -6.5 K/km）。

平流层是指对流层层顶至约 50 km 高度的大气范围。层内受臭氧对紫外线吸收强度的影响，气温会以 2 K/km 递增，到达层顶温度增加到约 270-290 K，同时气压减小至 1 hPa 左右。

中间层是指平流层层顶至约 80-85 km 高度的大气范围。该层的大气质量不足整个大气层质量的 1%，气温会随高度增加而迅速降低，递减率约为 3 K/km，

层顶温度约 150-180 K。

热层（电离层）是指中间层层顶至 250 km（太阳活动低年）-500 km（太阳活动高年）高度的大气范围。该层大气稀薄，其质量约为整个大气层的十万分之一。由于直接吸收太阳辐射，气温会随高度增加而升高。

热层以外的大气层为逃逸层。该层大气十分稀薄，部分中性粒子不受到地球引力作用可逃逸地球引力进入行星际空间(周要宗, 2022)。

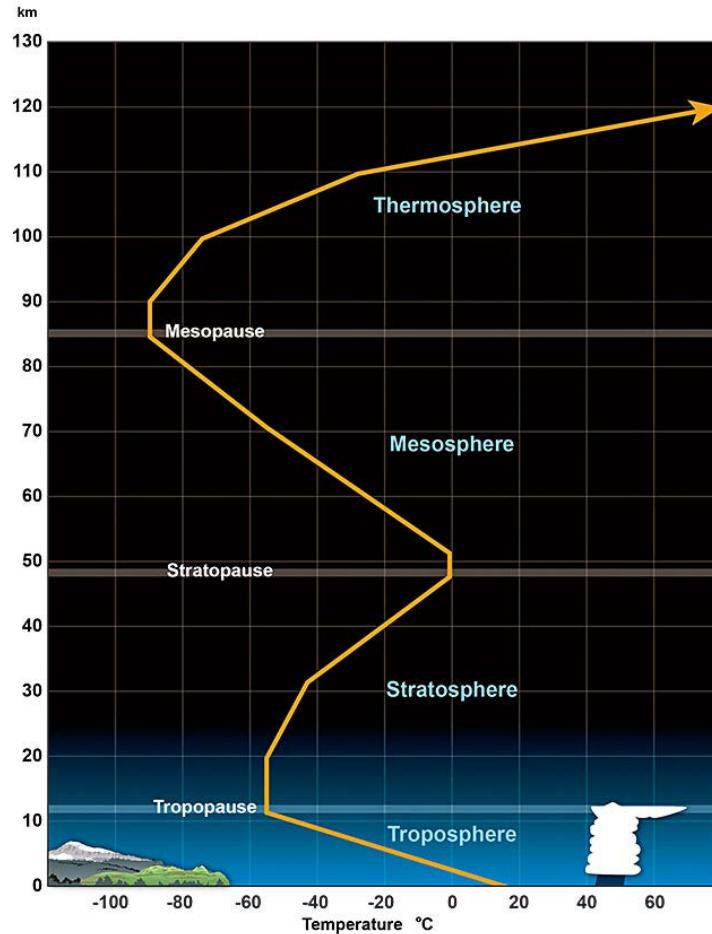


图 2-1 大气分层结构及其温度变化规律

注：图片来源于美国 NOAA 网站 “Layers of the Atmosphere” 栏目

2.1.2 中性大气折射率

由于电磁波经过大气传播时受到大气折射的影响，传播速度小于真空中的速度。大气折射指数 $n = c_0 / c$ 。 c_0 是指真空中的光速， c 是大气介质中电磁波信号的传播速度。在中性大气层中，由于大气折射指数非常接近于 1，因此通常采用大气折射率来 N 表示大气折射指数 n ，其单位为 mm/km。两者的换算关系可表示为：

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad (2-1)$$

在中性大气中，可以将 N 表达为气压、温度和水汽压的函数：

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} + (k_2 \frac{e}{T^2} + k_3 \frac{e}{T^3}) \quad (2-2)$$

$$P_d = P - e \quad (2-3)$$

其中， P 为大气总气压， P_d 为干空气分压， e 为水汽分压，单位为 hPa； T 是温度，单位为 K； k_1 、 k_2 和 k_3 为与折射率有关的物理常数。

根据 $P_d = \rho_d R_d T$ 和 $e = \rho_w R_v T$ ，将上述气体状态方程式代入公式 (2-2)，根据流体静力学平衡 ($dP = -\rho g dz$)，可得：

$$N = k_1 \frac{R_d}{T} P + (k'_2 \frac{e}{T^2} + k_3 \frac{e}{T^3}) = N_h + N_w \quad (2-4)$$

$$k'_2 = k_2 - \frac{R_d}{R_w} k_1 \quad (2-5)$$

其中， N_h 为折射率的静力学分量， N_w 为湿分量。 ρ_d 和 ρ_w 分别为干空气和水汽密度， R_d 和 R_w 分别为干空气和水汽的气体常数。 N_h 仅依赖气压和温度参数，而 N_w 依赖水汽压和温度参数，大气折射指数系数 k_1 、 k'_2 和 k_3 取值为 77.6890 K/hPa、22.9742 K/hPa 和 375463 K²/hPa (Rüeger, 2002)。

2.1.3 对流层延迟的计算

在空间大地测量学中，通常根据自由电子的分布状况，可将大气层分为电离层和中性大气层两部分(袁运斌, 2002)。在穿过中性大气层时，GNSS 卫星发射的电磁波信号因受到大气折射会产生时延和弯曲两种效应，造成的信号传播被称为中性大气层延迟。由于 80% 的中性大气延迟发生在对流层，所以本文将发生在中性大气层中的延迟统称为对流层延迟。

结合电磁波在中性大气中的传播规律和中性大气的基本性质，在斜向路径上对流层延迟(Nilsson et al., 2013)，可下式计算：

$$\begin{aligned} \Delta L &= 10^{-6} \int_s N_h(s) ds + 10^{-6} \int_s N_w(s) ds + s_{bend} \\ &= SHD + SWD + s_{bend} \end{aligned} \quad (2-6)$$

其中， ΔL 是斜路径总延迟。可根据产生原因不同，可以将斜延迟分为斜向静力学延迟 SHD、斜向湿延迟 SWD 和几何弯曲项 s_{bend} 。延迟量随高度角降低而增大，在 5°高度角，总延迟和静力学延迟超过 20 m，湿延迟能增加到数米。

为方便分析，假设电磁波信号在天顶方向传播，产生的延迟称为天顶对流层延迟，包括天顶总延迟 (ZTD)、天顶静力学延迟 (ZHD) 和天顶湿延迟 (ZWD)。采用如下公式计算：

$$\begin{cases} ZTD = ZHD + ZWD \\ ZHD = 10^{-6} \int_{h_0}^{h_{top}} N_h^z(h) dh \\ ZWD = 10^{-6} \int_{h_0}^{h_{top}} N_w^z(h) dh \end{cases} \quad (2-7)$$

其中, h_0 为测站高程, h_{top} 为对流层顶层高度。 $N_h^z(h)$ 和 $N_w^z(h)$ 分别是站点天顶方向在高度 h 处的静力学和非静力学大气折射指数。

2.2 GNSS 精密单点定位模型及其对流层估计

GNSS 精密单点定位 (PPP) 技术是一种非差 GNSS 数据处理技术, 利用精密卫星轨道和钟差产品和单站 GNSS 观测值, 在解算单站精确坐标的同时, 可以精确估计天顶对流层延迟参数(张小红 et al., 2010)。本节重点介绍 GNSS 精密单点定位的观测方程和对流层延迟参数估计策略。

2.2.1 精密单点定位数学模型

原始观测方程

GNSS 伪距和相位原始观测方程可以表示为:

$$\begin{cases} p_{r,j}^s = \rho_r^s + dt_r - dt^s + \mu_j I_r^s + T_r^s + d_{r,j} - d_{,j}^s + \varepsilon_{p,j}^s \\ \phi_{r,j}^s = \rho_r^s + dt_r - dt^s - \mu_j I_r^s + T_r^s + \lambda_j N_{r,j}^s + \delta_{r,j} - \delta_{,j}^s + \varepsilon_{\phi,j}^s \end{cases} \quad (2-8)$$

其中, 上述模型中的符号和变量被定义如下:

r, s, j 接收机号、卫星号以及频率号

$p_{r,j}^s$ 和 $\phi_{r,j}^s$ 伪距和相位观测值, 单位为 m

ρ_r^s 卫星至接收机的概略距离, 单位为 m

dt_r 和 dt^s 接收机和卫星钟差, 单位为 m

I_r^s 参考频率的电离层斜延迟, 单位为 m

T_r^s 卫星至接收机的斜向对流层斜延迟, 单位为 m

λ_j 第 j 个频率载波相位波长, 单位为 m/周

$\mu_j = \lambda_j^2 / \lambda_i^2$ 电离层在 j 频率上的比例因子

$d_{r,j}$ 和 $d_{,j}^s$ 接收机和卫星码偏差, 单位为 m

$\delta_{r,j}$ 和 $\delta_{,j}^s$ 接收机和卫星相位偏差, 单位为 m

$N_{r,j}^s$ 相位模糊度, 单位为周

$\varepsilon_{p,j}^s$ 和 $\varepsilon_{\phi,j}^s$ 伪距和相位未模型化误差及随机噪声, 单位为 m

公式(2-8)为基本GNSS观测方程, 在实际数据处理中, ρ_r^s 可以通过接收机坐标($[x_r \ y_r \ z_r]$)和卫星坐标($[x^s \ y^s \ z^s]$)表示, 对其在接收机先验坐标($[x_{r0} \ y_{r0} \ z_{r0}]$)处进行 Taylor 展开并保留一阶项, 则得到估计坐标参数的线性表达形式:

$$\rho_r^s = \rho_{r0}^s - \frac{x^s - x_{r0}}{\rho_{r0}^s} \Delta x - \frac{y^s - y_{r0}}{\rho_{r0}^s} \Delta y - \frac{z^s - z_{r0}}{\rho_{r0}^s} \Delta z \quad (2-9)$$

$$\begin{cases} x_r = x_{r0} + \Delta x \\ y_r = y_{r0} + \Delta y \\ z_r = z_{r0} + \Delta z \end{cases} \quad (2-10)$$

其中($\Delta x \ \Delta y \ \Delta z$)即为接收机坐标相对于先验坐标的增量。

消电离层组合PPP模型

电离层延迟是GNSS观测中主要误差来源之一。估计其在电离层中的色散特性, 通常采用双频观测值的消电离层组合(Ionosphere-free combination, IF)来消除电离层一阶项的影响。双频伪距和相位IF组合观测模型可表示为:

$$\begin{cases} p_{r,IF}^s = \frac{\mu_2}{\mu_2 - 1} p_{r,1}^s - \frac{1}{\mu_2 - 1} p_{r,2}^s \\ \phi_{r,IF}^s = \frac{\mu_2}{\mu_2 - 1} \phi_{r,1}^s - \frac{1}{\mu_2 - 1} \phi_{r,2}^s \end{cases} \quad (2-11)$$

根据式(2-11)将(2-8)线性化后, 从而可以得到消电离层组合PPP模型基本形式, 观测方程可以为:

$$\begin{cases} \Delta P_{r,if}^s = -\mathbf{e}_r^s \Delta \mathbf{x} + dt_r + T_r^s - dt^s + d_{r,if} - d_{,if}^s + \varepsilon_{p,if} \\ \Delta \phi_{r,if}^s = -\mathbf{e}_r^s \Delta \mathbf{x} + dt_r + T_r^s - dt^s + \delta_{r,if} - \delta_{,if}^s + \lambda_{if} \cdot N_{r,if}^s + \varepsilon_{\phi,if} \end{cases} \quad (2-12)$$

式中: $\Delta P_{r,if}^s$ 和 $\Delta \phi_{r,if}^s$ 分别是伪距和相位无电离层组合观测值减计算值; \mathbf{e}_r^s 是卫星到接收机的单位向量, $\Delta \mathbf{x}$ 是测站坐标相对于先验值的改正量; dt_r 和 dt^s 分别为接收机和卫星钟差; T_r^s 是对流层延迟; $d_{r,if}$ 和 $\delta_{r,if}$ 分别为接收机端的伪距偏差和相位偏差; $d_{,if}^s$ 和 $\delta_{,if}^s$ 为卫星端的伪距偏差和相位偏差; λ_{if} 和 $N_{r,if}^s$ 分别为消电离层组合观测值的波长和模糊度; $\varepsilon_{p,if}$ 和 $\varepsilon_{\phi,if}$ 分别是伪距和相位消电离层组合观测值的测量噪声。

由于PPP依赖外部精密产品, 其中精密卫星钟差($dt^s = dt^s + d_{,if}^s$)会给观测方程引入伪距偏差 $d_{,if}^s$ 。在PPP中, 对流层处理一般是先采用经验模型计算天顶

干延迟部分 Z_d 并利用干延迟映射函数 m_r^s 投影到斜向后进行改正，然后将剩余的斜向湿延迟部分利用湿映射函数 M_r^s 将映射到天顶湿延迟 Z_w 进行估计。因此，需要对上述方程进行参数重组来消除秩亏，参数重组后的模型可以表示为：

$$\begin{aligned}\Delta\tilde{p}_{r,if}^s &= -\boldsymbol{e}_r^s \Delta\mathbf{x} + d\tilde{t}_r + M_r^s Z_w + \varepsilon_{r,p,IF}^s \\ \Delta\tilde{\phi}_{r,if}^s &= -\boldsymbol{e}_r^s \Delta\mathbf{x} + d\tilde{t}_r + M_r^s Z_w + \lambda_{if} \cdot \tilde{N}_{r,if}^s + \varepsilon_{r,\phi,IF}^s\end{aligned}\quad (2-13)$$

其中，参数重组形式如下所示：

$$\begin{aligned}\Delta\tilde{p}_{r,if}^s &= \Delta p_{r,if}^s + d\tilde{t}^s - m_r^s Z_d \\ \Delta\tilde{\phi}_{r,if}^s &= \Delta\phi_{r,IF}^s + d\tilde{t}^s - m_r^s Z_d \\ d\tilde{t}_r &= dt_r + d_{r,if} \\ \lambda_{if} \cdot \tilde{N}_{r,if}^s &= \lambda_{if} N_{r,if}^s + \delta_{r,if}^s - \delta_{r,if}^s - d_{r,if}\end{aligned}$$

消电离层组合 PPP 函数模型的待估参数向量表示如下：

$$\mathbf{X} = \left[\Delta\mathbf{x} \quad Z_w \quad \hat{d}t_r \quad \tilde{N}_{r,if}^s \right]^T \quad (2-14)$$

消电离层组合基本可以忽略电离层延迟高阶项的影响，函数模型中主要的待估参数为位置参数、接收机钟差、卫星钟差和对流层延迟等参数，因此该模型在对流层延迟估计中具有较好的应用。

非组合 PPP 模型

非组合 PPP 模型充分利用原始 GNSS 观测值，将电离层延迟作为未知参数进行估计，一方面，避免了组合观测值引起的噪声放大的不足；另一方面，可以为直接同步估计对流层和电离层参数；同时在施加电离层延迟等外部约束时具有较好的灵活性(张宝成, 2013)。在非组合模型中，对流层处理方式同在消电离层组合 PPP 模型中类似。双频非组合 PPP 模型中线性化的 GNSS 伪距和相位观测方程可表示为如下：

$$\begin{aligned}\tilde{p}_{r,j}^s &= -\boldsymbol{e}_r^s \Delta\mathbf{x} + d\tilde{t}_r + M_r^s Z_w + \mu_j \tilde{I}_{r,j}^s - \tilde{d}_{r,j}^s + \varepsilon_{r,p,j}^s \\ \tilde{\phi}_{r,j}^s &= -\boldsymbol{e}_r^s \Delta\mathbf{x} + d\tilde{t}_r + M_r^s Z_w - \mu_j \tilde{I}_{r,j}^s + \lambda_j \cdot \tilde{N}_{r,j}^s + \varepsilon_{r,\phi,j}^s\end{aligned}\quad (2-15)$$

其中，参数重组形式如下所示：

$$\begin{aligned}\tilde{p}_{r,j}^s &= p_{r,j}^s + d\tilde{t}^s - m_r^s Z_d \\ \tilde{\phi}_{r,j}^s &= \phi_{r,j}^s + d\tilde{t}^s - m_r^s Z_d \\ d_{r,gf} &= \frac{1}{\mu_2 - \mu_1} (d_{r,2} - d_{r,1}) \\ d_{r,gf}^s &= \frac{1}{\mu_2 - \mu_1} (d_{r,2}^s - d_{r,1}^s) \\ d\tilde{t}_r &= dt_r + d_{r,if}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{I}_r^s &= I_r^s + d_{r,gf} - d_{r,gf}^s \\ \lambda_j \cdot \tilde{N}_{r,j}^s &= \lambda_j N_{r,j}^s - \delta_{r,j}^s + \delta_{r,j} - d_{r,if} + d_{if}^s - \mu_j d_{r,gf}^s + \mu_j d_{r,gf} \end{aligned}$$

非组合 PPP 函数模型的待估参数向量表示如下：

$$X = [\Delta\mathbf{x} \quad Z_w \quad \hat{dt}_r \quad \hat{I}_r^s \quad \tilde{N}_{r,j}^s]^T \quad (2-16)$$

相关的参数估计方法将在后文中介绍。

2.2.2 对流层的估计策略

对流层延迟是精客单点定位模型中重要的误差项和待估参数。不同于电离层延迟，基于同一路径不同频率的信号存在的色散效应，可以通过双频或者多频组合基本消除。GNSS 信号在通过以对流层为主的中性大气时，由于波长较长，基本不存在色散效应，对流层延迟无法利用频率组合的方式进行直接修正。因此，对流层延迟需要在精客单点定位模型中予以精确建模估计或者采用外部参考产品进行约束。

在 GNSS 精客单点定位数据处理中，由于不同卫星观测的对流层延迟不同，且同时估计各卫星的对流层斜向延迟会造成模型不满秩。为减少待估参数的个数并避免模型秩亏，通常在斜向路径上对流层延迟模型化为天顶对流层延迟与对应映射函数乘积的形式，并对天顶对流层延迟进行建模和估计。顾及到对流层延迟中静力学分量部分和湿分量的特性不同，分别采用不同策略进行改正。其中，占总延迟 90% 的天顶静力学延迟部分，性质相对稳定，通过经验模型进行精确改正。而湿延迟分量部分占比较小，主要受大气水汽的影响，变化迅速且难以对其建模。

因此，在对流层延迟处理中，分别对 ZHD 和 ZWD 进行建模和估计，具体表达形式表示如下：

$$ZTD = m_r^s(e)Z_d + M_r^s(e)Z_w \quad (2-17)$$

其中， e 为卫星高度角， ZTD 是天顶对流层总延迟， Z_d 为 ZHD， Z_w 为 ZWD， m_r^s 和 M_r^s 分别为 ZHD 和 ZWD 的映射函数。

静力学延迟和湿延迟的映射函数 m_r^s 和 M_r^s ，通常用与高度角 e 有关的连分数表示(Marini, 1972)：

$$M_r^s(m_r^s) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + \frac{c}{\sin(e) + \frac{a}{\sin(e) + \frac{b}{\sin(e) + c}}}}}}{\sin(e) + \frac{a}{\sin(e) + \frac{b}{\sin(e) + c}}} \quad (2-18)$$

其中， m_r^s 和 M_r^s 的系数 a 、 b 和 c ，与测站位置和时间有关。

常用的映射函数模型有 Böhm 等人(2006)提出的 GMF 模型、Niell 等人(1996)提出的 NMF 模型和 Herring (1992)提出的 MTT 模型。其中，GMF 模型具有精度高、应用简单、输入参数少等优势，适用于实时精密单点定位的处理。因此，本文在对流层处理中主要采用 GMF 作为映射函数模型。

另外，考虑到空间大气密度在各方向分布的不均匀性，通常引入水平梯度模型来描述对流层延迟在水平方向变化。因此，待估的湿延迟参数可模型化为：

$$\tilde{Z}_w = Z_w + \cot(e) \cdot (G_N \cdot \cos(a) + G_E \cdot \sin(a)) \quad (2-19)$$

其中， a 为卫星方位角， G_N 和 G_E 分别为北、东方向的梯度参数。

在精密单点定位模型中，天顶对流层延迟的一般估计方法为：首先基于经验模型或者并址气压观测计算静力延迟项 Z_d ，利用静力学延迟映射函数 m_r^s 将 Z_d 映射到斜向路径上并在观测值中扣除；然后将剩余延迟量部分视作湿延迟，依照湿延迟映射函数 M_r^s 映射到天顶方向；天顶湿延迟 \tilde{Z}_w 作为待估参数进行估计，估计得到的湿延迟参数也会吸收其余未模型化的残余误差。最后将计算的静力延迟项与估计得到的湿延迟参数求和即可得到总天顶对流层延迟(张镇驿, 2023)。由于静力学延迟和湿延迟的映射函数存在差异，因为静力学延迟的残余误差难以被湿延迟参数完全吸收，从而导致其他参数在估计时存在一定偏差。

在对静力学延迟改正后，PPP 中对流层湿延迟的建模方法，通常有分段常数法和随机游走参数估计法。分段常数认为对流层湿延迟在时间间隔 Δt 内为常数，通过每隔 Δt 时间更新该常数，来描述对流层延迟在时间域的变化。对于随机游走法，一般采用一阶离散高斯马尔科夫 (Markov) 过程来描述湿延迟的随机变化。而随机游走可以认为是一阶离散高斯马尔科夫过程的特殊情形。因此，用于估计对流层湿延迟的随机游走过程可表示如下(Hadas et al., 2017)：

$$E(|T_{t+\Delta t} - T_t|) = \delta \sqrt{\Delta t} \quad (2-20)$$

其中， T_t 和 $T_{t+\Delta t}$ 分别表示 t 和 $t + \Delta t$ 时刻的对流层延迟参数。 Δt 表示时间间隔。 δ 表示为随机游走过程噪声。在 GNSS 静态数据处理中，通常采用分段常数+段间随机游走的模式对流层湿延迟，其过程噪声设为 $15 \text{ mm}/\sqrt{h}$ 。

2.2.3 参数估计方法

在 GNSS 数据处理中，最小二乘、卡尔曼滤波和正反向平滑滤波是常用的三类参数估计方法。

最小二乘估计

设未知参数 x 的最小二乘解为 \hat{x} ，观测值残差可表示如下：

$$V = A\hat{x} - y \quad (2-21)$$

基于观测值的残差平方和最小的最小二乘准则：

$$V^T Q_y^{-1} V = \min \quad (2-22)$$

$V^T Q_y^{-1} V$ 是 \hat{x} 的函数，通过对极值条件求导可得：

$$\frac{\partial V^T Q_y^{-1} V}{\partial \hat{x}} = 2V^T Q_y^{-1} A = 0 \quad (2-23)$$

最小二乘估值 \hat{x} 及其方差-协方差阵 $D_{\hat{x}}$ 可表示为

$$\begin{cases} \hat{x} = (A^T Q_y^{-1} A)^{-1} A^T Q_y^{-1} y \\ D_{\hat{x}} = \sigma_0^2 (A^T Q_y^{-1} A)^{-1} \\ \sigma_0 = \sqrt{(V^T Q_y^{-1} V) / (n - r)} \end{cases} \quad (2-24)$$

其中， n 为观测值数量， r 为必要观测值数量， σ_0 为验后单位权重中误差。

观测值残差 \hat{v} 及其方差-协方差阵 $D_{\hat{v}}$ 可表示为：

$$\begin{cases} \hat{v} = y - A(A^T Q_y^{-1} A)^{-1} A^T Q_y^{-1} y \\ D_{\hat{v}} = \sigma_0^2 (Q_y - A(A^T Q_y^{-1} A)^{-1} A^T) \end{cases} \quad (2-25)$$

在经典最小二乘中，可以联合所有可用的观测来进行计算，故 \hat{x} 为全局最优估计，但在实时计算中难以实现。另外，当待估参数量较大时，其法方程的矩阵阶次过大导致计算负担重和参数估计效率低下。另外，经典最小二乘中也未考虑参数的随机特性。

卡尔曼滤波

卡尔曼滤波是一种利用线性系统状态方程，通过系统输入输出观测数据，对系统状态进行最优估计的算法。由于观测数据中包括系统中的噪声和干扰的影响，通过不断预测与修正过程，实现函数模型中未知参数 X 的递归估计以实现最优估计。卡尔曼滤波的状态方程和观测方程可表示如下：

$$\begin{cases} \tilde{X}_k = \Phi_{k,k-1} \tilde{X}_{k-1} + \Gamma_{k-1} \\ Y_k = A_k \tilde{X}_k + \Delta_k \end{cases} \quad (2-26)$$

其中， \tilde{X}_k 和 Y_k 分别表示 k 历元时刻的状态向量与观测向量， $\Phi_{k,k-1}$ 为状态转移矩阵， Γ_{k-1} 为状态噪声，其协方差阵记作 $D_{\Gamma_{k-1}}$ ， A_k 为设计矩阵， Δ_k 为观测噪声，其协方差阵记作 D_{Δ_k} 。

状态预报：

$$\begin{cases} \tilde{X}_{k,k-1} = \tilde{X}_{k,k-1} + \Phi_{k,k-1} \tilde{X}_{k-1} \\ D_{\tilde{X}_{k,k-1}} = \Phi_{k,k-1} D_{\tilde{X}_{k,k-1}} \Phi_{k,k-1}^T + D_{\Gamma_{k-1}} \end{cases} \quad (2-27)$$

状态更新：

$$\begin{cases} \tilde{X}_k = \tilde{X}_{k,k-1} + K_k(Y_k - A_k \tilde{X}_{k,k-1}) \\ D_{\tilde{X}_k} = D_{\tilde{X}_{k,k-1}} - K_k A_k D_{\tilde{X}_{k,k-1}} \end{cases} \quad (2-28)$$

其中，滤波增益因子可表示为：

$$K_k = D_{\tilde{X}_{k,k-1}} A_k^T (A_k D_{\tilde{X}_{k,k-1}} A_k^T + D_{\Delta_k})^{-1} \quad (2-29)$$

与最小二乘相比，卡尔曼滤波更适用于实时、动态数据处理。

正反向平滑滤波

正反向平滑滤波的基本思想是分别使用正向滤波和反向滤波两次处理观测数据，从而有效地减少噪声对估计结果的影响，并改善参数的精度。这有利于在避免收敛过程中精度不稳定性，保证参数估计具备全局最优性。其数学表达形式如下所示：

$$\begin{cases} \hat{x}_k = (D_{\hat{x}_{k,F}}^{-1} + D_{\hat{x}_{k,B}}^{-1})^{-1} (D_{\hat{x}_{k,F}}^{-1} \hat{x}_{i,F} + D_{\hat{x}_{k,B}}^{-1} \hat{x}_{k,B}) \\ D_{\hat{x}_k} = (D_{\hat{x}_{k,F}}^{-1} + D_{\hat{x}_{k,B}}^{-1})^{-1} \end{cases} \quad (2-30)$$

其中， k 为历元数， $\hat{x}_{k,F}$ 和 $D_{\hat{x}_{k,F}}^{-1}$ 为正向滤波估值及其方差协方差； $\hat{x}_{k,B}$ 和 $D_{\hat{x}_{k,B}}^{-1}$ 为反向滤波估值及其方差协方差。

2.2.4 实时精密单点定位

实时精密单点定位技术可以依靠 IGS 组织及其分析中心播发的 SSR 格式的精密轨道和钟差实时流产品，在实时状态下即可实现高精度定位应用，同时估计出高精度对流层延迟，这给获取高时效对流层产品和水汽反演带来了极大的便利（[张红星, 2019](#)）。SSR 信息是以相对于广播星历的卫星轨道和钟差的改正数信息形式进行播发。实时精密单点定位技术可以通过 NTRIP（Networked Transport of RTCM via Internet Protocol）Caster 挂载点获取 SSR 实时流，根据 RTCM（Radio Technical Commission for Maritime Services）协议解码出轨道和钟差改正数，进而利用广播星历将改正数恢复为精密卫星轨道和钟差（[肖恭伟, 2021](#)，[葛玉龙, 2020](#)）。

广播星历和 SSR 信息会在一定时间间隔内不断更新。由于 SSR 信息播发的是相对于广播星历信息的改正数，因此需要匹配对应广播星历，才能恢复精确的轨道和钟差信息。在 RTCM 协议中，通常通过数据星历龄期（Issue of Data, Ephemeris, IODE）参数来实现 SSR 信息与广播星历的匹配。因此，SSR 信息中会包含 IODE 参数，用于匹配对应的广播星历；而广播星历则通常直接提供相应的 IODE 参数，或者需要根据其他参数计算出 IODE/IODC 参数。（[汪亮, 2019](#)，[徐黎 and 袁运斌, 2020](#)）。

在完成 SSR 信息与广播星历的匹配后，利用 SSR 信息计算轨道和钟差改正量，对广播星历的轨道和钟差进行改正的具体过程如下所示。首先是卫星轨道改正改正，SSR 轨道改正信息提供的是参考时刻 t_0 卫星坐标改正量 $\delta\mathbf{x}$ 和速度改正

量 δv :

$$\begin{cases} \delta x = (\delta O_r \quad \delta O_a \quad \delta O_c) \\ \delta v = (\delta O'_r \quad \delta O'_a \quad \delta O'_c) \end{cases} \quad (2-31)$$

其中, 下标 r , a 和 c 分别表示法向、径向、切向的改正量。

观测时刻 t_1 轨道坐标系下的改正数 $\delta O(t_1)$ 表示为:

$$\delta O(t_1) = \begin{bmatrix} \delta O_r \\ \delta O_a \\ \delta O_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta O'_r \\ \delta O'_a \\ \delta O'_c \end{bmatrix} \cdot (t_1 - t_0) \quad (2-32)$$

根据广播星历计算观测时刻 t_1 卫星在地心地固系下的坐标 \mathbf{r} 和速度 $\dot{\mathbf{r}}$, 计算轨道坐标系到地心地固坐标系下径向, 切向和法向的旋转矢量 $\mathbf{e} = [\mathbf{e}_r \quad \mathbf{e}_a \quad \mathbf{e}_c]$, 具体计算方式如下所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{e}_a = \frac{\dot{\mathbf{r}}}{|\dot{\mathbf{r}}|} \\ \mathbf{e}_c = \frac{\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}}{|\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}|} \\ \mathbf{e}_r = \mathbf{e}_a \times \mathbf{e}_c \end{array} \right. \quad (2-33)$$

然后再将轨道坐标系的改正量 $\delta O(t_1)$ 改正到卫星广播轨道上, 即可得到观测时刻的精密轨道, 具体公式表示如下:

$$\delta X = [\mathbf{e}_r \quad \mathbf{e}_a \quad \mathbf{e}_c] \cdot \delta O \quad (2-34)$$

$$X_{prec} = X_{brdc} - \delta X \quad (2-35)$$

其中, X_{prec} 和 X_{brdc} 分别为观测时刻 t_1 的精密轨道和广播轨道。

与卫星轨道改正信息不同, SSR 信息提供的卫星钟差改正数是以二次多项式来描述卫星钟差的变化并播发拟合系数。利用 t_0 的钟差系数计算观测时刻 t_1 的钟差改正量, 可表示为:

$$\delta C = c_0 + c_1(t_1 - t_0) + c_2(t_1 - t_0)^2 \quad (2-36)$$

其中, c_0 , c_1 和 c_2 分别是卫星钟差在参考时刻 t_0 的改正数系数, δC 是观测时刻 t_1 的卫星钟差改正数。

然后将钟差改正数改正到广播星历钟差上, 可以得到观测时刻 t_1 的精密钟差:

$$T_{prec} = T_{brdc} + \frac{\delta C}{c} \quad (2-37)$$

其中, c 为真空中的光速, \mathbf{T}_{brdc} 和 \mathbf{T}_{prec} 分别为广播星历计算的钟差和实时恢复的精密钟差。

2.3 GNSS 水汽反演方法和其他水汽反演资料

2.3.1 GNSS 水汽反演方法

ZWD 可以通过 ZTD 和 ZHD 求差获得, 再通过用 Tm 计算的转换系数 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 Tm 一般是根据经验模型或者实测气象参数获得的。GNSS 反演 PWV 的过程可表示如下 (Bevis et al., 1992):

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (2-38)$$

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \quad (2-39)$$

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho_w R_w \left(\frac{k_3}{T_m} + k'_2 \right)} \quad (2-40)$$

式中, ρ_w 为液态水密度, 取值为 $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; R_w 是水汽气体常数, 取值为 461.495 J/kg ; k'_2 和 k_3 为大气折射常数。

大气加权平均温度的计算方法:

$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \bar{e}_{si} / \bar{T}_i}{\sum_{i=1}^{n-1} \bar{e}_{si} / \bar{T}_i^2} \quad (2-41)$$

然而 GNSS PWV 的计算需要高精度的 ZWD, 通常需要 GNSS 站配备气象传感器, 然后通过实测气象数据获取高精度的 ZHD 用于上式 ZWD 的计算。

2.3.2 其他水汽反演资料

探空气廓线观测一般由地面探空站释放装满氢气或氦气探空气球, 固定在探空气球上的探空仪传感器会在上升过程中实时测量大气压、温度、露点温度、相对湿度和比湿等气象参数, 并可以根据大气参数精确计算出水汽含量。目前, 全球的探空站数量已超过 1500 个。大多数探空站通常在世界时 00:00 和 12:00 提供观测数据。在极端天气等特殊情况下, 探空站还会开展加密观测, 以提高数据的时效性和覆盖率。

尽管探空观测技术可以以较高的精度和垂直分辨率提供实测气象廓线数据, 但还存在如下不足: (1) 探空气球极易受到天气因素的影响, 同时探空气球在升空过程中容易发生水平漂移, 漂移距离可能达到数十公里; (2) 受限于站点分布和布放成本, 其空间和时间分辨率较低; (3) 探空仪的气象传感器有时会出现终

端故障等问题，导致采集的探空廓线气象观测出现偏差甚至异常值(黄良珂, 2020)。

基于探空站提供的不同气压层的气象廓线观测，可计算出静力学延迟、湿延迟和大气可降水量等参数。利用探空数据计算 PWV 的计算公式可表示如下：

$$E = 6.112 \cdot \exp \left[\frac{17.6 T_d}{T_d + 243.15} \right] \quad (2-42)$$

$$e_s = RH \cdot E \quad (2-43)$$

$$PWV = \frac{1}{g_m} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{0.622 \cdot \left(\frac{e_{si} + e_{si+1}}{2} \right)}{\left(\frac{P_i + P_{i+1}}{2} \right) - 0.378 \left(\frac{e_{si} + e_{si+1}}{2} \right)} \Delta P \quad (2-44)$$

式中， e_s 为水汽压 (hPa)， E 为饱和水汽压， T_d 为露点温度 (°C)， g_m 为平均重力加速度 (m/s^2)， P 为大气压强 (hPa)， i 为气压层。

大气再分析资料是利用 NWP、数据同化模式以及对历史气象观测资料进行重新处理和分析获得的全球大气状态场。其中同化的数据包括地面观测、无线电探空、卫星遥感、飞机观测、船舶观测等多种来源的气象数据。再分析资料通常采用三维格网系统来描述全球大气状态，包含气压、温度、比湿、风速、降水量等多种气象状态参数。相比于地基气象观测和探空廓线等单点观测数据，再分析资料具有较好的时空一致性，更适用于历史水汽结果和较大范围的水汽产品。当前常用的大气再分析数据集有 ERA5、JRA-55、MERRA-2 和 NCEP/NCAR 再分析资料等(黄良珂, 2020)。

欧洲中尺度天气预报中心 (ECMWF) 是一个重要的天气预报中心，可免费或有偿向公众提供数值预报产品。例如，ECMWF 相继推出了 ERA-15, ERA-40、ERA-Interim 和 ERA5 再分析资料，数据时间跨度长达数十年。其中，ERA5 数据是 ECMWF 开发的新一代大气再分析产品，水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，时间分辨率为 1 小时，其主要提供了较为齐全的地表气象参数和等压层分层数据(垂直分辨率为 37 层)。但是数据发布的时间往往要滞后一周左右。

基于 ERA5 的 37 个气压层的比湿和气压等数据，可计算出测站的大气可降水量 PWV 值。公式可以表示如下：

$$PWV = \int \frac{q}{g} dP \quad (2-45)$$

其中， P 为气压， q 为比湿， g 为所在格网点的重力加速度。

但是，由于 ERA5 采用位势值来描述高度，而 GNSS 数据处理中通常采用大地高。因此，在计算测站水汽含量，需要将位势值转换为大地高，主要过程如下所示：

(1) 将位势值转换为位势高：

$$H_g = \frac{W}{g} \quad (2-46)$$

其中, W 是位势 (J), H_g 是位势高 (gpm), g 表示 ERA5 格网点位置处的重力加速度 (m/s^2)。

(2) 将位势高转换为正高:

$$H_\varphi = \frac{R_\varphi \cdot H_g \cdot g_{45}}{g_\varphi R_\varphi - H_g \cdot g_{45}} \quad (2-47)$$

$$g_\varphi = 9.780325 \cdot \sqrt{\frac{1 + 1.93185 \times 10^{-3} \sin^2(\varphi)}{1 + 6.69435 \times 10^{-3} \sin^2(\varphi)}} \quad (2-48)$$

$$R_\varphi = \frac{6.6378137 \times 10^6}{1.006803 - 0.006706 \sin(\varphi)} \quad (2-49)$$

其中, φ 、 g_φ 和 R_φ 分别表示格网点的纬度值、重力加速度和地球半径, g_{45} 则表示纬度为 45° 的重力加速度。

(3) 将正高转换成大地高:

$$H_{geod} = H_\varphi + N \quad (2-50)$$

其中, N 为大地水准面高, 可从全球引力场模型 (EGM2008) 获取; H_{geod} 为大地高。同时, 地球上任意位置的大地高参数可以根据 WGS 84 椭球坐标在 USGS 提供的在线大地水准面高度计算器网页 (<https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/geodetic-utilities.html>) 获取 (Rapp, 1997)。

(4) 将正高转换成正常高:

$$H_{orth} = H_\varphi + N - \xi \quad (2-51)$$

其中, ξ 为高程异常, H_{orth} 为正常高。

2.4 本章小结

本章围绕 GNSS 对流层数据处理和水汽反演方法展开, 详细介绍了大气基本结构、GNSS 对流层延迟的产生原因、ZTD 估计的数学模型和估计策略, 实时精客单点定位以及 GNSS 水汽反演方法和其他水汽产品资料。上述理论方法和数据资料是后续开展基于低成本北斗/GNSS 终端的实时对流层估计方法、GNSS 水汽反演关键辅助参数模型构建和实时水汽监测方法及其复杂环境应用等研究的基础。

第3章 低成本GNSS实时高精度对流层估计方法研究

精确可靠的GNSS水汽反演需要依赖于高精度的对流层延迟估计。现有的对流层水汽监测网络大都是基于成本高昂的测地型GNSS接收机来实现的,不利于高密度布设。而当前成本低廉的北斗/GNSS接收机具备多频多模的跟踪能力和实时网络通讯能力,可以为对流层监测提供高时空分辨率和高时效的观测,成为密集化水汽监测网络的潜在补充终端。面向对流层水汽监测的高时空分辨率和高时效的业务需求,本章详细分析了低成本设备对对流层估计的影响,研究低成本和测地型终端在获取对流层延迟精度方面的差异,验证基于低成本终端实时估计的对流层延迟在强降雨天气下的精准响应,探索了低成本北斗/GNSS终端在大气监测研究中的应用前景。

3.1 引言

对流层延迟是GNSS气象学中的一项重要参数,可以作为同化数据用于天气预报(Poli et al., 2007, Dousa and Vaclavovic, 2014, Liu et al., 2025)。地基GNSS网络可以全天候实时工作,其获得的高分辨率和高时效的对流层延迟产品,既能改善天气预报的短期表现,又能为极端天气预警提供灵敏的对流层监测(Dousa et al., 2018, Lu et al., 2023, Zhang et al., 2022)。但是,现有地基监测网络的观测数据主要来源于测地型GNSS终端,造价成本昂贵且维护成本高,难以满足天气预报预警业务对高时空分辨率观测的需求(Guerova et al., 2016)。

随着GNSS芯片技术和软件算法的不断进步,低成本终端逐渐具备了多频多模的跟踪能力,能够提供高时空分辨率、高时效的观测数据,在大气监测领域展现出显著优势(Zhao et al., 2019, Paziewski, 2021, Stępiak and Paziewski, 2022)。基于低成本接收机的大气监测能力已得到初步验证,并已成功应用于电离层斜向路径延迟提取、结构变形监测、土壤水分反演以及河流水位监测等方面(Xu et al., 2022, Karegar et al., 2022, Manzini et al., 2022)。凭借其低廉的成本和卓越的性能,低成本GNSS终端将在需要密集化观测的领域提供可靠的数据资源(Krietemeyer et al., 2018a)。

不同于测地型接收机,低成本接收机的观测值受到各类硬件噪声和其较为粗糙的随机模型的综合影响(Li et al., 2023b)。目前,利用低成本接收机开展对流层提取的相关工作较少。既往研究大多是基于后处理模式来进行的,对基于低成本接收机观测值的实时解算策略和对流层实时估计精度质量缺少探讨(Stepniak and Paziewski, 2022, Krietemeyer et al., 2018a)。此外,低成本GNSS终端通常采用廉价天线,天线相位中心(PCV)改正数据较难获取,这给低成本终端用于精确获

取对流层延迟带来了挑战([Krietemeyer et al., 2020](#))。更重要的是，在极端天气条件下，如对流层发生剧烈扰动时，低成本 GNSS 终端能否实现对对流层参数的精确提取和长期监测，仍然是一个需要探讨的问题([Barindelli et al., 2018](#))。

本章基于并址的低成本和测地型 GNSS 接收机阵列观测，首先从后处理角度分析了测量型天线 PCV 改正对对流层延迟估计的影响，并提出应用一种相对定位超短基线法来解算低成本天线的相对 PCV。同时，探讨了基于低成本接收机和测地型接收机在实时和后处理模式下获取对流层延迟的质量特征；最后，以武汉一次强降雨天气事件为例，探究了利用低成本 GNSS 终端监测极端天气条件下对流层延迟剧烈变化的应用表现，为后续开展基于低成本设备的水汽监测研究提供参考。

3.2 数据采集方案与处理策略

为验证低成本 GNSS 终端在对流层估计中的基本表现，本章在武汉九峰山国家大地野外观测站和研究院园区布设两组 GNSS 观测阵列。本节详细介绍两组 GNSS 观测阵列中各低成本/测地型测站配置的接收机和天线类型，实验采集的基本设置以及数据处理策略。

3.2.1 数据采集方案

首先介绍两组 GNSS 阵列布设的基本情况。本文在武汉市九峰山国家野外观测站和精密测量院东湖园区实验楼共布设 7 台 GNSS 终端，其中 5 台为测地型接收机，2 台为低成本接收机。表 3-1 展示了两组 GNSS 阵列中的各站点用到的接收机、天线类型和位置。考虑到对流层延迟存在明显的季节性差异，本章分别在夏季和冬季开展了为期两周的 GNSS 观测实验，其中夏季实验时间范围是从 2023 年 6 月 19 日到 7 月 3 日（2023 年 DOY 170-184），冬季实验范围为 2023 年 10 月 27 日到 11 月 10 日（2023 年 DOY 300-314）。另外，由于 APMB3S 和 APMB3T 站点已经变更相关数据采集参数设置，对应数据未参与冬季实验。

表 3-1 GNSS 测站的接收机和天线配置情况

站名	接收机	天线	地点
JFSP	Septentrio mosaic X5 (low-cost)	CNTAT360 (low-cost)	九峰观测站
JFTA	Trimble Alloy (geodetic)	TRM159900.00 (geodetic)	None
JFNG	Trimble Alloy (geodetic)	TRM59800.00 (geodetic)	None
APMM	Septentrio mosaic X5	CNTAT360 (low-cost)	

	(low-cost)			东湖园区
APMB3S	Septentrio (geodetic)	POLARX5TR	HXCCGX601A	HXCS
APMB3T	Trimble Alloy (geodetic)		UA35 (low-cost)	
UBUU	Trimble Alloy (geodetic)	CHCC220GR		CHCD (geodetic)

实验中用到的接收机主要有两类：一类是测地型接收机，如 Trimble Alloy 和 Septentrio POLARX5TR 接收机，单机价格一般在十万元左右，配置的 GNSS 天线一般也是测地型扼流圈天线，如 TRM159900.00、HXCCGX601A 和 CHCC220GR，成本一般在两万左右。测地型天线相位中心偏差和天线相位中心变化会进行官方机构的精确标定，对应的天线改正文件可在 IGS 组织发布的天线文件中查找得到 (<https://igs.org/wg/antenna/>)。实验中用到的低成本 GNSS 接收机主要是 Septentrio 生产的 mosaic-go 开发套件型接收机，采用的 GNSS 模组为 Mosaic X5 模组，成本在四千人民币左右。接收机具有低功耗的特点，质量小于 20g，可以同时跟踪 448 个信号通道，同步支持包括四系统在内的主流卫星星座和主要卫星频点及信号。配备的测量型天线为司南导航 AT360 天线，同样支持接收主要导航星座的卫星信号，信号增益为 40dB，重量小于 500g，价格在 800 元人民币左右。

实验中采集的 GNSS 数据来源于不同接收机和天线配置组合，用于探究不同接收机和天线配置对对流层估计影响的差异。同时，为增强实验结果的可信度和实验结果的严谨性，分别在九峰观测站和精密测量院东湖园区两处实验场同期开展观测实验。两处实验场地相距约 20 公里。九峰山观测站实验场中的 GNSS 终端间基本并址或相邻，最大平面距离约为 31 米，最大高度差异约为 0.7 米以内。东湖园区实验场中，APMM、APMB3S 和 APMB3T 位于园区 3 号楼，基本并址，平面距离约 2-3 米，高度基本一致。UBUU 站布设在园区二号楼，与 APMM 站相距约 68 米，最大高差约为 13 米。以上各站具体分布如图 3-1 所示。

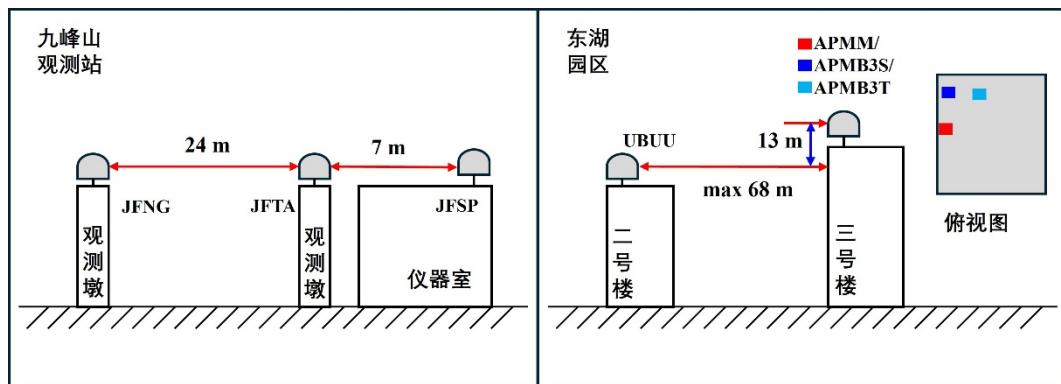


图 3-1 九峰山观测站和东湖园区 GNSS 阵列相对位置示意图

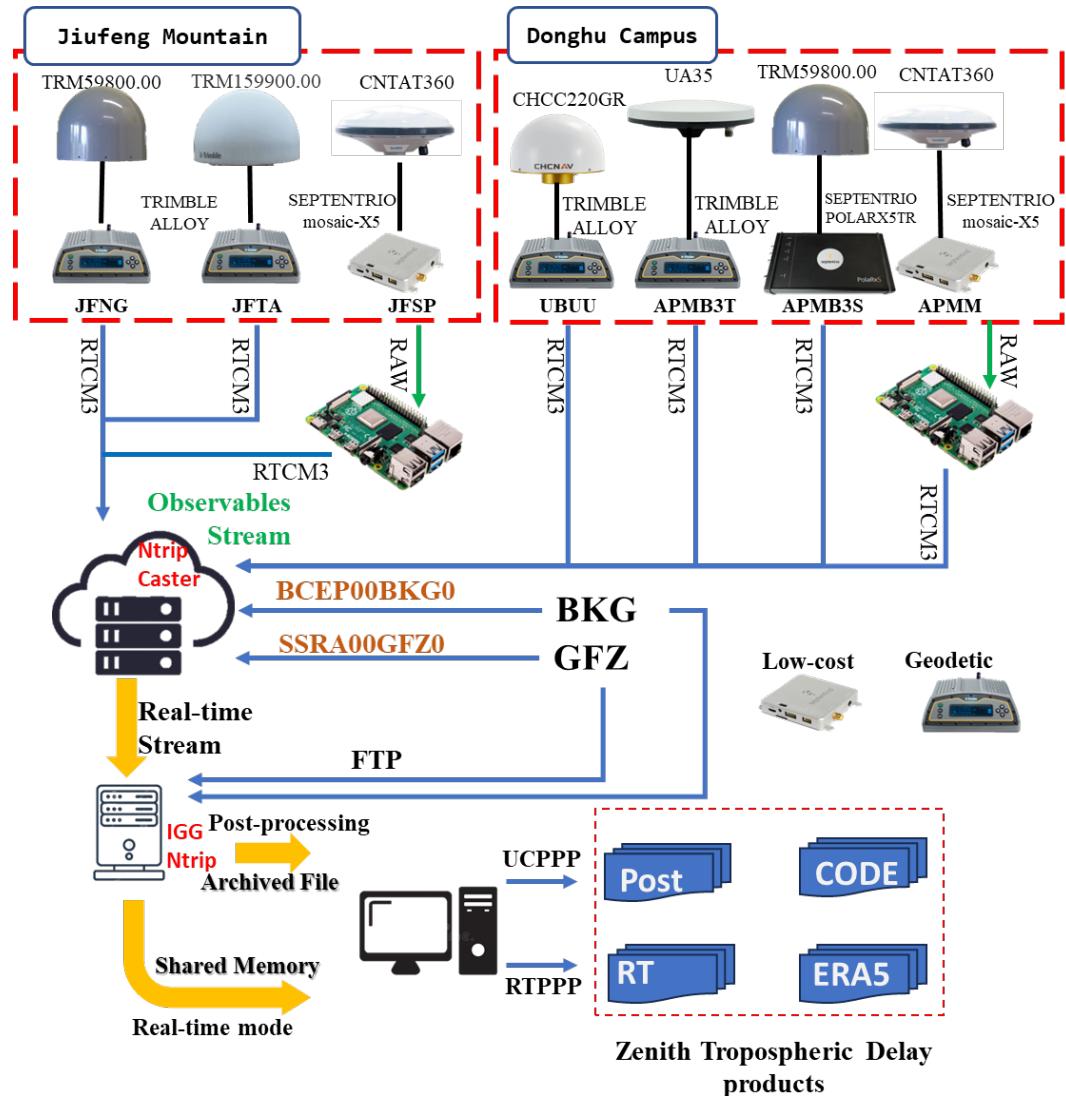


图 3-2 基于低成本和测地型接收机 GNSS 实时流的对流层延迟计算方案

基于低成本和测地型接收机的对流层延迟实时估计流程图见图 3-2。低成本接收机(Septentrio Mosaic X5)外接一台树莓派微机(Raspberry Pie 4B)和 4G 路由器, 方便对低成本接收机进行远程控制、进程监控和将 GNSS 实时数据流转发到网络服务器 NTRIP Caster 上。GNSS 数据流包括观测数据和广播星历的电文, 数据播发和接收遵循 NTRIP 协议, 电文编码和解码遵循 RTCM 协议。测地型接收机具备实时数据流通信能力, 能够直接将 GNSS 实时数据播发至远程网络的 NTRIP Caster 上。另外, Caster 利用其数据抓取和同步功能, 转发武汉大学 IGS 分析中心播发的 BCEP00BKG0 和 SSRA00GFZ0 挂载点数据, 以方便本地用户获取综合广播星历和实时精密轨道和钟差改正数。BCEP00BKG0 (综合广播星历实时流) 和 SSRA00GFZ0 (精密轨道钟差实时流) 分别是由 BKG (德国联邦制图和大地测量局, 实时 GNSS 产品分析中心之一) 和 GFZ (德国地学中心, 实时 GNSS 产品分析中心之一) 生成和发布的。为方便 GNSS 实时数据的处理和解算

以及避免数据通信和解算单元的冲突，在本地电脑利用课题组自研 IGG NTRIP 软件获取各站点的观测数据、综合广播星历和精密轨道钟差改正数实时流产品并写入本地共享内存，然后利用精密单点定位软件实时读取共享内存的 GNSS 数据并解算对流层延迟。

考虑到武汉九峰山的 JFNG 站为 IGS 跟踪站，IGS 分析中心之一的欧洲定轨中心（Center for Orbit Determination in Europe, CODE）会定期对 IGS 跟踪网络中的近 300 个测站（其中就包括 JFNG 站）进行后理解算并提供小时间隔的对流层延迟产品。计算产品采用的解算软件是 Bernese 5.5，时间间隔为 1 小时，解算策略详见对流层产品文件([Dach et al., 2024](#))。CODE 提供的对流层产品标称精度为 4 mm，并且得到 VLBI、DORIS 和探空站等多种独立技术手段的检核和验证([Dach et al., 2009](#))。因此，本章利用 CODE 计算的对流层延迟产品作为外部独立参考，以此来确认基于自研软件实时估计和后处理的对流层延迟精度质量。

本章还用到了 ERA5 来计算对流层延迟。ERA5 数据提供全球范围内垂向 37 个气压层气象参数，包括温度、湿度、比湿和位势高度等，水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，时间分辨率为 1 小时。不同于从 GNSS 观测数据进行 PPP 解算估计获得的对流层延迟，基于 ERA5 的 ZTD 产品是根据站点附近格网气象参数廓线数据进行数值积分获得的，用于与 GNSS-ZTD 结果进行比较。

3.2.2 GNSS 数据质量分析

为分析低成本设备的数据采集质量，使用 Anubis 工具(3.10 版)对 APMM、APMB3S 的为期一周（2023 年 DOY 171-177）的观测值进行质量分析，分别分析和讨论低成本设备采集的伪距和相位观测值与测地型设备数据的质量差异。

图 3-3 展示了 APMM 和 APMB3S 站的伪距多路径的比较结果。从图中可以看出，配置 Mosaic X5 和测量型天线 AT360 的 APMM 站在多路径上要略大于测地型设备。量级较大的多路径发生在 GLONASS 系统的 C1C 和 C2C 和北斗系统的 C2I 信号上，量级达到 20 cm。利用低成本和测地型设备采集的观测值，在北斗 C6I 信号的多路径都要明显低于其他卫星系统的信号，约为 6.2 cm。由此可见，利用低成本设备采集的观测值在多路径上未见明显的劣势，有利于 ZTD 的准确解算。

图 3-4 展示了 APMM 和 APMB3S 站的相位观测值周跳数量的比较结果。相位观测值的质量直接影响精密定位解算的精度，而相位周跳的发生容易使得模糊度参数重新收敛，影响 ZTD 的估计质量。从图中可以看出，测地型设备 Septentrio PolarX5TR 的周跳数量要低于低成本设备，反映出低成本天线和接收机的硬件不足会影响相位观测值的质量和稳定性。同时，各卫星信号间也存在一定的差异，伽利略系统卫星信号的周跳数量要显著少于其他系统。因此，基于低成本设备的 ZTD 解算会受到相位噪声的影响，其后处理和实时估计精度值得深入探讨。

从上述质量分析结果可知，低成本设备的观测值质量要略差于测地型设备，尤其是在相位观测值上。改进基于低成本设备观测值的参数估计精度，有利于发挥其性价比优势，为获取密集化对流层监测提供廉价的实现手段。

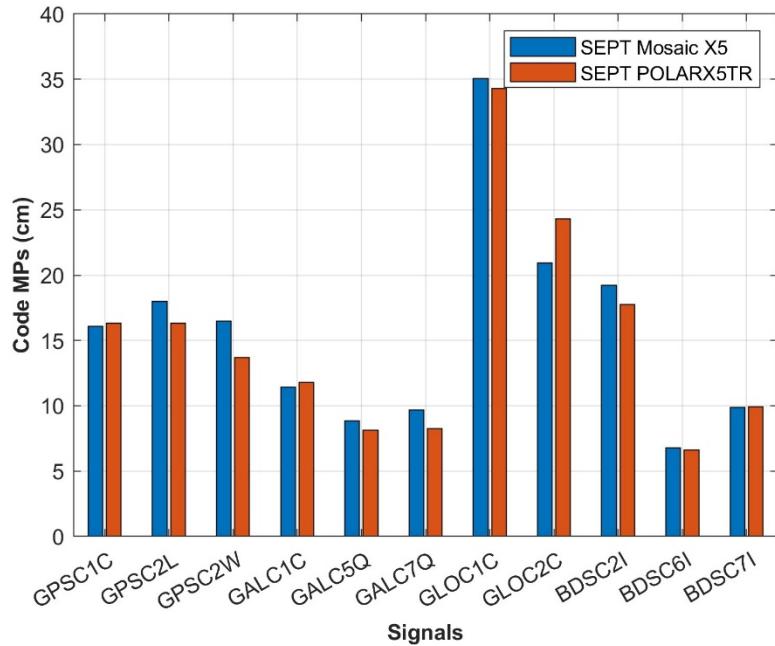


图 3-3 低成本和测地型设备的伪距多路径差异

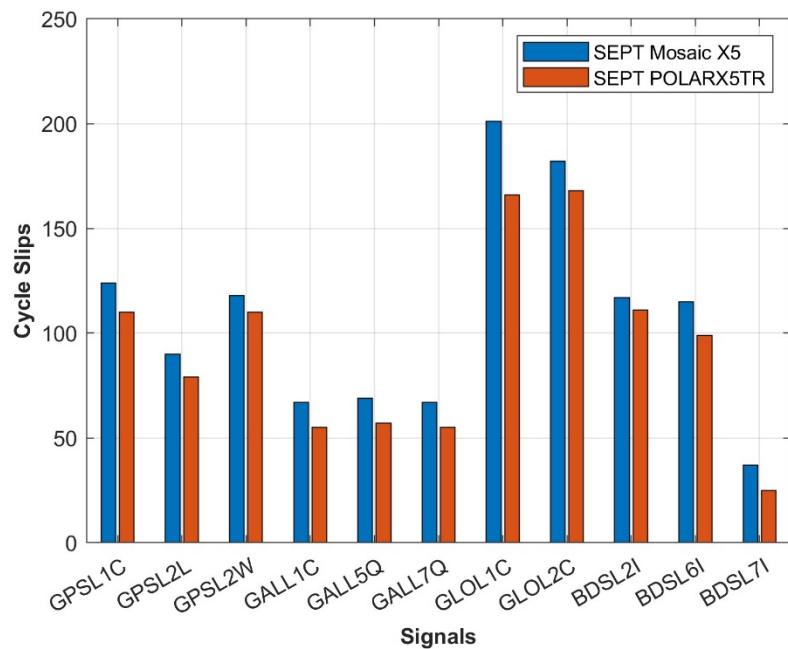


图 3-4 低成本和测地型设备的相位周跳差异

3.2.3 GNSS 数据处理策略

顾及观测值质量和处理策略对低成本和测地型接收机 ZTD 估计的影响差异，

本章分别采取实时和后处理两种模式处理GNSS观测数据来计算对流层延迟。具体的精客单点定位解算策略如表3-2所示。

表3-2 实时和后处理模式的GNSS处理策略

项目	策略	
	后处理	实时
观测值	GPS/BDS-3 原始伪距相位观测值	
频率	L1/L2 for GPS and B1I/B3I for BDS-3	
轨道和钟差	GFZ 最终产品	SSRA00GFZ0（精密轨道钟 差实时流） BCEP00BKG0（综合广播星 历实时流）
采样率	30 s	1 s
模糊度处理策略	浮点模糊度估计	
估计器	卡尔曼滤波（平滑）	卡尔曼滤波（前向）
函数模型	非差非组合	非差非组合
随机模型	天顶方向相位和伪距观测值的先验方差 σ_0 分别为 0.003 and 0.6 m。加权模型: $\sigma = \sigma_0 \sqrt{1 + 4 \cos^8 e}$ (Hadas et al., 2020)	
截止高度角	5°	
卫星PCV改正	igs14.atx	
电离层延迟	白噪声估计	
站坐标	常量估计	
天顶湿延迟	随机游走估计($10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$)	
对流层梯度	每 24 小时估计一次, 估计模型为 $m_g(e) = \frac{1}{\sin(e) \tan(e) + C}$ (Chen and Herring, 1997)	
映射函数	GMF	GMF

3.3 低成本天线PCV的影响及其估计方法

3.3.1 天线PCV对GNSS ZTD的影响

在GNSS数据处理中,接收机天线平均相位中心与天线的几何参考点存在偏差,被称为相位中心偏差(PCO);另外,接收机天线瞬时相位中心会随着信号的方位和高度角发生变化,这项偏差被称为天线相位变化(PCV)。图3-5展示

GNSS 接收机天线 PCO 和 PCV 的示意图。对接收机天线而言，GNSS 信号的相位中心不是固定的，而是随着卫星信号的入射方向变化的，瞬时相位中心偏差主要依赖于卫星的高度角和方位角，其函数模型如式 3-1 所示。

$$PCV = \Delta\phi(\alpha, z) \quad (3-1)$$

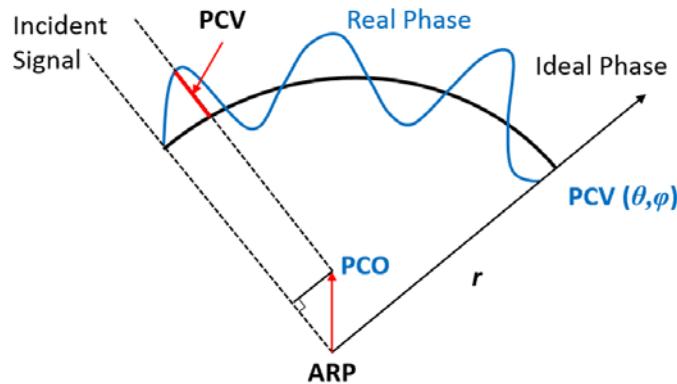


图 3-5 GNSS 接收机天线 PCO 和 PCV 的示意图

在高精度 GNSS 应用中，一般要对接收机天线的 PCO 和 PCV 两项误差进行精密改正。例如，美国大地测量局（National Geodetic Survey, NGS）会定期对当前 GNSS 跟踪网络中常用的接收机天线进行检校，在官方天线校正网站上（<https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/#>）发布天线的 PCO 和 PCV 改正数并更新在天线文件中。但是，NGS 仅针对大地型天线或者部分测量型天线进行标定，低成本 GNSS 天线的 PCO 和 PCV 改正往往难以获取和标定，这给基于低成本接收机的 ZTD 精确提取带来了困难。

在不关注解算位置与参考位置的差异时，例如在仅估计 GNSS 对流层延迟时，PCO 的影响可以被忽略。但是，PCV 在对流层估计中不可忽略。这是因为，卫星信号经过 GNSS 天线端时在不同方位角和高度角时产生的延迟不同。而这部分斜向延迟量在精室断点定位模型中会被投影到天顶方向，进而导致 PCV 在天顶方向的公共误差会被 ZTD 参数吸收，造成 ZTD 估计偏差。具体而言，GNSS 天线的 PCV 随卫星信号入射位置的不同而不同，还与卫星信号和频点存在相关性，这导致 PCV 引起的 ZTD 偏差在结算过程中也是动态变化的，显著降低 ZWD 和 ZTD 的估计精度，同时影响与其他 ZTD 产品的一致性。同时，这种动态变化的 PCV 影响特征，难以采用常量经验模型进行误差抵偿，需要采用 PCV 改正数对原始观测值进行改正。

由于接收机天线的 PCV 对 GNSS 对流层提取的影响显著，获取可靠的 PCV 估计并对其进行精确改正尤为重要。低成本 GNSS 设备往往采用廉价天线进行数据采集。不同于大地测量型（测地型）天线，低成本天线的 PCV 并没有专门机构进行校准和测量，且难以准确获取，这降低了利用低成本终端 GNSS 观测值获

取对流层延迟的可靠性。

因此，本节讨论不同等级天线的PCV对GNSS对流层估计的影响，并给出量化的结果。首先利用九峰山台站的GNSS观测阵列进行实验。JFNG站是配备测地型天线和测地型接收机的IGS跟踪站；JFTA是武汉地区实验网参考站，配置测地型天线和测地型接收机；而JFSP是低成本水汽实验终端，配置有测量型天线和低成本接收机。以JFNG站的CODE后处理对流层产品为参考，对JFNG(测地型天线)、JFTA(测地型天线)和JFSP(测量型天线)的观测数据进行后处理，分别改正和不改正天线PCV，讨论测地型天线和低成本天线PCV改正对ZTD的影响量级。

表3-3展示了九峰GNSS阵列的ZTD在PCV改正前后与参考结果间ZTD差异的统计结果。改正PCV可以显著改进估计结果与参考结果的一致性，ZTD差异的均方根(Root Mean Square, RMS)误差显著降低，JFNG、JFTA和JFSP三个站减小了9.3 mm、2.1和0.7 mm，相对于改正前分别降低了66.2%、20.8%和11.1%，充分说明PCV在ZTD估计中改正的必要性。

表3-3 九峰山GNSS阵列的ZTD在改正PCV前后的质量差异

天线(站点)	不改正PCV	改正PCV	改正后RMS	
			减小百分比	
TRM59800.00 None (JFNG)	13.2/13.9	-1.3/ 4.7	66.2%	
TRM159900.00 None (JFTA)	-6.3/10.1	-2.6/ 8.0	20.8%	
CNTAT360 (JFSP)	3.1/ 7.0	0.8/ 6.3	11.1%	

注：表中数值分别是偏差和均方根误差，单位为mm

图3-6展示了在PCV改正在JFNG站ZTD上引起的差异。从图中可以看出，不改正PCV会对ZTD结果造成约12 mm的显著偏差，改正PCV后的ZTD结果与CODE ZTD基本一致，偏差为-1.3 mm，均方根误差为4.7 mm。

图3-7和图3-8分别展示了测地型天线(TRM159900.00 None)和测量型天线(CNTAT360)在PCV改正前后获得的ZTD差异的分布和累积频次曲线。对于测地型天线(TRM159900.00 None)来说，天线的PCV引起的ZTD误差在6.8 mm，而低成本天线(CNTAT360)PCV引起的ZTD误差在3.1 mm，可见不同天线的PCV引起的ZTD误差不同，量级约在2-4 mm。在正确改正PCV后，配置测地型天线台站的ZTD偏差得以纠正，其ZTD误差分布更趋向参考结果；配置测量型天线台站获得的ZTD质量得到显著提升，与参考结果差异在0.8 mm左右，并且分布在参考值附近的ZTD误差更为集中。

综上，天线的 PCV 效应会导致 ZTD 估计的明显偏差，有必要对其进行有效改正。针对基于低成本接收机的 ZTD 估计应用，需要配置 PCV 已知的测量型天线并施以改正，可以提高 ZTD 结果的可靠性和精度，增加与测地设备结果的一致性。

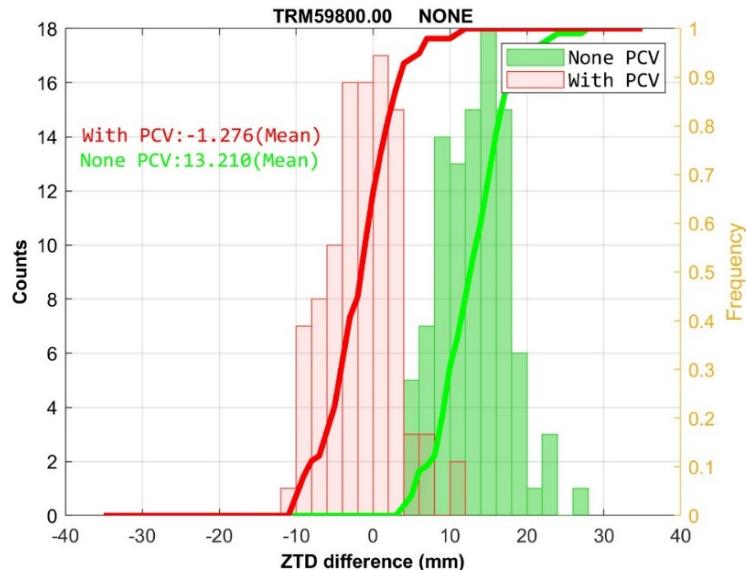


图 3-6 测地型天线 (TRM59800.00 None) PCV 引起的 ZTD 差异的分布和累积频次曲线

注：图中绿色代表不施加 PCV 改正，红色代表施加 PCV 改正

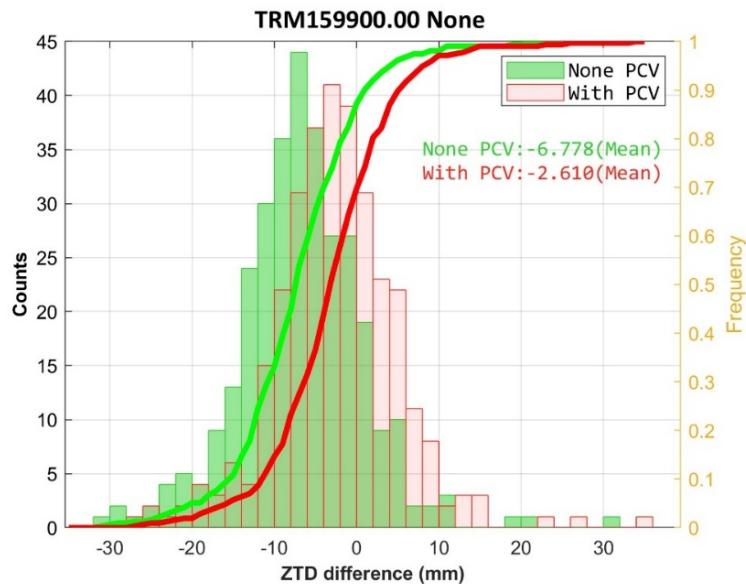


图 3-7 测地型天线 (TRM159900.00 None) PCV 引起的 ZTD 差异的分布和累积频次曲线

注：图中绿色代表不施加 PCV 改正，红色代表施加 PCV 改正

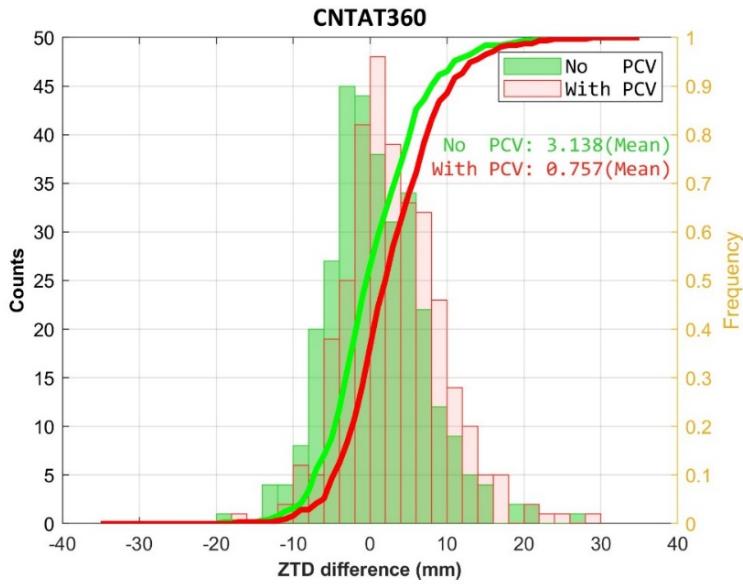


图 3-8 测量型天线 (CNTAT360) PCV 引起的 ZTD 差异的分布和累积频次曲线

注：图中绿色代表不施加 PCV 改正，红色代表施加 PCV 改正

3.3.2 相位中心变化的估计方法

当前 GNSS 接收机天线 PCV 测量方法主要有微波暗室测量法、绝对测量法和相对测量法。其中，微波暗室测量法和绝对测量法虽然能够获取天线精确的 PCV 值，但往往需要专门的暗室实验室或者旋转机械手臂。相对定位法则提供一种更为简便地方式，有利于低成本天线 PCV 的获取。

相对测量法是通过假定参考天线的 PCVs 为 0，来确定被测天线相对于参考天线的相位中心变化的相对值。参考天线与被测天线设置在一个坐标精确已知的超短基线的基墩上，利用相对定位的方法来确定 PCV 差异。由于两个基站位置固定，卫星信号存在空白扇区，无法获得全方位角观测，往往只能获取 PCV 随高度角的变化。考虑到 PCV 随高度角的变化比较明显，而随方位角的变化不大，相对定位法可以满足低成本天线 PCV 的改正需要。

以往研究中相对测量法是利用相位观测值进行单差、双差和三差后进行拟合来进行求取的。事实上，参考天线的绝对 PCVs 值并不为 0，并且还存在其他系统误差，如卫星轨道和多路径等因素的影响。

本节提出采用超短基线相对定位模型来估计天线的 PCV，利用超短基线中大气高度相关直接消除电离层、对流层延迟以及卫星端公共误差的影响，通过双差估计固定模糊度进而将 PCV 差异约束进入相位观测值残差中。然后对残差进行建模和拟合获取 PCV 相对于参考天线的差异，最后根据参考天线 PCV 来计算出测试天线的绝对 PCV 值，如式 3-2 所示。

$$PCV_r = PCV_b + \Delta\phi(\alpha, z) \quad (3-2)$$

其中, r 和 b 分别是流动站和基准站, PCV_b 是基准站的 PCV 模型, PCV_r 是流动站的 PCV 模型, $\Delta\phi(\alpha, z)$ 是流动站相对于基准站的 PCV 差异, 与方位角 z 和高度角 α 相关。

3.3.3 基于相对定位的 PCV 估计方法

在有流动站 r 和基准站 b 组成的短基线中, 由流动站获取的相位和伪距观测方程如 3-3 所示:

$$\begin{cases} \phi_r^s = \rho_r^s + dt_r + \lambda_j \cdot (\varphi_r^s + \delta^s + a_r^s) - m_{r,j}^s I_{r,j}^s + M_{r,j}^s T_{r,j}^s + \varepsilon_{r,j}^s \\ p_r^s = \rho_r^s + dt_r + d_r + d^s + m_{r,j}^s I_{r,j}^s + M_{r,j}^s T_{r,j}^s + e_{r,j}^s \end{cases} \quad (3-3)$$

其中, r 和 b 分别是流动站和基准站, j 是频率, ϕ_r^s 和 p_r^s 分别是相位和伪距观测值, ρ_r^s 是卫星至接收机的概略距离, dt_r 是接收机钟差, d_r 是接收机伪距偏差; φ_r 是接收机相位偏差; d^s 和 δ^s 分别是卫星端伪距和相位偏差; a_r^s 是浮点模糊度; $I_{r,j}^s$ 和 $T_{r,j}^s$ 是电离层和对流层误差; $\varepsilon_{r,j}^s$ 和 $e_{r,j}^s$ 分别是伪距和相位残差。

利用基准站和流动站观测数据进行差分, 可以消除卫星端公共误差和大气延迟, 可以得到如下方程:

$$\begin{cases} \phi_{br}^s = \rho_{br}^s + dt_{br} + \lambda_j \cdot (\varphi_{br}^s + a_{br}^s) + \varepsilon_{br,j}^s \\ p_{br}^s = \rho_{br}^s + dt_{br} + d_{br} + e_{br,j}^s \end{cases} \quad (3-4)$$

然后进行 s_q 和 s_r 卫星间双差, 得到双差方程为:

$$\begin{cases} \phi_{br,j}^{s_q s_r} = \Delta\rho_{br,j}^{s_q s_r} + \lambda_j \cdot (\varphi_{br,j}^{s_q s_r} + a_{br,j}^{s_q s_r}) + \varepsilon_{br,j}^{s_q s_r} \\ p_{br,j}^{s_q s_r} = \Delta\rho_{br,j}^{s_q s_r} + e_{br,j}^{s_q s_r} \end{cases} \quad (3-5)$$

在双差模糊度 $a_{br,j}^{s_q s_r}$ 被正确固定为 $\tilde{a}_{br,j}^{s_q s_r}$ 后, 根据双差残差期望为 0 的假设, 即符合 $\sum_{s_1}^{s_n} \varepsilon_{br,j}^{s_q s_r} = 0$, 获得的相位差异为:

$$\lambda_j \varphi_{br,j}^{s_r} \approx \left(\sum_{s_1}^{s_n} (\phi_{br,j}^{s_q s_r} - \Delta\rho_{br,j}^{s_q s_r} - \lambda_j \tilde{a}_{br,j}^{s_q s_r}) \right) / n \quad (3-6)$$

$$\lambda_j \tilde{\varphi}_{br,j}^{s_q} = \lambda_j \varphi_{br,j}^{s_q s_r} + \lambda_j \varphi_{br,j}^{s_r} = \phi_{br,j}^{s_q} - \Delta\rho_{br,j}^{s_q} - \lambda_j \tilde{a}_{br,j}^{s_q s_r} + \lambda_j \varphi_{br,j}^{s_r} \quad (3-7)$$

将相位差异按照高度角和方位角分划进行平均, 即可获得不同高度角和方位角网格的 PCV 值:

$$PCV_{br}(\alpha, z) = \Delta\phi_{br}(\alpha, z) = \sum_{z=2.5}^{z+2.5} \sum_{\alpha=2.5}^{\alpha+2.5} \sum_{s_1}^{s_n} \lambda_j \tilde{\phi}_{br,j}^{s_q} \quad (3-8)$$

根据上述方程和策略,基于相对定位的天线 PCV 估计流程图如图 3-9 所示。本节将在后文应用低成本 GNSS 短基线数据对方法进行验证分析。

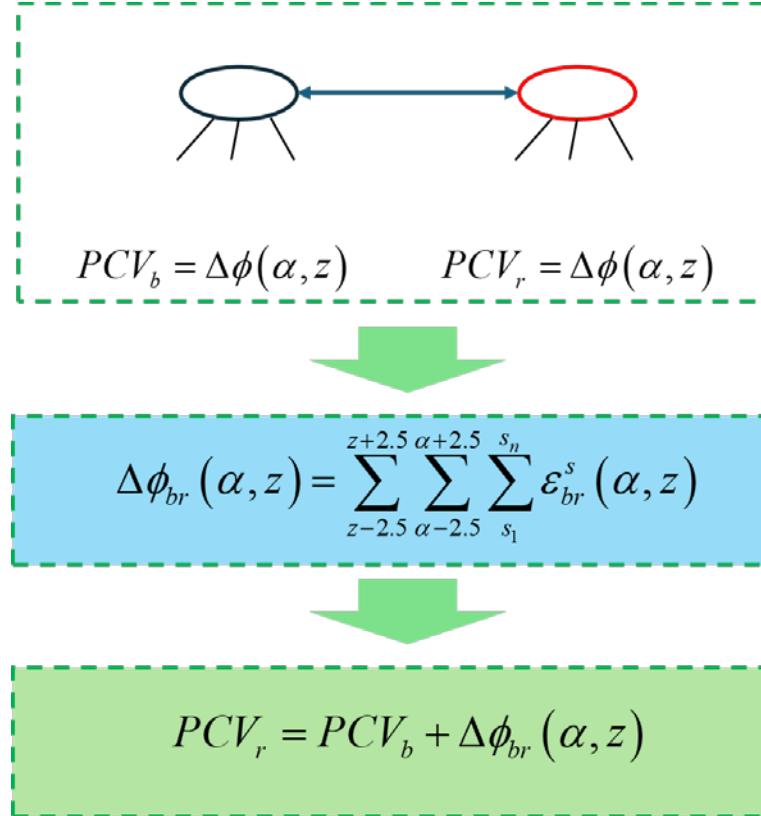


图 3-9 基于超短基线相对定位的天线 PCV 估计流程图

3.3.4 算例结果

利用荷兰代尔夫特大学理工发布的一组开源低成本 GNSS 数据集以及位于代尔夫特大学的 DFL1 IGS 测站,构建超短 GNSS 基线,利用相对定位基线法可提取接收机天线的相对 PCV。参考站配置 Trimble NetR9 型测地型接收机和 LEIAR25.R3 LEIT 天线,流动站配置低成本 GNSS 接收机(ublox ZED-F9P)和测试天线 ublox ANN-MB-00,基线长度 12.6 m,高差在 1 m 左右。

为检验上述方法在提取 PCV 上的应用效果,流动站在 2019 年 DOY 58-62 配置该天线,本节利用上述估计方法获得低成本天线的 PCV,并与参考结果进行做差。其中,ANN 天线的参考 PCV 来自 Wu et al. (2024)。由于天线 PCV 差异主要表现在高度角,因此与参考结果的比较仅分析经方位角平均后 PCV 在高度角上的差异。考虑到低高度角对应的观测值残差显著增大,估计的 PCV 存在较大的不确定性,设置截止高度角为 7.5°。低高度角的 PCV 可以通过多项式进行拟合得到。

图 3-10 展示了 ANN 天线在 GPS L1 和 L2 频点随高度角变化的 PCV 差异。从图中可以看出，ANN 天线在 L1 的 PCV 差异呈一个倒 V 字形，范围在 -6 到 8 mm 之间；最大差异在 40° 高度角附近，约 7.8 mm。从多天的结果可以看出，PCV 估计在高高度角和低高度角差异较大。高高度角处的差异主要是由于卫星观测值较少且受参考星切换的影响。在低高度角处的估计误差主要是受到多路径等误差的影响，存在较大的观测噪声导致的。L2 频点的 ANN 天线 PCV 与 L1 频点的表现存在显著差异，PCV 最大负偏差发生在 30-40°，且量级在 -5 mm 左右；最大正偏差在 10° 左右，量级在 10 mm 左右。

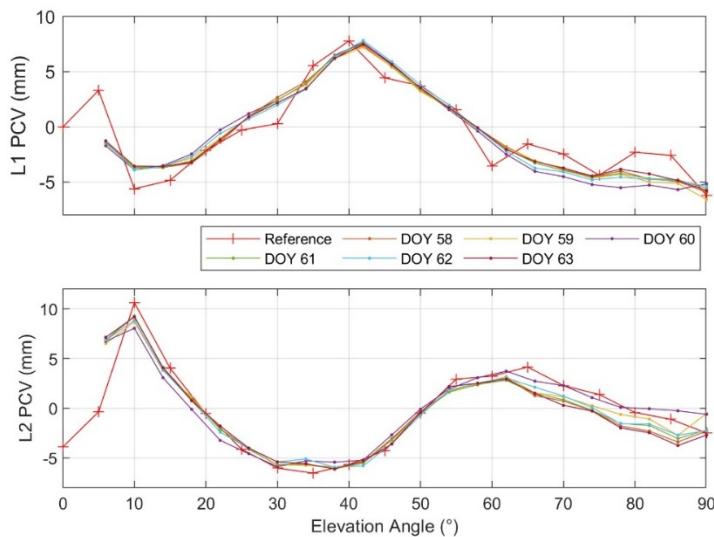


图 3-10 Ublox ANN-MB-00 天线相对于参考天线在 GPS L1 和 L2 的 PCV 差异

为进一步说明 ANN 天线 PCV 随方位角和天顶角的关系，本节利用计算的 ANN 天线的相对 PCV 差异，分别恢复了 ANN 天线在 L1 和 L2 频点的 PCV 图，如图 3-11。从图中可以看出，ANN 天线的 PCV 主要随高度角变化，在方位角上变化并不明显。一般来说，可以采用一个简化的高度角模型来描述 ANN 天线的 PCV 变化。另外，值得注意的是，L1 和 L2 频点的 PCV 并不一致，PCV 和频率显著相关。L2 频点的 PCV 图最大偏差发生的高度角区间与 L1 频点明显不同。同时，以上 ANN 天线 PCV 估计结果表明，低成本天线存在较大的 PCV 变化，在估计 ZTD 或者估计位置时，需要对其天线的 PCV 进行严格改正。

综上，本节提出的方法可以简便地获得低成本天线的 PCV 改正，能够提高低成本终端获得的 GNSS 观测值质量，有利于突破低成本终端在大气监测领域的精度局限。

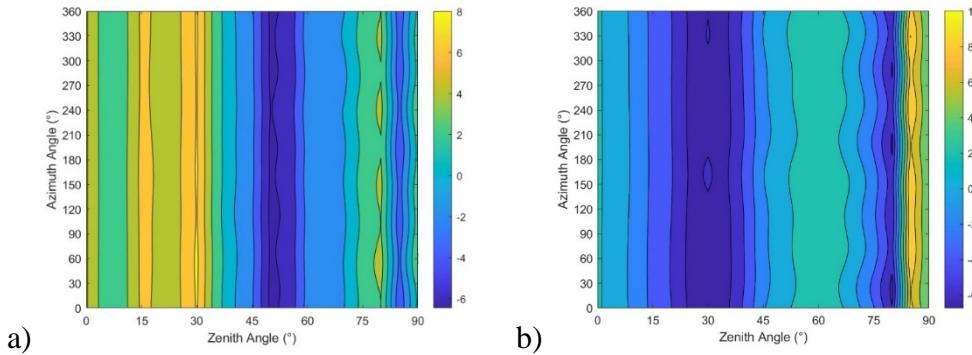


图 3-11 Ublox ANN 天线在 L2 频点的 PCV 图

3.4 低成本北斗/GNSS 设备的后处理 ZTD 精度

在改正 PCV 偏差后，本节分别对在九峰山布设的 3 个并址 GNSS 台站获得的后处理 ZTD 结果进行比较，验证后处理算法的精度质量以及分析不同等级接收机和天线配置对 ZTD 结果的影响。

图 3-12 展示了 JFNG 站的后处理 ZTD 序列。在 DOY 176-181 期间，短时间内 ZTD 先快速减小了 224 mm，随着又增加了 308 mm，充分反映了对流层延迟在此期间发生剧烈的变化。以 JFNG 站的 CODE ZTD 序列为参考，后处理结果与 CODE ZTD 的基本符合，ZTD 差异的偏差和均方根误差分别为 -1.3 mm 和 4.7 mm。由此可见，后处理软件计算的 ZTD 结果精确可靠，与 CODE 的后处理 ZTD 的质量基本相当。在后文中，当无第三方 ZTD 产品作为准确参考时，以后处理软件计算的 ZTD 结果作为有效参考。

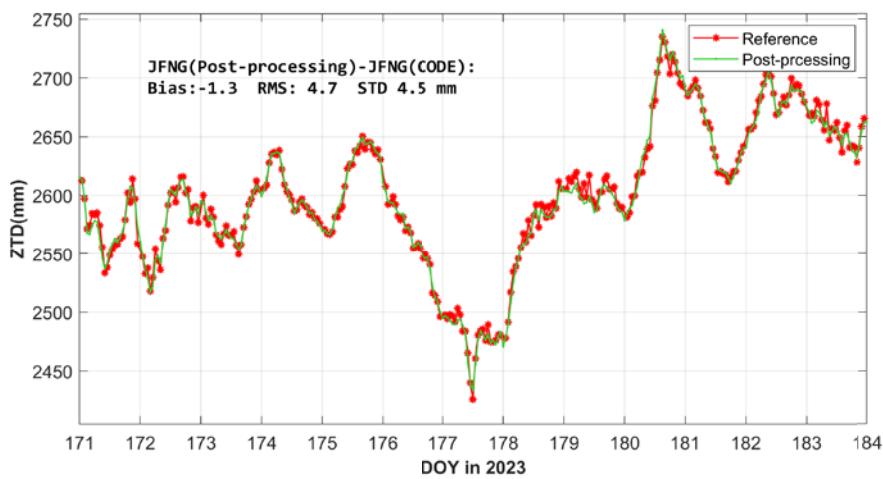


图 3-12 JFNG 站在夏季实验中的后处理 ZTD 序列

注：以 JFNG 站的 CODE ZTD 产品为参考，标记为红色圆点；利用自研后处理 PPP 软件计算的 ZTD，标记为绿色折线

考虑到对流层变化的季节性差异，本节对 JFTA 和 JFSP 在夏季和冬季的 ZTD

精度进行了分析。如图 3-13 所示。

在夏季实验中, 如图 3-13(a)所示, 低成本站 JFSP 平均偏差、标准差和均方根误差分别为 0.8 mm, 6.3 mm 和 6.3 mm; 测地型站 JFTA 分别是-2.6 mm、7.5 mm 和 8.0 mm。从夏季实验统计结果可知, 低成本终端获取的 ZTD 相较测地型终端没有明显精度差异, 甚至在数值指标上要略优于测地型终端。在夏季连续两周的实验中, ZTD 在 DOY 175-181 发生剧烈变化。低成本接收机能够较好地反映 ZTD 的快速, 与 CODE 后处理结果基本一致, 也证明后处理软件可以兼容低成本 GNSS 观测数据并获得高质量的 ZTD 结果。

在冬季实验中, 如图 3-13(b)所示, 对流层变化较夏季要平稳, 但也会发生快速扰动, 整体的对流层延迟小于夏季。低成本接收机计算的 ZTD 均方根误差在 6.0 mm, 测地型终端获得 ZTD 均方根误差在 6.7 mm。两个站点的冬季 ZTD 精度要比夏季略好, 其标准差均减小 1 mm。通过以上两个季节的 ZTD 结果表明, 低成本设备获得的后处理对流层延迟结果精度与测地型设备基本相当, 能够准确反映 ZTD 的扰动变化, 同时冬季结果要略好于夏季。

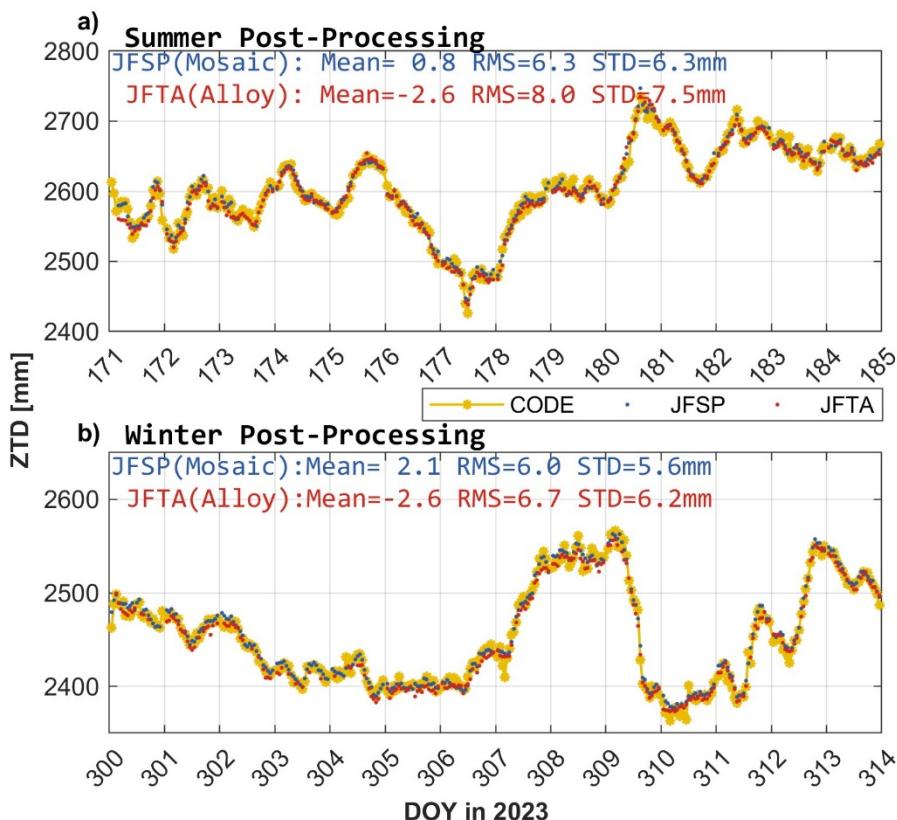


图 3-13 JFSP (低成本站) 和 JFTA (测地型站) 在夏季和冬季实验中的 ZTD 序列

注: 以 JFNG 站的 CODE ZTD 产品为参考, 标记为黄色圆点; 利用自研后处理 PPP 软件计算 JFSP 站和 JFTA 的 ZTD 结果分别标记为蓝色圆点和红色圆点。上图为夏季的 ZTD 序列, 下图为冬季的 ZTD 序列

另外，本节对东湖园区的GNSS阵列中4台终端获得的后处理ZTD进行交叉验证。UBUU站被部署在东湖园区二号楼7层楼顶，另外三台终端部署在三号楼10层楼顶，天线在同一高度。UBUU与APMM存在约13m的高度差异。表3-4展示各站间ZTD差异的统计结果。从表中结果可知，尽管配置不同的接收机和天线，各GNSS站之间的ZTD差异的均方根误差优于4.6mm，与前述CODE ZTD比较结果的精度水平相当，说明后处理结果具有较好的一致性。由于UBUU与其他各站存在高度差异，且高度归算会给ZTD引入一定误差，UBUU与各站的偏差和均方根误差等指标略大。因此，本节后续仅讨论3台并址站的结果差异。

表3-4 东湖园区GNSS阵列的后处理ZTD交叉验证结果

站点	APMB3S(测地型接收机+测地型天线)	APMB3T(测地型接收机+低成本天线)	UBUU(测地型接收机+测地型天线)
APMM(低成本接收机+低成本天线)	-1.2, 2.1, 1.7 mm	-0.4, 3.0, 3.0 mm	2.0, 4.6, 4.2 mm
APMB3S(测地型接收机+测地型天线)		0.7, 3.0, 3.0 mm	0.8, 4.4, 4.3 mm
APMB3T(测地型接收机+低成本天线)			1.6, 4.4, 4.2 mm

注：表中从左至右分别是：偏差、均方根误差和标准差，单位为mm

以APMB3S(测地型终端)的结果为参考，APMM的ZTD偏差和均方根误差分别在-1.2mm和2.1mm；而与配置低成本天线(UA35)的测地型接收机APMB3T相比较，偏差和均方根误差分别在-0.4mm和3.0mm。与各站的ZTD差异的标准差约为3mm。结果表明低成本接收机硬件没有给ZTD估计引入明显的偏差和噪声，ZTD精度与测地型终端的质量相当。另外，由于配置的UA35天线缺少有效的PCV改正信息，测地型台站APMB3T受到低成本天线噪声和未改正PCV的影响，这给ZTD估计引入了噪声，降低了测地型设备与并址站结果的一致性，由此也说明低成本天线PCV对ZTD结果的影响。

综上，从数值统计结果和ZTD序列来看，低成本终端提取ZTD的精度在2-3mm，与并址测地型GNSS站的结果具有显著的一致性，为对流层延迟高精度监测提供一种低成本高精度的可靠方案。另外，在利用低成本或者测量型天线获取GNSS数据来解算ZTD时，要考虑PCV给ZTD带来的偏差，否则会降低ZTD结果的估计精度。

3.5 低成本北斗/GNSS终端的实时对流层延迟估计

在基于后处理模式讨论了低成本终端和测地型终端在获取ZTD方面的精度

质量及其影响因素后,本节接下来对低成本北斗/GNSS 终端和测地型设备在实时 ZTD 的估计表现进行研究。

以九峰山 GNSS 阵列为例,图 3-14 展示了 JFSP (Septentrio Mosaic X5) 和 JFTA(Trimble Alloy)两个站在夏季实时估计的 ZTD 序列和细节日变化,以 JFNG 的 CODE ZTD 作为外部参考。时间选取为 2023 年 6 月 19 日到 7 月 3 日 (DOY 171-185),此时间段为对流层延迟变化较为活跃的夏(暖)季,用于表现对流层发生短时剧烈变化的实时估计精度。

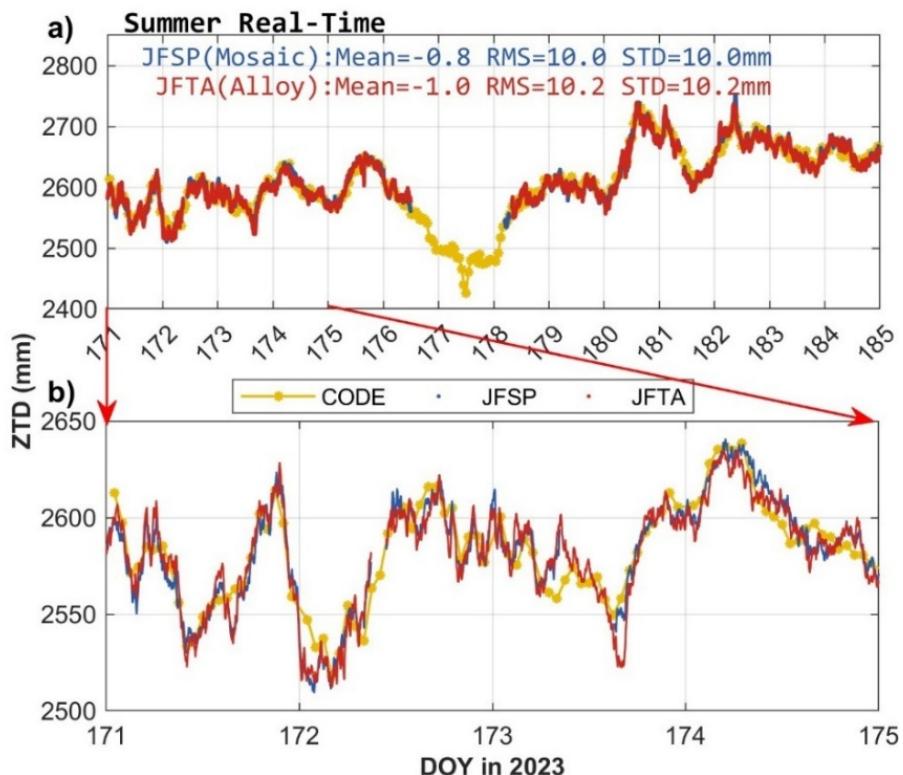


图 3-14 JFSP (低成本站) 和 JFTA (测地型站) 在夏季实验中的实时 ZTD 序列

注: 以 JFNG 站的 CODE ZTD 产品为参考, 标记为黄色圆点; 利用自研实时 PPP 软件计算 JFSP 站和 JFTA 的 ZTD 结果分别标记为蓝色圆点和红色圆点

从图 3-14 (a)中可以看出,低成本和测地型设备获得的实时 ZTD 与 CODE ZTD 基本一致,偏差分别为 -0.8 mm 和 -1.0 mm , 均方根误差分别为 10.0 mm 和 10.2 mm 。受到实时精密产品和单向滤波策略的影响,两者 的 ZTD 结果噪声明显更大,均方根误差要比后处理结果略高 2-4 mm。同时,低成本结果与测地型设备的结果在均方根误差和偏差没有明显差异,说明实时产品和处理策略是实时 ZTD 的质量损失主要原因。为具体说明在 ZTD 发生短时变化的估计质量,图 3-14 (b)展示了 ZTD 在 DOY 171-175 的细节变化和低成本设备的估计结果。在此期间,ZTD 急剧减小约 200 mm。总体来看,低成本接收机的实时结果能够较为清楚反映该 ZTD 变化,且与测地型终端实时获得的结果基本一致。当然,受到对

流层的扰动影响，基于低成本观测值解算的ZTD也出现一定偏差（如DOY 173-174期间）。在反映对流层短期扰动引起ZTD极值上，低成本设备的灵敏性和准确性要略差，这与保守的随机模型策略同ZTD剧烈变化不适应有关。但是在其他扰动变化过程中，低成本设备的ZTD估计与测地型设备和CODE ZTD的结果基本一致。

综上，以上结果表明，低成本终端能在对流层发生剧烈变化时提供同测地型设备基本一致的ZTD实时估计。当前ZTD估计表现反映了低成本设备在实时捕获对流层短时变化上极具潜力和性价比优势。

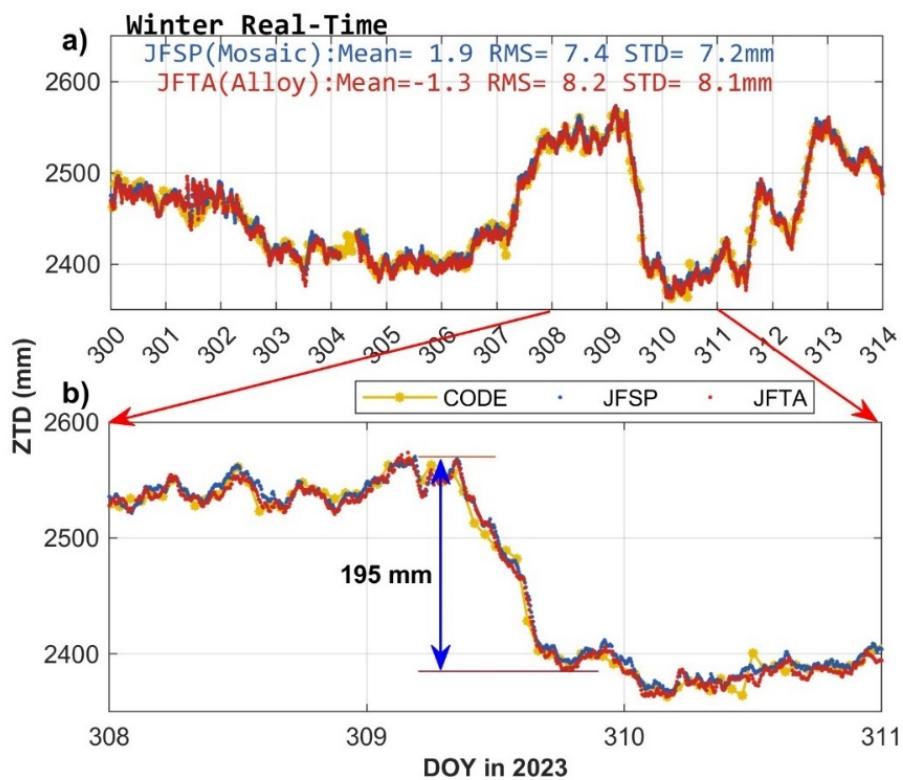


图3-15 JFSP（低成本站）和JFTA（测地型站）在冬季实验中的实时ZTD序列

注：以JFNG站的CODE ZTD产品为参考，标记为黄色圆点；利用自研实时PPP软件计算JFSP站和JFTA的ZTD结果分别标记为蓝色圆点和红色圆点

图3-15展示了JFSP和JFTA在冬季实验中实时ZTD序列及其细节日变化，时间选取为2023年10月27日到11月10日（DOY 300-314），用于代表水汽活跃水平相对较低的冬（干）季，平均ZTD要显著低于夏（暖）季约200 mm。从图3-15(a)中可以看出，低成本和测地型设备的结果基本相当，其均方根误差分别为7.4 mm和8.2 mm，较夏季分别提高了26.0%和19.6%。在图3-15(b)中，对流层在DOY 309-310发生剧烈变化，一天内ZTD减小195 mm，而低成本设备可以很好地刻画这一变化，且与后处理结果和测地型终端的结果基本相符。结果表

明低成本设备可以获得稳定可靠实时 ZTD，具有开展实时高精度对流层监测的应用潜力。

为进一步探究实时 ZTD 估计质量的影响因素，以后处理结果参考，本节两组 GNSS 阵列获得的 ZTD 精度质量并研究不同 GNSS 接收机和天线对实时 ZTD 精度的影响。表 3-5 统计了 7 个台站获得的实时 ZTD 相对于后处理结果的差异。从表中可以看出，各站点的实时 ZTD 与后处理结果都具有较高的一致性，均方根误差优于 12.6 mm，皮尔森系数要高于 0.96。位于不同位置的两台低成本终端获得的实时 ZTD 具备一致的偏差和均方根误差，冬季的估计精度略高于夏季，精度优于 10.3 mm。和并址的测地型终端相比，低成本终端在获得同等 ZTD 估计精度的同时，其终端硬件成本明显更低，有较好的成本效益优势。

综上，低成本北斗/GNSS 终端在实时也可以获得高分辨率对流层延迟，精度优于 10 mm，质量稳定可靠，能够较好地刻画剧烈对流层变化下的 ZTD；与测地型终端的估计质量基本相当，具有显著的性价比优势，是实时对流层监测网络中测地型终端的替代和补充设备。

表 3-5 7 个台站实时 ZTD 估计质量统计

Station	Mean (mm) Summer/Winter	STD (mm) Summer/Winter	RMS (mm) Summer/Winter	Pearson CCs Summer/Winter
APMM (low-cost)	0.3 / 1.3	10.3 / 6.3	10.3 / 6.4	0.975 / 0.993
APMB3S (geodetic)	-1.0 / -	10.4 / -	10.4 / -	0.986 / -
APMB3T (geodetic)	-1.0 / -	9.0 / -	9.0 / -	0.981 / -
UBUU (geodetic)	3.6 / 4.1	12.1 / 7.3	12.6 / 8.4	0.992 / 0.990
JFSP (low-cost)	-1.4 / -0.3	9.6 / 7.0	9.6 / 7.0	0.981 / 0.991
JFTA (geodetic)	1.8 / 1.5	12.5 / 7.9	12.6 / 8.0	0.961 / 0.990

3.6 强降雨天气下的实时 ZTD 响应

强降雨等恶劣天气事件会带来大气水汽的快速波动和短时蓄积，也会引起对流层延迟的剧烈变化。利用高时间分辨率的 GNSS-ZTD 监测可以灵敏地监测对流层变化，为天气预报模型提供准确的同化数据资料，并改善强降雨等极端天气的临近预报预警的精度和可靠性。

低成本终端可以获得实时ZTD，在实现高时空分辨率的对流层水汽监测具有显著的优势和潜力。然而，强降雨等天气事件会给对流层带来短时间的剧烈变化，这给利用低成本终端开展对流层监测带来了挑战。确保低成本终端在对流层剧烈变化情况下的真实ZTD估计质量是当前开展低成本终端业务应用的重要前提。为此，基于在武汉市区布设的两组GNSS阵列，通过发生对流层剧烈扰动的一次强降水事件来检验低成本北斗/GNSS终端在强降雨期间的实时ZTD估计性能。

根据历史天气记录，2023年6月29日傍晚到30日上午（北京时间），武汉市自西向东有大到暴雨、局部大暴雨，伴有短时强降水、雷暴大风等强对流天气，大部累计雨量40~80毫米，局部150毫米以上，最大小时雨强50~70毫米。

首先以九峰山台站的GNSS阵列为例，图3-16展示JFSP在武汉强降雨期间内的实时估计ZTD（蓝细线），CODE ZTD产品（黄线）和ERA5积分的ZTD结果（紫线）也作为参考同样绘制在图内。图中蓝色矩形柱表述1小时累计降水量，指示降水事件的强度和时间。从图中可以看到，在降水事件中，ZTD会在降水前十几小时呈现震荡上升的趋势，且降水过程中伴有一次急剧的波动，最后在降水结束后陡然下降。

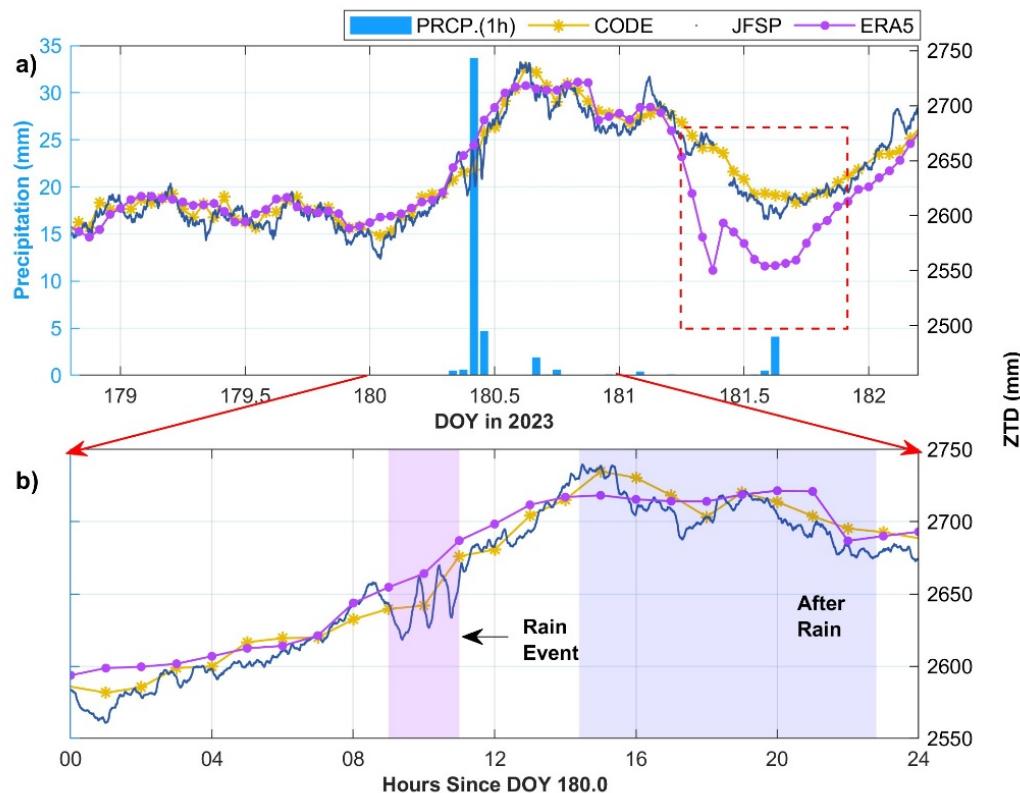


图3-16 JFSP在武汉强降雨事件中实时估计ZTD的精度表现

注：JFSP的实时ZTD标记为蓝色圆点；JFNG的CODE ZTD标记为黄色‘*’；JFSP的ERA5 ZTD标记为紫色圆点；3小时降水量用蓝色矩形柱表示

在强降水事件发生前，首先 ZTD 在 6 月 29 日（DOY 180）开始快速增长，最大变化约 170 mm。低成本接收机（JFSP）实时结果能够清晰地反映 ZTD 的变化过程，与 CODE 的后处理结果基本一致。而在 9 点（世界时）到 11 点期间，武汉气象站记录超过 33 mm/h 的强降雨。暴雨引起水汽的快速变化，导致 ZTD 发生快速波动，这一结果被 JFSP 很好地记录下来。这也反映强降雨引起的 ZTD 扰动会给实时 ZTD 估计造成负面影响，固定的随机游走估计策略刻画 ZTD 快速变化时存在局限。同时，CODE 结果由于采样点较为稀疏，难以清晰刻画 ZTD 在此期间的波动变化，而低成本设备实时估计的 ZTD 能以较高的时间分辨率反映降水中的对流层扰动变化。以上结果初步证实其在强降雨等极端天气预报预警上具有应用潜力。

另外，需要进行讨论的是，图 3-16 (b) 中 ZTD 达到峰值，并不一定会形成降水，水汽的上升蓄积只是降雨发生的必要先决条件之一。一些外部动力因素，如热力学变化，也是引发降雨的必要因素。如果不满足外部动力因素的条件，即使 ZTD 值处于高水平状态，降雨事件也可能不会发生。

在东湖园区 GNSS 阵列中，图 3-17 展示了 3 台并址北斗/GNSS 设备监测到的强降雨过程中的对流层变化。APMM、APMB3T 和 APMB3S 代表不同接收机和天线组合获得的结果，分别用红线、蓝线和青线表示。另外，根据站点位置计算的 ERA5 ZTD 也被绘制以作为外部参考。

从图中可以看到，APMM、APMB3T 和 APMB3S 都能较好地反映 ZTD 在降水事件的变化过程。在降水发生前，三者获得的 ZTD 基本一致。如图 3-16 (b) 所示，在降水事件发生前后，强降雨引起 ZTD 扰动变化，三者估计的实时 ZTD 发生较为明显的抖动变化并在降水结束后短暂出现 ZTD 估计结果的明显分异。尤其是在 DOY 180 的 12 点，APMM 站（配置低成本接收机和测量型天线）和 APMB3T（配置测地型接收机和测量型天线）的结果基本一致，但是要高于 APMB3S（配置测地型接收机和天线）得到的 ZTD 约 10 mm。这种明显的差异，可能是由于实时估计中对流层扰动引起参数状态估计差异导致的。此外，以上结果也说明：在对流层发生剧烈变化期间，即使是相同的实时 PPP 处理算法，根据不同设备 GNSS 观测值解算的 ZTD 也存在一定的差异。在集中降水结束后，ZTD 达到顶峰不久后开始缓慢“阶梯型”下降，下降后还会有抬升，这与九峰山 GNSS 阵列记录的结果相一致。而三者实时估计的 ZTD 结果趋于一致。这也说明对流层的扰动变化会给 ZTD 实时估计中带来较为明显的负面影响，实时高精度的 ZTD 估计算法和处理策略还需要在后续利用更多的极端天气事件进行验证分析和改进。

与此同时，上述研究结果也初步表明，低成本设备相较于测地型设备在反映对流层扰动变化上还存在一定的不足和局限。但是，本文的重点是论证低成本设备在 ZTD 估计质量上能达到与测地型设备基本相当的水平，并且具有较高的性

价比优势,有利于实现密集化且高时效的对流层观测。在精度基本可靠的前提下,降低GNSS监测终端的硬件成本,提高并改善观测网络的高时空分辨率和时效性,更有利于实现高质量的对流层监测,并在实现极端天气预报预警上具有显著的应用优势。

因此,上述研究结果初步证明,低成本北斗/GNSS终端可以在实时获得与测地型设备和ERA5相一致的ZTD估计结果,在强降雨天气事件中能够有效探测ZTD的快速扰动,在监测对流层趋势变化上具有高时效和高时间分辨率的优势。同时,研究结果也表明本文提出的基于低成本北斗/GNSS终端的实时ZTD估计方法的稳定可靠,能够满足极端天气下高精度ZTD估计的精度需要。

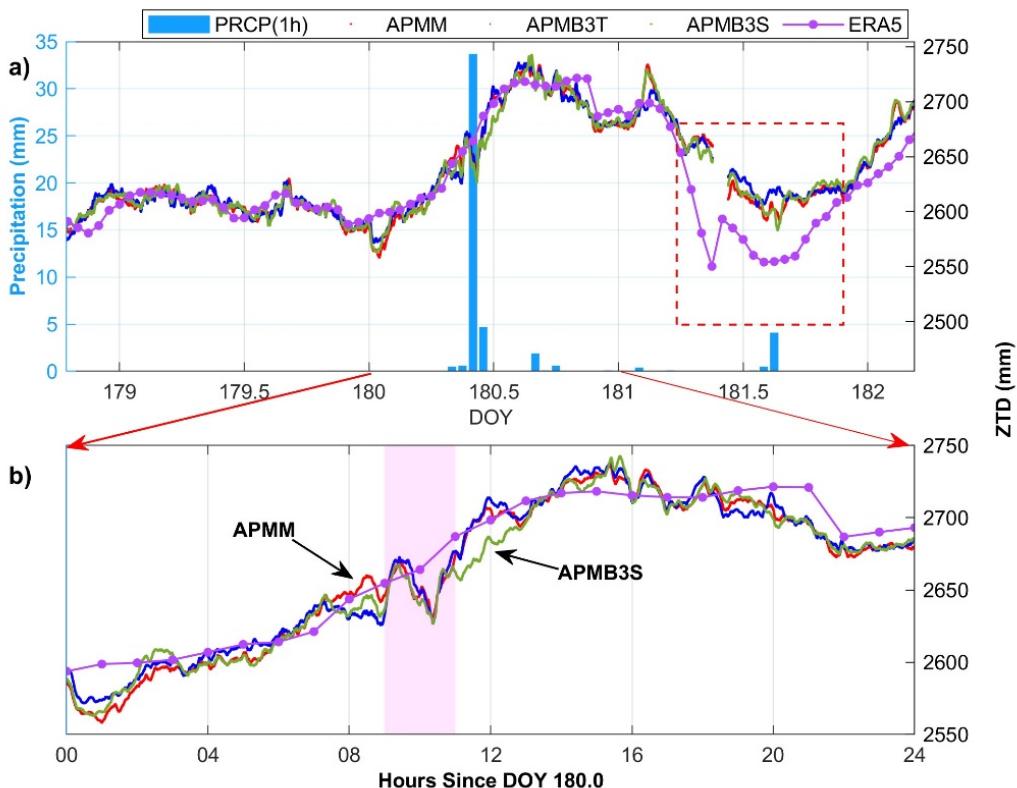


图3-17 APMM、APMB3T和APMB3S在武汉强降雨事件中实时估计ZTD的精度表现

注: APMM 的实时 ZTD 标记为红色圆点; APMB3T 的实时 ZTD 标记为蓝色圆点;
APMB3S 实时 ZTD 标记为绿色圆点; ERA5 ZTD 标记为紫色圆点; 3 小时累计量
用蓝色矩形柱表示

3.7 本章小结

本章研究了低成本接收机获得高精度对流层延迟的关键步骤和问题:(1)低成本天线PCV对ZTD的影响,(2)低成本天线PCV的简便估计方法,(3)实时和后处理的ZTD精度质量,(4)在强降雨等扰动天气下ZTD的响应。利用两组独立的GNSS阵列数据,包括7台低成本和测地型接收机,分别在夏季和冬季

验证低成本接收机在实时获取对流层延迟的表现，与测地型终端的结果基本相当且估计精度优于 10 mm；另外，在武汉强降雨事件中，低成本接收机表现出稳定可靠的对流层估计质量，清晰地反映降水事件中的 ZTD 变化，可以为实现“高时空分辨率”对流层观测提供硬件支持。以上结果，一方面从方法上厘清了低成本北斗/GNSS 设备获取实时对流层的影响因素和精度水平，另一方面从应用上验证了低成本设备在探测极端天气下的对流层扰动变化的潜力，为开展基于低成本设备的水汽监测应用提供研究参考。

第4章 高时效GNSS水汽反演关键辅助参数模型研究

地基GNSS水汽反演是重要的水汽监测技术，其关键过程需要依赖两个重要的辅助参数：天顶静力学延迟（ZHD）和大气加权平均温度（Tm）。传统水汽反演方法需要依赖并址气象传感器采集温压等实测气象参数，且多数GNSS测站存在气象观测数据质量差、不完整和无法实时获取等问题。现有的对流层经验模型、再分析资料和VMF格网产品分别在精度、时效性和时间分辨率等方面存在不足，且在天气剧烈变化场景或大高差复杂地形存在局限性，难以满足高精度实时水汽反演的要求。本章提出利用数值天气预报模式来构建实时对流层辅助参数预报模型HDTM，为实时水汽反演提供高时效性和高精度的ZHD和Tm参数，时间分辨率也提高到1小时，既解决了水汽反演业务中对并址气象传感器的依赖，也改善了实时水汽监测业务的模式和时效性，能有效推动实时GNSS水汽监测技术在极端天气预报预警中的应用。

4.1 引言

地基GNSS水汽反演是一种监测水汽分布和趋势变化的重要技术手段，可以为强降雨等极端天气提供可靠的水汽观测结果。相比于其他水汽观测手段，地基GNSS具有较高的时间分辨率和精度、实时运行和全天候工作等优势(Bernet et al., 2020, 施闯 et al., 2022)，且被世界气象组织全球气候观测系统高空大气参考网列为I类大气水汽观测手段(Seidel et al., 2009)。密集布设的GNSS站网为开展水汽监测提供了丰富的观测资源，可在水汽剧烈变化的极端天气情况下实现更高时效和更为精确的响应和观测，有助于改善当前天气预报业务的表现(Guerova et al., 2016, Rohm et al., 2014, Li et al., 2023a)和极端降水等灾害天气的预警(Ninsawat et al., 2022, Bosser et al., 2024, Wilgan et al., 2023)。

天顶静力学延迟（ZHD）和大气加权平均温度（Tm）是GNSS水汽反演过程中两项重要辅助参数(Askne and Nordius, 1987, Davis et al., 1985)。在传统水汽反演技术中，ZHD一般是利用气压传感器采集的站点气压再根据Saastamoinen模型计算得到的(Saastamoinen, 1972)，而大气加权平均温度一般是利用Bevis模型根据实测站点温度得到的(Bevis et al., 1992)。其中，1 hPa大气压的误差会带来0.33-0.37 mm的PWV误差，而5 K左右的Tm误差会给PWV引入约1.7-2.0 %的相对误差(Hagemann et al., 2003)。另外，现有的GNSS观测网络往往是以定位为目的建设的，通常不会安装并址的气象传感器，且部分配置气象传感器的台站

缺少对终端的维护和检定，导致数据存在质量问题，给实时水汽监测带来困难 (Zhang et al., 2021, Zhang et al., 2019)。

为解决没有并址气象观测的问题，有多种方法和模型可提供静力学延迟，例如临近气象参数插值、经验模型和数值天气模型等(Chen et al., 2021, Jade and Vijayan, 2008)。利用临近气象参数进行插值对站点间距要求较高，在站点稀疏的区域并不适用，如青藏高原地区。基于数值天气模型的再分析资料提供全球小时间隔的大气状态参数，利用数值积分获取的 ZHD，一般较为准确，但是资料发布往往滞后一周左右，这使得其无法有效应用在实时水汽反演中(Huang et al., 2021)。经验模型通过拟合气压等参数的历史序列来构建，能够较好反映的参数的周年、半周年和季节性变化，但在刻画短期变化存在不足，尤其是在发生水汽剧烈变化的扰动天气中(Li et al., 2025)。其中，GPT3 (Global Pressure and Temperature 3) 模型是当前最为先进的对流层参数经验模型，被广泛应用于水汽反演中(朱童 et al., 黄聪 and 郭杭, 2022)。由于参数的精度不足，会给反演的 PWV 引入 2-4 mm 的误差。

T_m 的实时获取也存在相似的局限性。 T_m 被定义为大气温度和比湿廓线的积分值，其可以根据探空站实测气象参数廓线数据进行积分来准确计算。但是释放探空气球往往成本高昂，需要依赖专业的人员和终端。即使在常规气象观测业务中，一般也只会每天观测两次或者四次。现实中，难以采用探空观测来提供 GNSS 站点的 T_m 。而 Bevis 分析美国中部探空数据后建立了 T_m 与地表温度 T_s 的线性关系： $T_m = 0.72 \cdot T_s + 70.2$ ，这使得 T_m 可以灵活地从地表温度观测转换获得(Bevis et al., 1992)。但是 T_m - T_s 的经验关系存在一定的不足，模型依赖于实测参数，且精度存在地区性差异，这容易给 PWV 反演引入误差(Yao et al., 2012)。为改善其在中国区域的表现，也有部分研究者提出建立区域性的 T_m 模型 (Yao et al., 2013, Yao et al., 2012, 谢劭峰 et al., 2023)。现有的经验模型和再分析资料可以提供 T_m 参数，其在精度和时效性上存在与 ZHD 类似的局限性。

因此，针对于实时水汽反演，亟需一个低时延、精度稳定和获取便捷的 ZHD 和 T_m 模型。当前的数值天气预报 (NWP) 经历多次迭代和更新，在精度和空间分辨率上不断提高，例如美国国家环境预测中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 的 GFS (Global Forecast System) (Yang and Tallapragada, 2018) 和欧洲中尺度天气预报中心 (ECMWF) 的 IFS (Hersbach et al., 2020)，都能以较高的时间分辨率发布未来 5-10 天内的大气状态，这给 ZHD 和 T_m 的精确预报提供了可能(Chen et al., 2021)。然而，对一般用户而言，获取和处理预报场数据较为麻烦和繁琐，亟需一种便利可靠的处理模式和发布服务来提供全球任意站点的 ZHD 和 T_m 来方便实时水汽反演的实施。

为此，本章利用 NCEP-GFS 和 ECMWF-IFS 两种主流的数值天气预报模型来建立水汽反演辅助参数模型并命名为 HDTM，为实时水汽反演提供精确可靠的 ZHD 和 Tm 预报；同时，利用覆盖中国区域的再分析资料、实测气象参数和探空质量验证了 HDTM 模型的可靠性和准确性，并指出预报服务相对于传统模型和方法的优势和特点；还利用基于中国 GNSS/MET 观测网络的水汽产品分析了 HDTM 模型 ZHD 和 Tm 参数对 PWV 反演误差，进一步验证了其在水汽反演中应用优势。最后，本文提出了一种定制化的 HDTM 模型实时服务模式并编制了适用于实时播发的电文编码规则，为 HDTM 应用提供便利的获取方式。

4.2 数值天气预报模式

数值天气预报将地球分划为一个三维格网系统，在格网点上同化气象观测数据、计算大气状态的物理过程，同时预报未来的大气状态。其中，NCEP-GFS 是一种典型的全球数值天气预报模型，提供全球范围内的天气预报数据，包括地表和高空的气象变量(Yang and Tallapragada, 2018, Chen et al., 2021)。NCEP-GFS 每天在协调世界时（Coordinated Universal Time, UTC）的 00:00、06:00、12:00 及 18:00 进行初始化并向后预报 384 小时，其中前 120 小时的预报间隔为 1 小时，120 小时至 384 小时之间的预报间隔为 3 小时，空间分辨率为 0.25° （约 27 公里）。NCEP-GFS 预报产品提供 41 个气压层的气象要素，包括大气温度、湿度、气压和高度等参量，存储和发布格式一般为 GRIB2。

欧洲中尺度天气预报中心（ECMWF）的 IFS 是另一个全球最先进的数值天气预报模型。ECMWF 最近推出了 Open Data 计划，免费向公众提供部分 IFS 预报数据 (<https://doi.org/10.21957/open-data>)。同时，ECMWF 在 2025 年 3 月宣布会进一步实施其数据开放计划：预计 2025 年 10 月 1 日起，将包括综合预报系统（IFS）与人工智能预报系统（AIFS）在内的所有实时数据，将以最高分辨率向全球用户免费开放。本章工作是 Open Data 计划基础上完成的，未来会持续对模型进行更新和完善。当前，IFS 每天分别进行四次预报，其中在世界时 00:00 和 12:00 进行的两次预报，每次预报未来 240 小时的大气状态，前 144 小时的预报间隔为 3 小时，144 小时至 240 小时之间的预报间隔为 6 小时；在世界时 06:00 和 18:00 进行的两次预报，每次预报未来 90 小时的大气状态，时间间隔为 3 小时。ECMWF-IFS 的高分辨率预报产品提供 13 个气压层的气象要素，存储和发布格式一般为 GRIB2。预报数据通常在 NWP 初始化后 3-5 小时内发布在 Open Data 存档服务器中。

表 4-1 展示了 NCEP-GFS 和 ECMWF-IFS 的基本属性和特征。从表中可知，NCEP-GFS 和 ECMWF-IFS 在预报步长、时间分辨率、驱动场模式和用于同化的

观测数据等方面存在不同，这会导致两者在预报结果上存在一定的差异。为保证基于 NWP 模式建立对流层参数模型的准确性和冗余性，本章同时使用 NCEP-GFS 和 ECMWF-IFS 两个模型来构建水汽反演辅助参数模型。该模型主要是为实时水汽反演提供实时可用的 ZHD 和 Tm 参数，因此将其命名为 HDTM 模型。

表 4-1 NCEP-GFS 和 ECMWF-IFS 模式的特征

数值天气预报 模式	NCEP-GFS	ECMWF-IFS
预报方式及间 隔	00Z: 0-120:1, 120-384:3 小时 06Z: 0-120:1, 120-384:3 小时 12Z: 0-120:1, 120-384:3 小时 18Z: 0-120:1, 120-384:3 小时	00Z: 0-144:3 小时/144-240:6 小时 06Z: 0-90:3 小时 12Z: 0-144:3 小时/144-240:6 小时 18Z: 0-90:3 小时
空间分辨率	0.25°	0.25°
时间分辨率	1 小时	3 小时
等压层	41 层 (1000, 975, 950, 925, 900, 850, 800, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 40, 30, 20, 15, 10, 7, 5, 3, 2, 1 hPa 等)	13 层 (1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 50 hPa)
大气参量	温度、湿度、风速、风向、位势高 度、垂直速度等	温度、湿度、风速、风向、位势高 度、垂直速度
数据同化	集合卡尔曼滤波	四维变分同化 (4D-Var)
数据获取	完全免费	部分数据免费，高分辨率数据收费

由于 GFS 和 IFS 模型初始化后运行和预报需要一定时间，GFS 数据的发布存在一定的时延，一般约为 5 小时。为了使对流层延迟模型满足实时应用的需求，利用 NCEP-GFS 和 ECMWF-IFS 模型每个分析时刻的 5-11 小时预报场作为当前时刻 HDTM 模型的建模数据，如图 4-1 所示。具体而言，在获取每次 NWP 预报产品时，对 GFS 而言，取第 5-11 小时的逐小时产品；而对 3 小时间隔的 IFS 产品预报而言，仅采用第 6 和第 9 小时的产品。

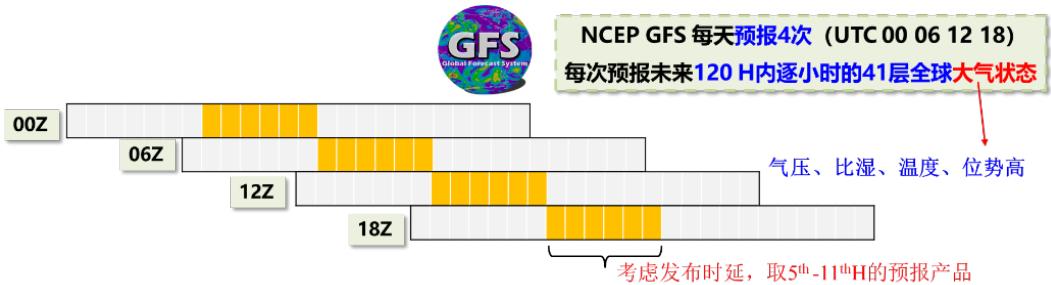


图4-1 NCEP-GFS预报产品使用策略

4.3 对流层辅助参数模型

本节详细介绍基于数值天气预报的GNSS实时水汽反演对流层辅助参数模型(HDTM模型)的建立过程和应用方法。

4.3.1 HDTM模型的建立和发布

尽管GFS和IFS等NWP资料可提供大气温度、气压、风速、风向、湿度等多种气象变量的高时空分辨率三维信息，但NWP资料中不包含ZHD和Tm参数。同时，由于NWP单次预报产品的数据量大，需要利用特定的程序进行处理和读取，不适合实时用户直接从NWP中获取ZHD和Tm。本研究基于NCEP-GFS和ECMWF-IFS两种主流NWP模型提供的免费预报结果，构建提供ZHD和Tm的辅助参数模型HDTM，服务于高精度实时GNSS水汽反演。

HDTM模型建立主要分为三步：NWP的预报，ZHD和Tm的计算，数据格网化。首先，ECMWF和NCEP每天都会分别运行GFS和IFS来预报4次未来的全球大气场，在预报后，从两个预报中心产品存档服务器中获取当次预报时刻的预报产品。考虑两者的时间分辨率差异，采用NCEP-GFS每次预报时刻的第5小时-11小时期间的逐小时预报结果；ECMWF-IFS则采用第6和第9小时预报产品。

为方便GNSS用户便利地获取ZHD和Tm，本节将NWP三维气象预报场转换为二维格网，提供每个格网点在特定高度处的ZHD和Tm。二维格网可以显著地降低数据容量，简化ZHD和Tm的计算。因此，在获取GFS和IFS对应的预报结果后，提取全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 格网(纬度范围: $[89.5^\circ, -89.5^\circ]$ ，经度范围: $[0.5^\circ, 359.5^\circ]$)的大气廓线，并对每个格网点的大气廓线进行数值积分求取ZHD和Tm。其中， $1^\circ \times 1^\circ$ 的全球网格采用的高程系统为大地高，模型网格点高度参数会随产品一起给出。由于GFS和IFS预报产品使用的是位势高，计算ZHD和Tm时需要将位势高转为正高，再通过EGM2008模型的大地水准面差距数据将正高转为大地高，具体转换关系详见第二章。

ZHD 和 Tm 的计算公式如下所示：

$$ZHD = 10^{-6} \sum_{H_{GP}}^{H_{top}} \left[\frac{(H_i - H_{i+1})(Nh_{i+1} - Nh_i)}{\ln Nh_{i+1} - \ln Nh_i} \right] + ZHD_{top} \quad (4-1)$$

$$Nh_i = k_1 R_d \left(\frac{P_{di}}{T_i \cdot R_d} + \frac{P_{wi}}{T_i \cdot R_w} \right) \quad (4-2)$$

$$P_{wi} = \left(\frac{q_i}{0.622 + 0.378 q_i} \right) P_i \quad (4-3)$$

$$P_{di} = P_i - P_{wi} \quad (4-4)$$

$$T_m = \frac{\sum_{H_{GP}}^{H_{top}} \left[(H_{i+1} - H_i) \left(\overline{P_{wi}} / \overline{T_i} \right) \right]}{\sum_{H_{GP}}^{H_{top}} \left[(H_{i+1} - H_i) \left(\overline{P_{wi}} / \overline{T_i}^2 \right) \right]} \quad (4-5)$$

其中， H_i (m) 和 Nh_i (mm/km) 分别是第 i 层的高度和静力学折射因子；

P_i (hPa)、 T_i (K) 和 q_i (无量纲) 分别是第 i 层大气压、温度和比湿； P_{di} (hPa) 和 P_{wi} (hPa) 分别为第 i 层的干空气分压和水汽分压； $\overline{P_{wi}}$ 和 $\overline{T_i}$ 分别是第 i 层到第 $i+1$ 层平均水汽分压和温度； k_1 是折射系数常量； $R_d = 287.053$ (J·K⁻¹·kg⁻¹) 和 $R_w = 461.495$ (J·K⁻¹·kg⁻¹) 分别是干空气和水汽的大气常量， ZHD_{top} 是等压层顶层以上的静力学延迟，可以利用最顶部的大气压根据 Saastamoinen 模型计算得到。

在完成全部格网点的计算后，生成 ZHD 和 Tm 参数格网。当前，HDTM 模型是在每次 NWP 预报后直接发布未来 6 个（相对于每次 NWP 预报时刻的第 5-11 小时）小时的 ZHD 和 Tm 产品，以 ASCII 码的格网文件推送到公网 FTP 服务器，用户可以直接访问和下载。同时也提供其他特色化的服务方式，使得 ZHD 和 Tm 的获取更为简化和方便，具体将在后文介绍。

4.3.2 HDTM 模型的应用方法

HDTM 模型将 NWP 三维气象场处理为二维的 ZHD 和 Tm 格网进行发布，由格网点 ZHD 和 Tm 值内插目标站点 ZHD 和 Tm 分为两步，一是将格网点参数换算到目标高程处；二是通过水平内插算法计算目标站点参数。下面简要介绍气压和温度在垂向和平面的归算方法：

1) 气压的垂向归算模型

在GNSS气象学数据处理中，实测气压可以利用Saastamoinen模型转换为ZHD，精度约为2mm。ZHD的高度修正可以直接转换为气压的高度修正。因此，HDTM模型中ZHD的使用主要可以分为如下三步：格网点ZHD通过Saastamoinen模型逆过程换算为格网点气压；气压在高程方向上的归算；根据归算后的气压计算为ZHD。

$$P_s(H_{GP}) = \frac{(1 - 0.00266 \cdot \cos(2\varphi_{GP}) - 0.28 \times 10^{-6} \cdot H_{GP}) \cdot ZHD_{GP}}{0.0022793} \quad (4-6)$$

$$ZHD_{sta} = \frac{0.0022768 \cdot P_s(H_{sta})}{1 - 0.00266 \cdot \cos(2\varphi_{sta}) - 0.28 \times 10^{-6} \cdot H_{sta}} \quad (4-7)$$

其中， φ_{GP} 、 H_{GP} 、 $P_s(H_{GP})$ 和 ZHD_{GP} 分别是格网点的地理纬度、椭球高、气压和ZHD； φ_{sta} 、 H_{sta} 、 $P_s(H_{sta})$ 和 ZHD_{sta} 分别是GNSS站点的地理纬度、椭球高、气压和ZHD。

在获得格网点气压后，需要利用气压垂向衰减规律将 $P_s(H_{GP})$ 改正到站点高度。在国际标准大气模型下，气压与高度的关系可以通过气压高度公式来表示：

$$P_s = P_s^{MSL} \left(1 - \frac{\alpha}{T_0} h \right)^{\frac{Mg}{\alpha R}} \quad (4-8)$$

其中， h 和 P_s 是站点处的高度和气压， P_s^{MSL} 为海平面的气压； T_0 是海平面温度，一般取288.15K； α 是温度递减率，一般取 6.5×10^{-3} K/m； g 是重力加速度，一般取9.80665m/s²； M 是空气中的摩尔质量，一般取0.0289644kg/mol； R 是气体常量，一般取8.31447J/(mol·K)。

为了简化计算，使用以上常数来近似计算，可以获得 T_0 常量公式如下所示：

$$P_s^{sta} = P_s^{MSL} \left(1 - \frac{6.5 \times 10^{-3}}{T_0} H_{sta} \right)^{5.257} \quad (4-9)$$

考虑到参考气压并不是海平面气压，而是格网点高度处的气压，气压高度改正公式变换为：

$$P_s^{sta} = P_s^{GP} \left(1 - 2.26 \times 10^{-5} \cdot (H_{sta} - H_{GP}) \right)^{5.257} \quad (4-10)$$

但是，上述公式是基于两个常量假设前提的：其一，温度递减率为 6.5×10^{-3} K/m；其二，海平面温度为288.15K。

而 HDTM 模型是一个全球对流层辅助参数模型，这两个常量假设使得气压改正存在明显的局限，进而损失 ZHD 在站点处的精度。考虑到气压改正的可靠性和精度，将式（4-8）重写如下：

$$P_s = P_s^{\text{MSL}} \exp \left(\ln \left(1 - \frac{\alpha}{T_0} h \right)^{\frac{Mg}{\alpha R}} \right) \quad (4-11)$$

$$P_s = P_s^{\text{MSL}} \exp \left(\frac{Mg}{\alpha R} \ln \left(1 - \frac{\alpha}{T_0} h \right) \right) \quad (4-12)$$

根据对数的泰勒级数展开，取前 3 项，公式（4-12）变换如下：

$$P_s = P_s^{\text{MSL}} \exp \left(\frac{Mg}{\alpha R} \sum_{i=1}^{n=3} \frac{\left(\frac{\alpha}{T_0} h \right)^i}{i} \right) \quad (4-13)$$

进而将 P_h 和 P_0 的数学关系简化为：

$$P_h = P_s^{\text{MSL}} \exp(b_1 h + b_2 h^2 + b_3 h^3) \quad (4-14)$$

其中， $b_{i=1,2,3}$ 分别是 h 的第一、二和三次系数。

引入格网点气压作为参考气压，公式可以变换为：

$$P_s^{\text{sta}} = P_s^{\text{GP}} \exp \left(\sum_{i=1}^3 \left(b_i (H_{\text{sta}} - H_{\text{GP}})^i \right) \right) \quad (4-15)$$

按照以上思路，即可以获得较式(4-9)更为严谨的气压高度改正。通过历史再分析资料对 $b_{i=1,2,3}$ 系数的建模和格网化，可以获得气压的精确改正；也可以利用实时预报产品在计算格网 ZHD 时采用最小二乘准则来估计各格网点气压改正系数，构建时变气压改正模型，进而伴随 ZHD 产品一同发布，可以有效提高 ZHD 模型的垂向改正精度。

2) Tm 的垂向归算模型

Tm 是水汽压和气温函数的数值积分。其中，水汽压在垂直方向上的变化可近似为指数函数，而气温常常被描述为线性衰减的。假设温度一般是线性变化，Tm 的高度修正常用如下公式：

$$T_m^{\text{sta}} = T_m^{\text{GP}} - \alpha (H_{\text{sta}} - H_{\text{GP}}) \quad (4-16)$$

T_m^{sta} (K) 和 H_{sta} (m) 分别是 GNSS 站点的 T_m 和高度, T_m^{GP} (K) 和 H_{GP} (m) 分别是 HDTM 格网点 T_m 和高度, α 是温度递减率, 取值为 6.5×10^{-3} K/m。

实际上, 气温在垂直方向上的变化也是非常复杂的, 还会发生逆温现象, 即气温随高度增加而增加, 这会导致 T_m 在垂直方向上也呈非线性变化趋势。由于格网点高度往往与目标站点存在高差, 若高差较大, 受 T_m 在垂向的非线性变化趋势影响, 基于常量衰减率建立的改正模型可能带来较大误差。HDTM 模型在本文应用时, 初步采用常量衰减率模型, 未来会改进到拟合参数模型。

3) ZHD 和 T_m 的平面插值

将 GNSS 站点处附近 4 个格网点高度的 ZHD 和 T_m 改正到站点高度后, 将改正后的 ZHD 和 T_m 进行水平方向双线性插值, 即可以获取站点处的 ZHD 和 T_m 。具体公式如下所示:

如图 4-2 所示, 目标点 P 坐标为 $[\lambda_p, \varphi_p]$, 周围四个格网点 GP1 ~ GP4, 其经纬度分别为 $[\lambda_1, \varphi_1]$, $[\lambda_2, \varphi_1]$, $[\lambda_2, \varphi_2]$ 和 $[\lambda_1, \varphi_2]$, 对应的参数分别是 $z_1 \sim z_4$ 。

首先, 内插 K_1 和 K_2 点参数值:

$$z_{K_1} = \frac{\lambda_1 - \lambda_p}{\lambda_1 - \lambda_2} z_2 + \frac{\lambda_2 - \lambda_p}{\lambda_2 - \lambda_1} z_1 \quad (4-17)$$

$$z_{K_2} = \frac{\lambda_1 - \lambda_p}{\lambda_1 - \lambda_2} z_3 + \frac{\lambda_2 - \lambda_p}{\lambda_2 - \lambda_1} z_4 \quad (4-18)$$

然后, 通过 K_1 和 K_2 点参数值内插 P 点参数值:

$$z_p = \frac{\varphi_1 - \varphi_p}{\varphi_1 - \varphi_2} z_{K_2} + \frac{\varphi_2 - \varphi_p}{\varphi_2 - \varphi_1} z_{K_1} \quad (4-19)$$

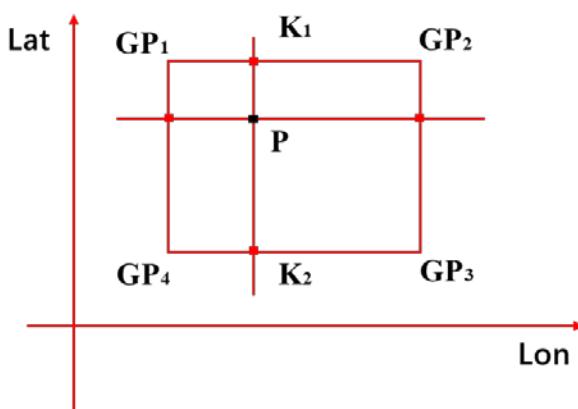


图 4-2 双线性平面插值示意图

4.4 HDTM 模型的 ZHD 和 Tm 精度评估

在本节中，基于实测气象数据、再分析资料和探空观测资料对 HDTM 模型提供的 ZHD 和 Tm 进行研究分析，主要包括有：① ZHD 和 Tm 在格网点高度的精度；② ZHD 和 Tm 经高度归算后地表处的精度质量；③ ZHD 和 Tm 的日变化特征和优势。

4.4.1 数据来源

ZHD 和 ZTD 数据

本节收集了中国及周边区域内 953 个 GNSS/MET 站点在 2023 年为期两个月的 ZTD 和 ZHD 数据，其中 6 月的数据代表暖季，10 月的数据代表冷季。ZHD 是根据 GNSS/MET 站点配置的气压计实测气压计算得到的，时间间隔为 30 分钟。ZTD 是基于测地型 GNSS 台站获取的实时观测数据利用后处理精密定位算法计算得到的，时间间隔为 30 分钟。GNSS/MET 站点的海拔从海平面到 5000 米，空间范围充分覆盖了中国区域不同海拔、地形和气候的地理区域。

探空观测数据和 ERA5 再分析资料

探空廓线数据是 Tm 参数的可靠参考，定期由释放探空气球采集，并通过无线电将数据传回地面接收站。观测变量包括气压、温度、位势高度、相对湿度、露点温度以及风速风向等，空间分辨率一般为 200 至 300 公里，时间分辨率一般为一天两次（世界时 00 和 12 时）或四次（世界时 00, 06, 12 和 18 时），针对特殊天气状况可进行加密观测([莫智翔, 2022](#))。为验证 HDTM Tm 的应用精度，本节从怀俄明州立大学探空数据服务器上收集了 2023 年中国区域内 64 个探空站的廓线数据并计算了其在廓线底层高度的 Tm 结果作为独立参考。ERA5 作为再分析资料，可以提供全球的格网气象产品，但是气象参数精度要显著优于 HDTM 建模所采用的 NWP 产品([Zhang et al., 2019](#))。因此，利用 ERA5 进行廓线积分的 ZHD 和 Tm 可以作为可靠的外部参考。

对流层经验模型 GPT3 和 VMF3

全球气压温度模型（GPT）系列模型是由维也纳工业大学（Technische Universität Wien, TUW）大地测量系建立，目前发布有 4 代：GPT([Böhm et al., 2007](#))、GPT2([Lagler et al., 2013](#))、GPT2w([Böhm et al., 2015](#))、GPT3([Landskron and Böhm, 2018](#))。GPT 模型使用 ECMWF 提供的水平分辨率为 $15^\circ \times 15^\circ$ 的多层格网 ERA-Interim 月均值数据集进行拟合，基于 9 阶 9 次的球谐函数，建立了适用于全球范围的 $15^\circ \times 15^\circ$ 分辨率的对流层延迟计算模型。[Landskron 等\(2018\)](#)在 VMF1 (Vienna Mapping Function 1) 和 GPT2 的基础上进一步利用 ECMWF 的 ERA-

Interim 再分析资料建立了时间分辨率为 6 小时，空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的映射函数逐历元产品 VMF3 (Vienna Mapping Function 3) 以及顾及映射函数系数年和半年变化的映射函数经验模型 GPT3。其中，GPT3 模型主要考虑了大气参量的年周期和半年周期项，建模公式如下所示：

$$\begin{aligned} \xi = A_0 + A_1 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365.25} \cdot DOY\right) + B_1 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365.25} \cdot DOY\right) + \\ A_2 \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{365.25} \cdot DOY\right) + B_2 \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{365.25} \cdot DOY\right) \end{aligned} \quad (4-20)$$

式中，DOY 为年积日， A_0 是年均值系数， A_1 、 B_1 为年周期系数， A_2 、 B_2 为半年周期系数。在使用时，仅需输入简化儒略日、测站经纬度和大地高，就可以获得测站位置的气象参数，然后结合 Saastamoinen 模型和 Bevis 公式即可求得测站 ZHD 和 Tm。GPT3 模型是 GNSS 水汽反演辅助参数在无气象参数下的主要获取方式，本章将计算其 ZHD 和 Tm 来进行对比分析。

维也纳工业大学发布基于 VMF3 和 ECMWF 数值天气模型建立的格网产品，时间分辨率为 6 h (世界时 0, 6, 12, 18 时)，空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 和 $5^\circ \times 5^\circ$ ，包括 ZHD、ZWD 和映射函数系数。按照发布时延可以分为准实时产品 (VMF3-OP，时延 1 天左右) 以及实时产品 (VMF3-FC，实时获取需要授权)，存档服务器为 <https://vmf.geo.tuwien.ac.at/>。在实际使用中需要使用线性插值从产品时刻内插到具体时刻，使用双线性插值从产品格网点内插到特定水平位置，使用相应的高度改正公式将天顶延迟量归算至特定高度。

HDTM 模型数据

基于 2023-2024 年 HDTM 模型的预报产品，根据不同参考数据 (ERA5、探空数据和实测气压等) 的时间范围，利用实时网格产品分别计算同期 HDTM 在格网点、探空站点和 GNSS/MET 站点的参数，评估分析 HDTM 模型在中国区域 GNSS 和探空站点处 ZHD 和 Tm 的应用精度和质量。

本研究用到的 GNSS/MET 站点、HDTM 格网和探空站的分布如图 4-3 所示，其中，953 个 GNSS/MET 站点用红色圆点表示，中国区域的 HDTM 格网点用蓝色 ‘+’ 号表示，64 个探空站点用黑色正三角形表示。

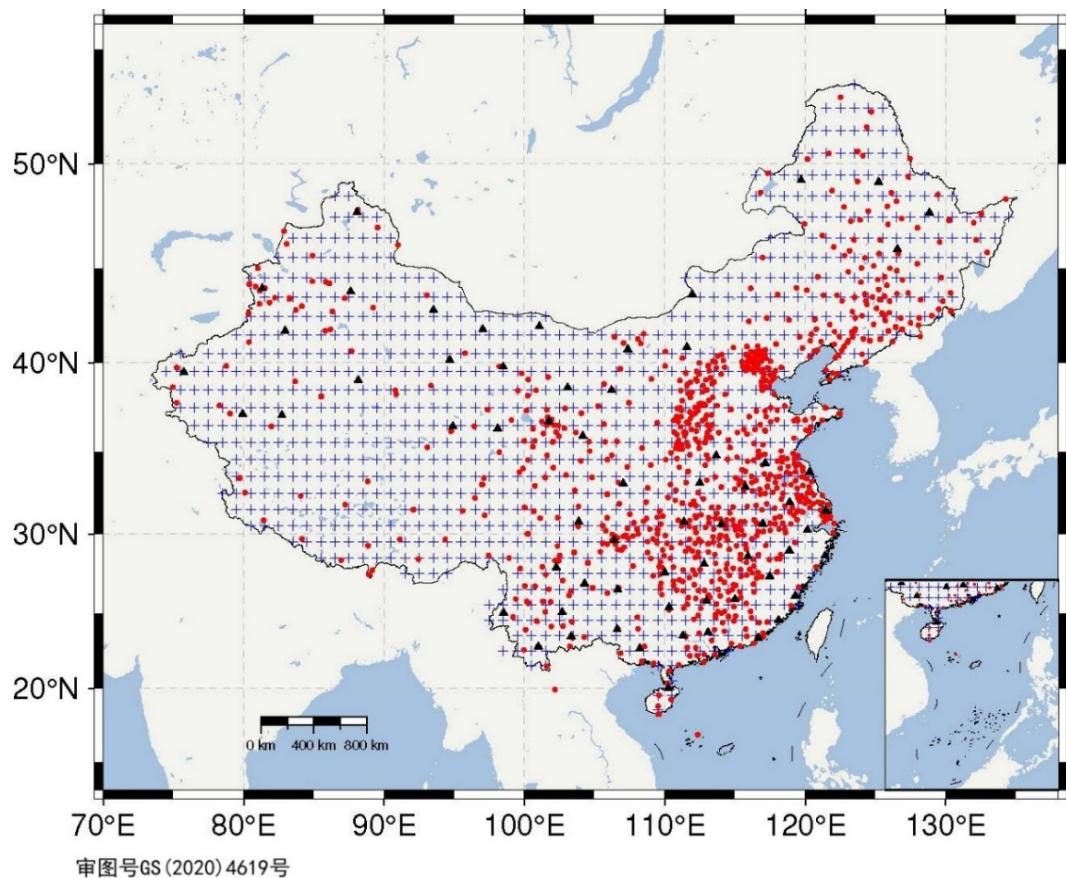


图 4-3 GNSS/MET 测站、HDTM 格网点和探空站点的分布

注：HDTM 格网用蓝色 ‘+’ 表示，GNSS/MET 站点用红色圆点表示，探空站点用黑色三角形表示。图件采用审图号 GS (2020) 4619 号标准地图绘制

4.4.2 ZHD 的精度和特征分析

为分析 HDTM 模型的参数建模精度，利用 ERA5 数据分别对基于 NCEP-GFS 和 ECMWF-IFS 构建的 HDTM 模型产品进行评估分析，数据覆盖 2024 年 3 月 16 日到 2024 年 4 月 30 日，共计 45 天。考虑到 HDTM 模型目前采用 $1^\circ \times 1^\circ$ 的格网模型，本节利用 ERA5 37 层大气廓线分别在中国区域 $1^\circ \times 1^\circ$ 公共格网点处积分得到 ZHD，与 HDTM 模型的 ZHD 进行比较，以分析 HDTM 模型 ZHD 参数在中国区域的建模精度。

表 4-2 展示了 HDTM (NCEP-GFS)、HDTM (ECMWF-IFS) 和 TUW VMF3-FC 的 ZHD 格网精度。在本节中，TUV VMF3-FC 使用的是其 $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率的产品，并对间隔 6 小时的 ZHD 线性插值以获得 1 小时分辨率的 ZHD 结果，记为插值后的 TUV (VMF-3 FC)。从表中可以看出，HDTM (NCEP-GFS) 和 HDTM (ECMWF-IFS) 的 ZHD 平均均方根误差分别为 2.1 mm 和 2.7 mm，与 TUV 的 VMF3-FC 格网产品的精度基本一致，说明基于预报资料计算的 ZHD 精

度可靠且能在计算站点 ZHD 参数时提供可靠的参考 ZHD。HDTM 模型存在负偏差，ZHD 值要略低于 ERA5，这与积分层数和预报的大气参数准确性有关。从误差极大值来看，HDTM 模型在最大误差上要表现更优，VMF-3 FC 产品最大标准差可达到 9.4 mm。在标准差上，HDTM 模型相比于 VMF-3 FC 产品要更小，误差减小约 24%，结果表明直接获得 ZHD 要比插值得到的 ZHD 更为精确。因此，HDTM 模型的高时间分辨率（1 小时）可以减小时间域的插值误差的影响，也能更好地反映 ZHD 的短时变化。

综上，与 ERA5 比较的统计结果表明，HDTM 可以为中国区域用户提供均方根误差优于 3 mm 的实时 ZHD 产品，其较高时间分辨率在时间域插值上更具优势，且采用两种不同 NWP 产品，能为 ZHD 的获取提供冗余性保障。

表 4-2 NCEP-GFS、ECMWF-IFS 和 TUW 的 ZHD 精度

项目	偏差	标准差	均方根误差
	均值[最小值, 最大值]		
HDTM (NCEP-GFS)	-1.4 [-3.9,1.1]	1.5 [1.0,2.8]	2.1 [1.2,4.2]
HDTM (ECMWF-IFS)	-2.2 [-4.1,0.5]	1.6 [0.9,2.3]	2.7 [1.5,4.5]
插值后的 TUW (VMF-3 FC)	-0.7 [-2.9,1.9]	2.1 [0.9,9.4]	2.3 [1.0,9.4]

为进一步研究 HDTM 模型精度受地形和气候的影响，图 4-4 展示了 HDTM (NCEP-GFS) 和 HDTM (ECMWF-IFS) 模型的 ZHD 偏差和标准差在中国区域的地理分布。

从图中可以看出，HDTM (NCEP-GFS) 和 HDTM (ECMWF-IFS) 两种模型的 ZHD，在总体上与 ERA5 结果体现出较好的一致性，且精度存在一定的地理差异。在偏差项上，HDTM (NCEP-GFS) 在青藏高原及其周边地区表现处更大的负偏差，这与地处高原高海拔地区，气压偏低，结果准确性偏低有关；HDTM (ECMWF-IFS) 也表现出负偏差，且从东南到西北方向逐渐负偏差逐渐递减。两者的偏差表现差异，源自两者由不同 NWP 模型驱动，同化数据和等压层数不一致，导致在结果上存在一定的差异。而在标准差上，两者表现基本一致，在中国南方地区，尤以四川盆地、华南地区标准差偏大。但总体来看，HDTM (NCEP-GFS) 表现略好于 HDTM (ECMWF-IFS)，两者都能够基本满足水汽反演对 ZHD 参数的精度需要。同时，考虑到 ECMWF 在最近提出要将更高分辨率的 IFS 和 AIFS 预报产品免费公开和发布，HDTM (ECMWF-IFS) 的产品精度也会随之不断改善和提高。

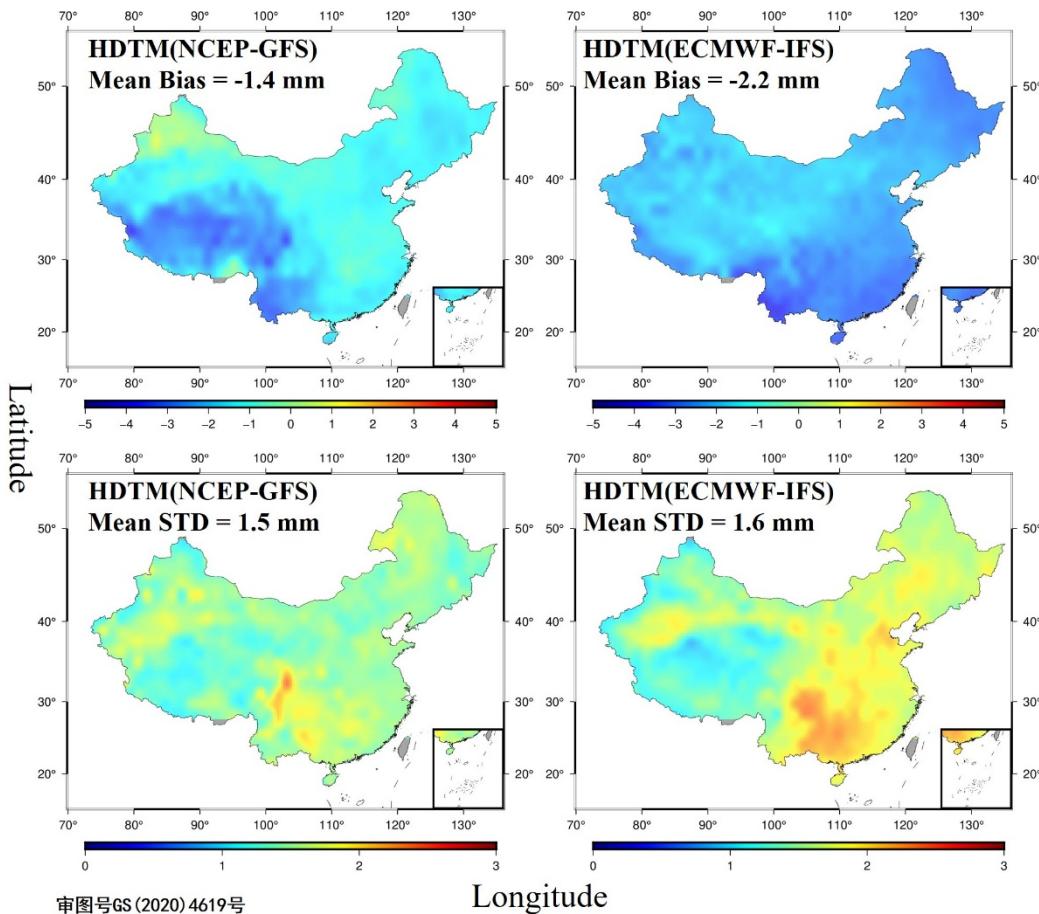


图 4-4 HDTM 模型 ZHD 相对于 ERA5 的偏差和标准差分布

注：以 ERA5 在格网点廓线积分的 ZHD 为参考，单位为 mm

为验证 HDTM 模型在提供站点处 ZHD 的实际表现，以实测气压转换的 ZHD 为参考，按照 ZHD 高度归算和平面插值方法计算 HDTM 模型在 GNSS 站点处的静力学延迟。由于 ECMWF-IFS 的免费公开数据在 GNSS/MET 数据期间不可用，且前述与 ERA5 的比较结果已经确认 HDTM（NCEP-GFS）和 HDTM（ECMWF-IFS）的精度基本相当，后文仅采用 HDTM(NCEP-GFS)来说明 HDTM 模型的表现。

图 4-5 展示了 HDTM 模型 ZHD 产品在 953 个 GNSS/MET 站点的精度表现。与实测气压相比，站点处 HDTM-ZHD 的平均均方根误差和平均偏差分别为 3.2 mm 和 -1.5 mm。HDTM-ZHD 在东南平原的表现最优，在存在大高差的青藏高原边缘表现出负偏差，而在东北地区表现出正偏差。在标准差上，HDTM 模型在全国范围内表现出较好的一致性，平均标准差为 2.1 mm，但在青藏高原边缘的标准差更大。相较于与 ERA5 的比较结果，HDTM 模型在站点处的 ZHD 要略差于参数建模精度，但是获取站点参数的平面和高度插值过程没有明显损失参数精度，

有效地保障参数的应用质量。

综上, HDTM 模型在全国范围内具有较好的精度质量, 有利于为大区域的 GNSS 水汽反演业务中提供精度一致的 ZHD 产品, 进而保证 PWV 反演结果精度一致性。在青藏地区边缘的结果表明, 在大高差复杂地形区域, 高度归算会给 HDTM 模型引入误差, 但是站点处 HDTM-ZHD 误差控制在 10 mm 以内。

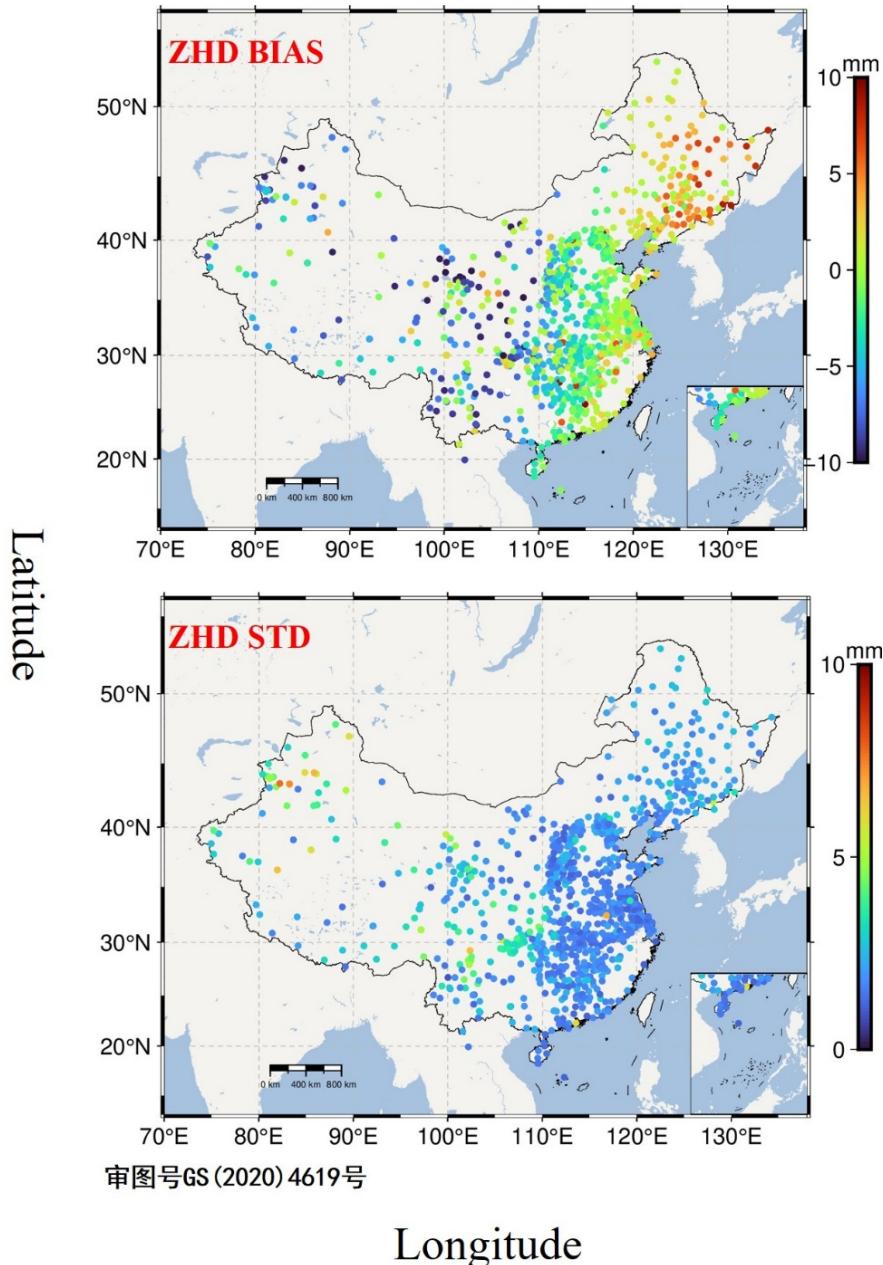


图 4-5 HDTM 模型的 ZHD 在 GNSS/MET 站点处的精度表现

注: 以 GNSS/MET 实测气压转换的 ZHD 为参考, 单位为 mm

为具体说明 HDTM 模型 ZHD 在周日变化的表现, 本节从 953 个 GNSS/MET 中任意选择 3 个站点, 以站点实测气压转换的 ZHD 为参考, 图 4-6 展示了 HDTM

(NCEP-GFS)、TUW VMF-3 (FC) 和 GPT3 在 JSYZ、BGNW 和 BFTO 的 ZHD 序列。

在连续两周 (DOY158-176) 的 ZHD 时间序列中, HDTM 模型提供的 ZHD (红色) 与实测气压的 ZHD 结果 (灰色) 基本吻合, 可以清晰刻画 ZHD 在两周内的真实变化。受限于稀疏的参数样本数量(时间间隔为 6 小时), VMF3-FC ZHD 结果与实测结果存在一定的偏差, 其均方根误差要较 HDTM 模型明显高出约 50% 以上。GPT3 的结果 (橙黄色) 演示了经验模型在刻画 ZHD 真实变化的表现, 由于在建模中没有考虑周日变化因素, 其结果只能大致地反映 ZHD 的总体趋势变化, 均方根误差在 6-10 mm。以上对比结果充分说明和验证了高时间分辨率的 HDTM 模型在刻画 ZHD 的短时变化具有显著的优势, 在精度和反映 ZHD 细节变化上较 TUW 和 GPT3 模型有明显改善。

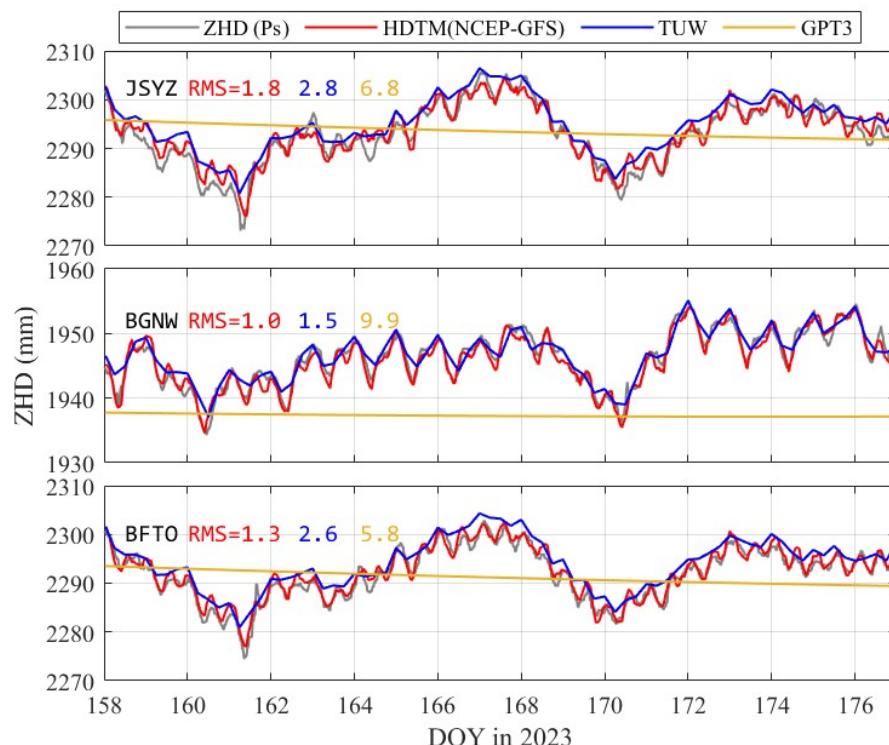


图 4-6 HDTM(NCEP-GFS)、TUW VMF-3 和 GPT3 模型在 JSYZ、BGNW 和 BFTO 站点处的 ZHD 表现

注: 以站点处实测气压转换的 ZHD 为参考, 单位为 mm

为进一步说明 HDTM 模型时间分辨的优势, 本节计算了 HDTM 模型和 TUW 模型在上述三个站点的 ZHD 偏差序列, 并统计了不同日内小时 (HOD, Hour of Day) 的均方根误差。考虑到 GPT3 模型未能对 ZHD 的日周期项进行建模, 因此不讨论 GPT3 模型 ZHD 的周日变化。图 4-7 展示了 HDTM 模型和 TUW 模型 ZHD 精度的周日变化。从图中可以看出, HDTM 模型的精度序列表现较为平稳,

平均偏差约在 0.5 mm 以内，标准差在 1.6 mm 内。而 TUW 产品每天只能提供 4 次 ZHD 结果，中间历元需要进行线性插值才能获取，这导致 ZHD 精度出现明显周期变化，在两个数据历元中间时刻出现较大的均方根误差。因此，HDTM 提供更高时间分辨率的 ZHD 结果，可以有效减缓插值过程带来的精度损失，更为精确刻画 ZHD 的短时变化，有利于保证其在扰动天气条件下的产品可靠性。

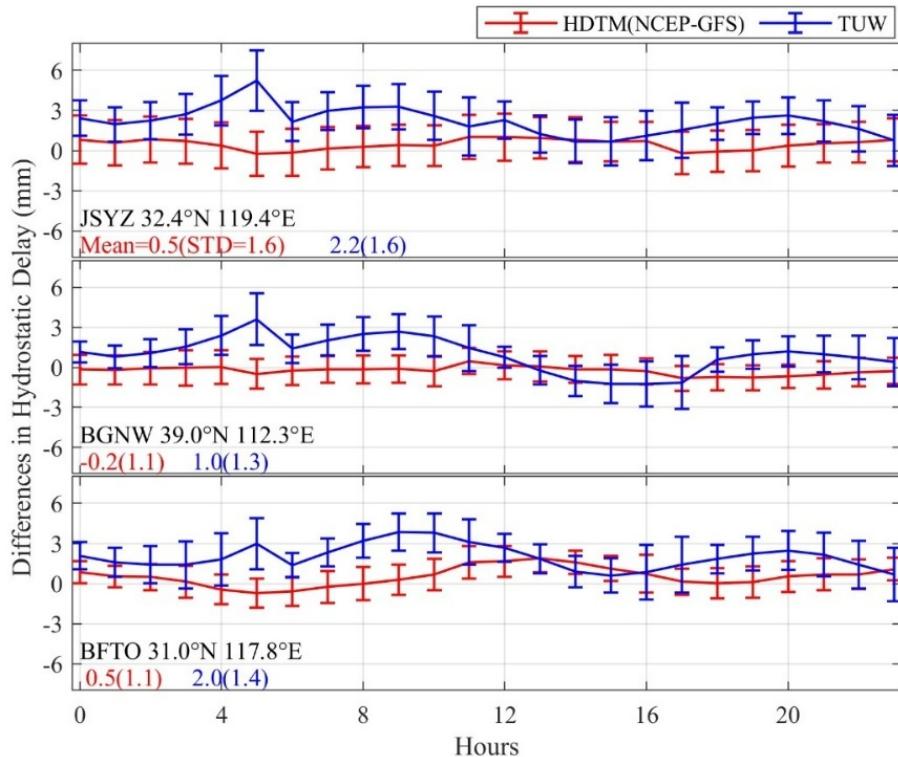


图 4-7 HDTM(NCEP-GFS)和 TUW VMF-3 ZHD 精度的周日变化差异

注：以站点处实测气压转换的 ZHD 为参考，单位为 mm

4.4.3 Tm 的精度和特征分析

为说明 HDTM 模型 Tm 在格网点的建模精度，以 ERA5 的积分 Tm 结果为参考，本节计算了 HDTM (NCEP-GFS) 和 HDTM (ECMWF-IFS) 模型的 Tm 的统计结果，如表 4-3 所示。HDTM 模型可以提供与 ERA5 基本相当的 Tm 结果，其平均均方根误差优于 1.2 K，最大均方根误差在 2.8 K 左右，这充分说明 HDTM 模型 Tm 具有可靠的精度质量。HDTM 两个模型 Tm 基本一致，HDTM (NCEP-GFS) 表现负偏差，HDTM (ECMWF-IFS) 表现为正偏差。从总体来看，HDTM (NCEP-GFS) 使用等压层数更多的 GFS 产品，因此积分结果更为精确。

表 4-3 HDTM 模型 Tm 在格网点的精度

项目	偏差 (K)	标准差 (K)	均方根误差 (K)
	均值[最小值, 最大值]		
HDTM (NCEP-GFS)	-0.1 [-1.3, 1.1]	1.1 [0.5,2.1]	1.1 [0.5,2.1]
HDTM (ECMWF-IFS)	0.7 [-0.2, 2.4]	1.0 [0.5,1.6]	1.2 [0.6,2.8]

图 4-8 展示了 HDTM (NCEP-GFS) 和 HDTM (ECMWF-IFS) Tm 参数在中国区域的偏差和标准差分布。从图中可以看出, HDTM(NCEP-GFS) Tm 参数总体为负偏差, 在东北黑龙江地区和青藏高原地区表现出正偏差, HDTM (ECMWF-IFS) 总体为正偏差, 并且在青藏高原及其周边地区得以加强。以上结果说明青藏地区大气稀薄, 温度变化剧烈且缺少气象观测, 导致 GFS 和 IFS 预报场参数存在一定的偏差。但是, 总体来说, HDTM 模型在中国区域表现出可靠的精度质量, 且表现出较好的精度一致性。

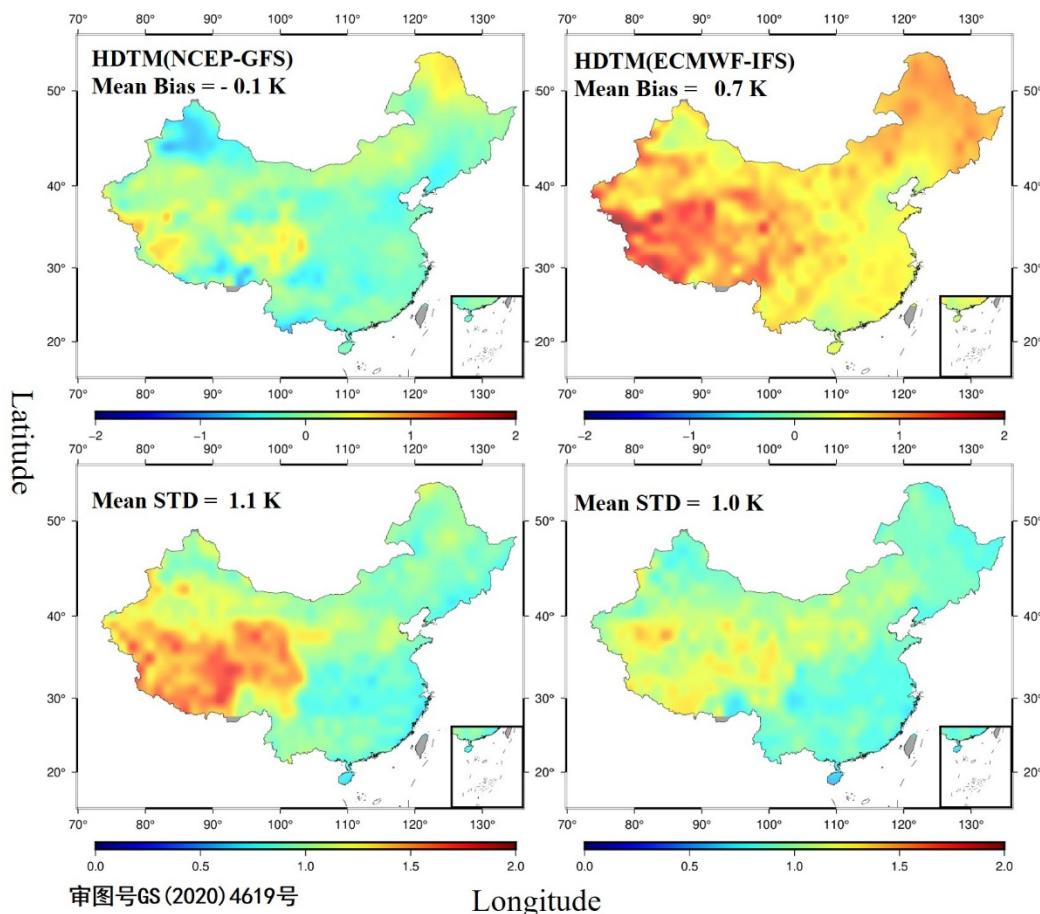


图 4-8 HDTM 模型 Tm 参数的偏差和标准差分布

注: 以 ERA5 在格网点廓线积分的 Tm 结果为参考, 单位为 K

为进一步说明 HDTM T_m 模型在站点处的应用精度，以探空廓线数值积分计算的 T_m 为参考，表 4-4 展示了 HDTM 和 Bevis 模型 T_m 参数在 64 个探空站点的精度表现。其中，Bevis 模型的 T_m 是根据探空廓线数据在最底层的实测温度计算得到的。从表中可以看出，HDTM 模型可以提供均方根误差为 1.5 K 的 T_m，相较于 Bevis 模型在均方根误差上改善了 40%，同时在最差指标上也明显更优。尽管 Bevis 模型能够提供平均偏差约 0.4 K 的 T_m，但是其标准差明显要差于 HDTM 模型。这是源于 HDTM 模型的 T_m 是利用大气预报场精确计算得到的，而 Bevis 依赖于实测气温和经验的 T_m-T_s 线性关系，拟合系数会给 T_m 引入一定的模型误差。以上结果充分说明了 HDTM 模型在站点处具有较高的应用精度，能够满足 PWV 反演对 T_m 参数的精度要求。

表 4-4 HDTM 和 Bevis 模型 T_m 在 64 个探空站的精度

项目	偏差	标准差	均方根误差
	均值[最小值, 最大值]	单位为 K	
HDTM (NCEP-GFS)	-0.2 [-1.8, 1.8]	1.4 [0.8,2.2]	1.5 [0.8,2.5]
Bevis	0.4 [-2.9, 2.4]	2.3 [1.5,2.9]	2.5 [2.0,3.0]

图 4-9 展示了 HDTM 模型计算的 T_m 在 64 个探空站点的精度质量。从图中可以看出，HDTM 模型提供的 T_m 在中国区域具有较好的精度水平，整体要表现为负偏差，东南部要明显更优，在青藏高原边缘表现略差。其标准差在各站点基本一致，展现出较好的时空均匀性。但在青藏地区和新疆准噶尔盆地周围表现略差。这与数值天气预报的参数质量和区域的温差剧烈变化有关。

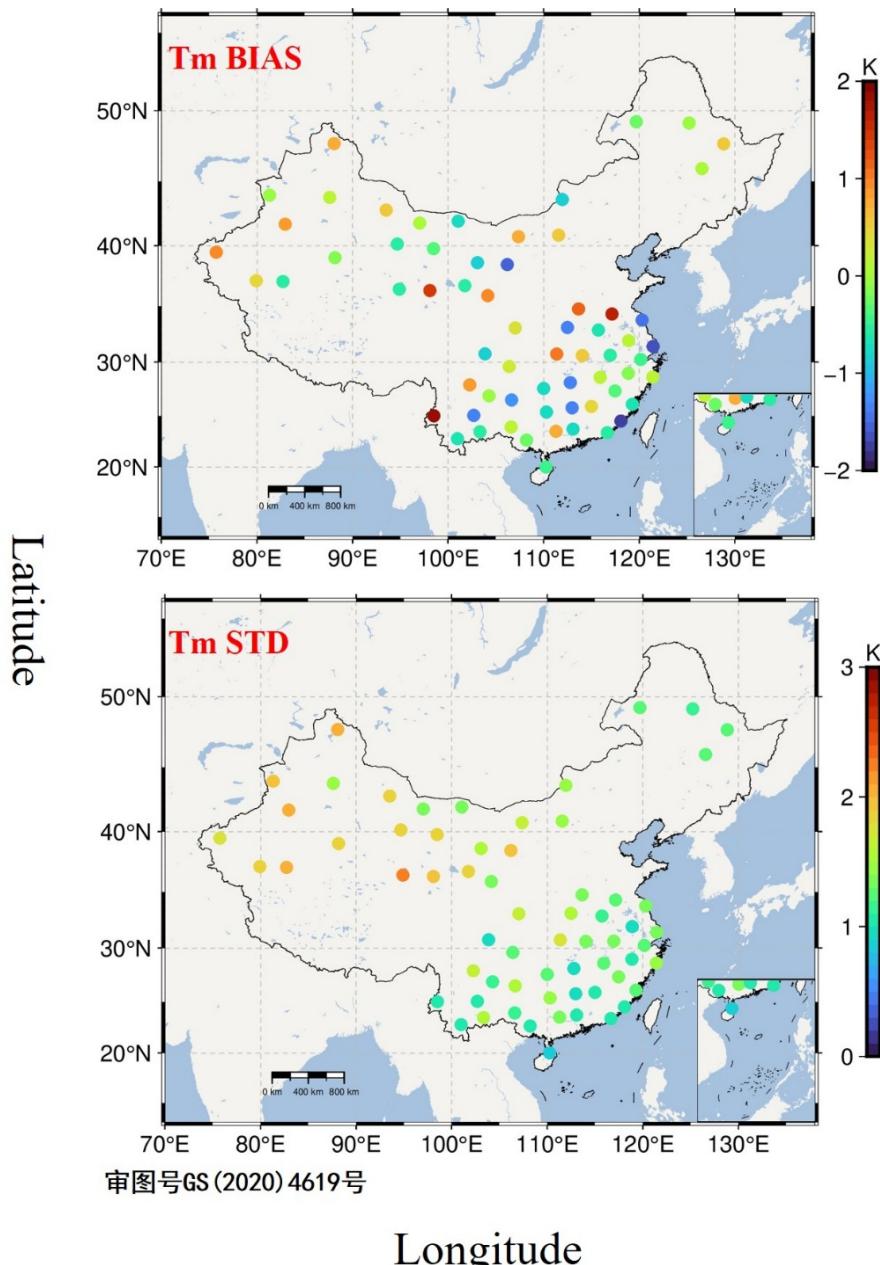


图 4-9 HDTM Tm 在 64 个探空站点的表现

注：以探空站廓线积分的 Tm 结果为参考，单位为 K

为具体说明 HDTM 模型在提供站点 Tm 的长期可靠性，尤其是刻画 Tm 的短时变化的质量，以 ERA5 Tm 为参考，本节计算了 GNSS 站点 NMWL 和 JLLJ 两个站点的 HDTM Tm，同时增加 GPT3 和 Bevis 的 Tm 作为对比。图 4-10 展示了 HDTM（红色）、GPT3（橙黄色）和 Bevis（紫色）在 NMEL 和 JLLJ 站的 Tm 序列。

从图中可以看出，NMEL 和 JLLJ Tm 序列在 DOY 159-176 期间先逐渐上升，在 DOY 169-170 后开始下降，同时具有较为明显的日周期变化。在这两个站的

T_m 序列中,无论是长期趋势变化还是短时细节,HDTM模型的 T_m 与ERA5 T_m 基本符合,均方根误差达到0.8 K。即使在 T_m 发生快速下降的DOY 170-171期间,HDTM都能较好的拟合 T_m 的变化。而Bevis模型则吸收了地面温度的日周期信号,产生较为明显的周期性振荡信号,在均方根误差上要略差一些。GPT3模型由于未能考虑 T_m 的日周期信号,只能反映其趋势变化,难以刻画天气动态变化引起的 T_m 剧烈短时变化。由此可见,HDTM模型兼具高时空分辨率和高精度的优点,能够精确刻画 T_m 在站点处的短时变化,无需实测温度的参数依赖,且在中国区域内具有较好的精度一致性,可以为实时水汽反演提供稳定可靠和精度统一的 T_m 。

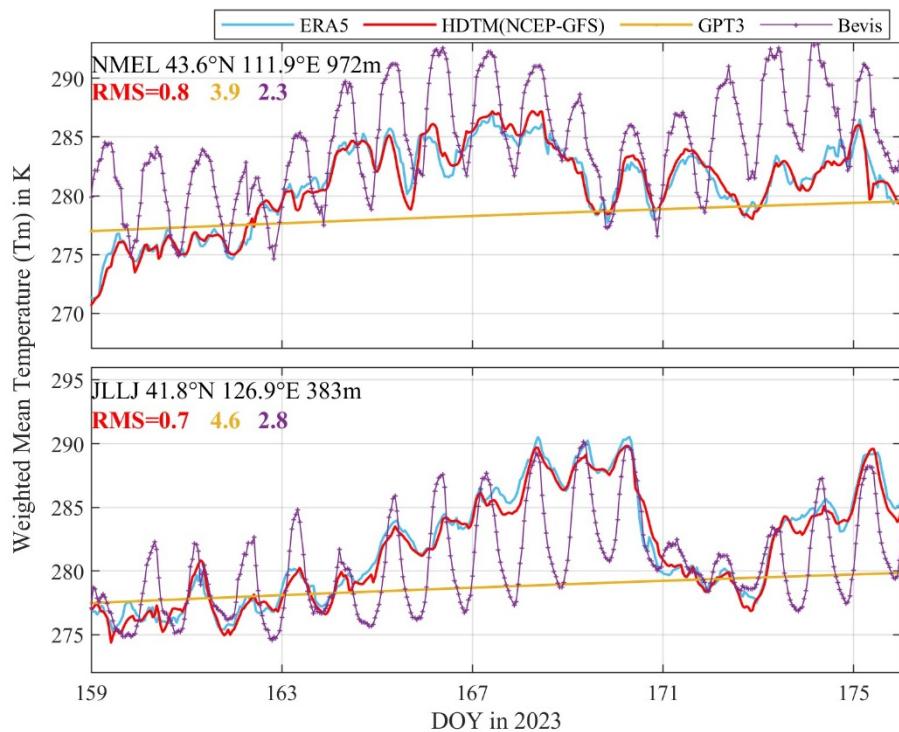


图 4-10 HDTM、GPT3 和 Bevis 三种 T_m 在日变化尺度的表现

注:以ERA5廓线积分的 T_m 结果为参考,单位为K

4.4.4 ZHD 和 T_m 对 PWV 的反演误差分析

HDTM模型的建立主要是为无实测气象参数的GNSS台站提供高时效和高精度的ZHD和 T_m 参数,进而便利实时水汽反演在这些台站的实现。由于当前水汽监测网络和业务依赖于基于实测气象参数的传统水汽反演方法,基于HDTM模型的水汽反演仍需要与现有水汽反演方法相互兼容。

因此,为具体讨论HDTM模型ZHD和 T_m 参数的PWV反演误差以及反演的PWV与传统方法结果的一致性,利用GNSS/MET水汽产品为参考,本节计

算基于 HDTM 模型 ZHD 和 Tm 参数的 PWV 反演误差，研究分析了基于上述参数的 PWV 反演质量。

具体方法如下：水汽反演过程用的 ZTD 统一采用 GNSS/MET 水汽产品中的 ZTD 结果。该 ZTD 结果是根据后处理 GNSS 精度单点定位计算得到的。计算参考水汽产品用到的 ZHD 和 Tm 是根据实测温度和压力得到的。而计算 HDTM-PWV 用到的 ZHD 和 Tm 是利用 HDTM 模型计算的站点参数得到的。实验数据范围涵盖了大气中水汽水平较高且变化较为活跃的夏季，这也是实时水汽监测最具挑战性的时间段。水汽监测业务网络的 953 个 GNSS/MET 测站都参与验证。

具体比较流程的示意图见图 4-11。

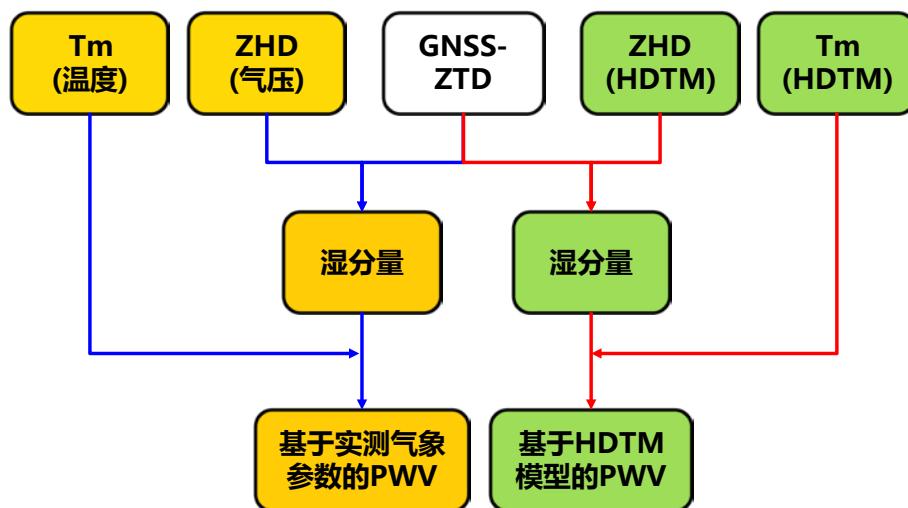


图 4-11 HDTM 参数对 PWV 反演误差影响的比较流程

基于以上思路，本节可以有效地将 HDTM 模型在 ZHD 和 Tm 参数上的误差转换为 PWV 反演误差。以基于实测气象参数计算的 PWV 产品为参考，分析 HDTM 模型的 ZHD 和 Tm 参数在 GNSS 水汽反演过程中的应用精度。表 4-5 展示了基于 HDTM 模型反演的 PWV 在 953 个 GNSS/MET 站点的相对误差。基于 HDTM 模型反演 GNSS PWV 的平均偏差、平均标准差和平均均方根误差分别为 -0.5 mm 、 0.6 mm 和 0.9 mm 。在最差的情况下，HDTM 模型参数引起的平均 PWV 偏差为 0.9 mm ，均方根误差在 2.1 mm 左右。同利用实测气象参数反演的 PWV 结果相比，ZHD 和 Tm 参数仅给 PWV 反演引入约小于 1 mm 的差异，结果能够与传统水汽反演方法的结果基本相符。以上实验结果一方面证明了 HDTM 模型提供 ZHD 和 Tm 在反演 PWV 过程中准确可靠，在中国区域与实测气象参数的质量基本相当；另一方面，也说明基于 HDTM 模型计算的 PWV 能够与现有水汽监测网络的水汽产品有较高的一致性，能够与现有水汽监测业务模式相互兼容。

表4-5 ZHD和Tm参数引起的PWV差异统计结果

项目	最小值 (mm)	均值 (mm)	最大值 (mm)
偏差	-1.9	-0.5	0.9
标准差	0.2	0.6	1.8
均方根误差	0.3	0.9	2.1

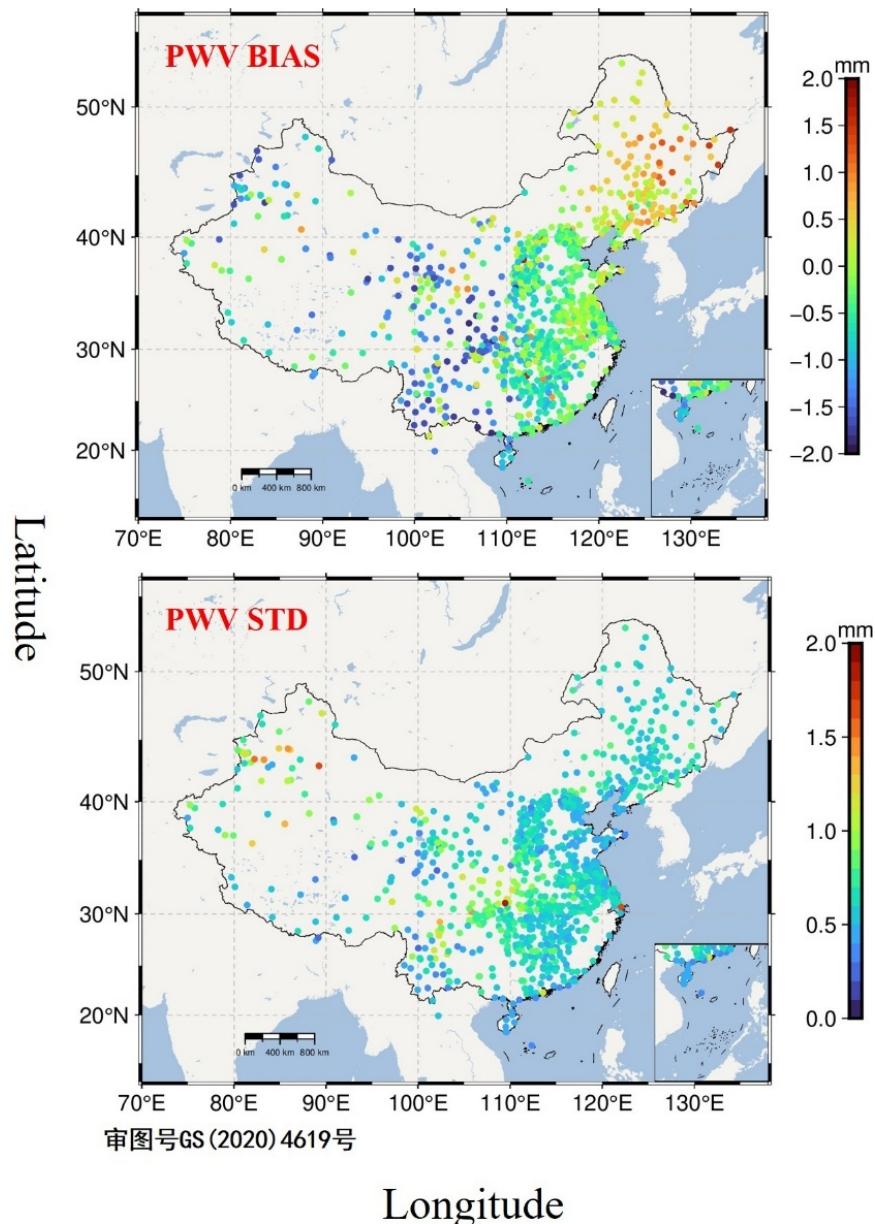


图4-12 PWV误差在953个GNSS/MET站的表现

注：以GNSS/MET水汽产品为参考，单位为mm

为考虑来自 HDTM 模型参数的 PWV 误差的空间分布, 图 4-12 展示了 PWV 反演误差中国区域的空间分布。从图中可知, PWV 误差在中国东南地区较好, 基本上在 ± 0.5 mm 以内, 这与前述 ZHD 和 Tm 在东南地区表现更优的结论相吻合。在东北地区, PWV 反演误差量级在 1-2 mm。由于存在大高差复杂地形, 青藏高原及其周边地区的 HDTM 模型参数应用精度略差, 因此在该区域 PWV 反演误差略大。在标准差上, PWV 差异结果在全国区域具有较好的一致性, 平均在 0.6 mm 左右, 说明 HDTM 模型提供的 ZHD 和 Tm 参数在中国区域具有较好的精度一致性, 对于不同的气候和地形区域均有较好的适用性。

通过上述将 ZHD 和 Tm 误差转化为 PWV 误差, 研究结果都充分验证并说明了基于 HDTM 模型参数在中国区域的应用优势: 精度可靠且兼具时间和空间分辨率。HDTM 模型能够在引入的 PWV 反演误差仅小于 1mm 的前提下摆脱实测气象参数的依赖, 并且能够服务于实时水汽反演, 改善现有水汽监测技术的兼容性和独立性, 有效支持 GNSS 实时水汽反演服务于天气预报业务。

4.5 一种定制化的 HDTM 模型实时服务模式

为更好地发挥 HDTM 模型在实时水汽反演中的应用优势, 结合实际需求和应用场景, 本节提出并初步建立了一种定制化的 HDTM 模型服务模式, 能够在单站反演和组网监测等多种场景下获取高质量对流层延迟量和水汽辅助参数, 并辅助实现高时效水汽监测。当前, HDTM 模型服务初步可分为标准服务和定制化服务两种方式, 具体服务模式如图 4-13 所示。

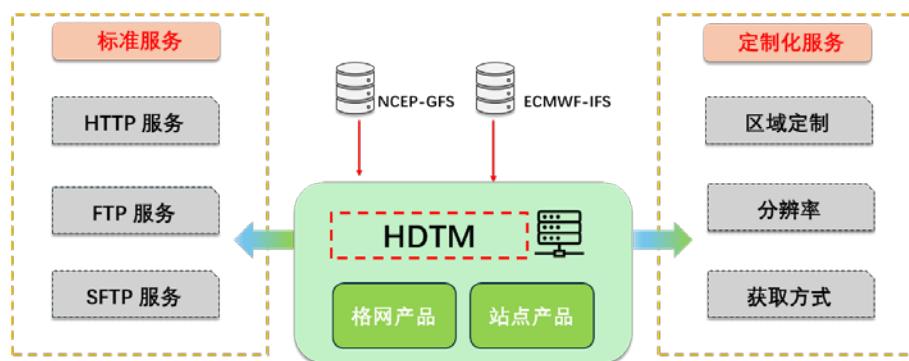


图 4-13 HDTM 模型服务的工作框架

4.5.1 工作框架

HDTM 模型服务被部署于公网服务器, 每天与 NWP 模式同步运行四次。在从 NCEP-GFS 和 ECMWF-IFS 服务器获得最新一次的预报产品后, 一般取第 5-11 小时的预报产品, 分别生成未来 6 小时的 HDTM 格网产品和站点产品。为方

便在 GNSS 实时水汽反演中应用 HDTM 模型，服务端定期生成站点和格网两种类型的 ASCII 文件并发布，以方便外部用户利用不同方式和网络协议进行获取。本节基于公网服务器建立如下标准数据获取服务：HTTP 服务，FTP 服务和 SFTP 服务。图 4-14 展示了利用 HTTP 网页访问 HDTM 模型服务和服务器数据目录结构。其中，格网产品的格式定义如图 4-15 所示，站点产品格式如图 4-16 所示。

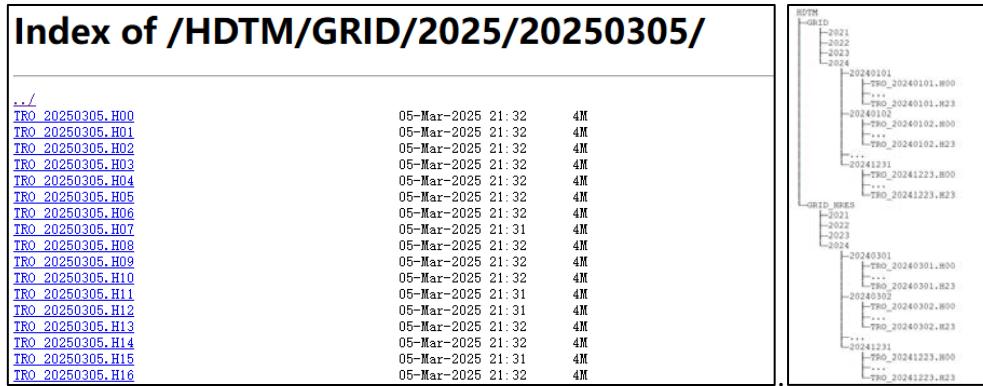


图 4-14 HDTM 模型网页访问服务和目录结构

TRO_yyyyymmdd.Hhh yyyy : 4 位的年 mm : 2 位的月 dd : 2 位的日 hh : 2 位的小时					文件命名
! LAT LON H_ELL Tm ZHD					内容格式
89.5	0.5	15.05	269.57	2.2833	
89.5	1.5	15.04	269.56	2.2834	
89.5	2.5	15.04	269.55	2.2834	
89.5	3.5	15.04	269.54	2.2834	
89.5	4.5	15.03	269.53	2.2834	
89.5	5.5	15.03	269.52	2.2834	
89.5	6.5	15.02	269.51	2.2834	
...	
-89.5	357.5	2750.79	232.79	1.5866	
-89.5	358.5	2752.65	232.79	1.5862	
-89.5	359.5	2759.33	232.79	1.5846	
(64801 行)					
~4 MB					文件大小

图 4-15 HDTM 格网文件格式

STAN.T				文件命名
STDN: 站点首英文缩写				
! UTC_Time	ZHD	ZWD	Tm	内容格式
2024092911	2.2916	0.1919	290.8	
2024092912	2.2926	0.1896	290.5	
2024092913	2.2939	0.1925	290.2	
2024092914	2.2948	0.2010	289.9	
2024092915	2.2960	0.2141	289.5	
2024092916	2.2960	0.2084	289.1	
2024092917	2.2940	0.2138	289.0	
2024092918	2.2927	0.2053	288.9	
2024092919	2.2931	0.2050	288.9	
2024092920	2.2926	0.2087	288.7	
2024092921	2.2931	0.2113	288.5	
2024092922	2.2954	0.2291	287.9	
即时更新				文件大小

图 4-16 HDTM 站点产品的文件格式

在提供数据获取的标准化服务外, HDTM 服务根据用户提交的时间分辨率、区域位置和大小、获取方式等需求提供 HDTM 模型定制化服务来提供高时效和高可靠并重的 HDTM 参数, 以满足 GNSS 水汽反演和对流层延迟实时改正等多场景的应用需求。其中, 空间分辨率有 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 、 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 、 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 和 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 等分辨率选择。

考虑到部分 GNSS 用户并不需要全球的 HDTM 格网, 为减轻数据的传输压力, 为 GNSS 水汽监测用户提供选定区域产品或者站点位置数据产品。在获取方式上, HDTM 模型考虑到用户在 GNSS 水汽反演的不同应用场景, 根据用户提供的订单需求, 提供基于实时流播发的 HDTM 服务, 预报数据邮件报送和标准化网络协议获取等方式。此外, 为改善 HDTM 模型在短期预报的精准性, HDTM 服务还在定期抓取中国和瑞士实时地基气象观测数据, 在未来综合利用地基气象观测数据、地表气象廓线数据和两套数值天气预报资料, 基于人工智能大模型对 HDTM 模型进行实时修正, 提高 HDTM 模型的鲁棒性和可靠性, 以服务于更高精度和时效性要求的 GNSS 应用。

4.5.2 编码规则

实现高效和安全地将 HDTM 辅助参数数据从服务端到用户端实时传输是实施高时效 GNSS 水汽反演和对流层延迟修正服务的关键过程。针对实时模式的应用, 为实现 HDTM 模型实时产品的高效率传输, 考虑到 HDTM 服务发布的格

网和站点产品在形式和数量上的差异，本节分别编制 HDTM 数据电文编码规则，并提出一种基于实时流传输的 HDTM 模型服务。

HDTM 模型格网产品编码规则

考虑到 HDTM 模型的弹性服务和可拓展性，以及格网数据结构的复杂性，参考 RTCM 电文的编解码协议，设计的 HDTM 格网参数实时电文编码结构如图 4-17 所示。



图 4-17 HDTM 格网实时数据电文编码结构

HDTM 格网参数电文字段的具体定义和说明如表 4-6 所示。电文采用与 RTCM 相同的文件头协议，同步头为 0xD3（二进制格式为“1101 0011”），方便用户在现有 RTCM 电文的基础上进行修订来实时解码 HDTM 参数。

在 HDTM 电文中的“Data Body”部分，采用一个子电文头携带子帧的形式进行数据编码。其中，DATA ID 会指示数据播发类型，“GP Num”是指的是 Message 中格网点的数量。当 DATA ID 指示为“00”时，该电文为格网信息电文，Message 部分会播发格网信息参数，包括 Lat Index、Lon Index 和 Height，采用 Lat Index 和 Lon Index 来标记格网点，利用 $(Lat\ Index * Resolution)$ 和 $((90 - Lon\ Index) * Resolution)$ 来计算格网点的经纬度，Height 提高格网点高度；当 DATA ID 指示非“00”时，该电文为数据电文，但是数据类型不同，一组格网点数据被认为是一个信息单元。例如，当 DATA ID 为“01”时，数据仅包括格网点 ZHD，格网点顺序同格网信息电文一致；当 DATA ID 为“10”时，按照格网信息电文顺序，同步播发 ZHD 和 Tm，一次两个参数一组。Message 直到完成电文头提示的格网点数量播发，如果数据长度不足一个数据单元，采用补 0 的方式填充，在新的子帧继续新数据单元的播发。

表 4-6 HDTM 实时数据电文说明

参数内容	说明	长度
Preamble	RTCM 同步头, 0xD3	8 bits
Reserved	保留位	6 bits
Length	电文长度（字节）	10 bits
Type ID	自定义 RTCM 电文号, 1701	12 bits
Tow	GPS 周内秒	20 bits
	产品空间分辨率指数, 00: $0.25^\circ \times 0.25^\circ$	
Res ID	01: $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 10: $1^\circ \times 1^\circ$ 11: $5^\circ \times 5^\circ$	2 bits
	产品类型指示因子:	
DATA ID	0000: 格网信息 0001: ZHD 0010: ZHD, Tm 0010: ZHD, ZWD, Tm	4 bits
GP Num	电文中格网点数量	2 bits
	健康指示因子,	
Health	00: 健康 01: 正在测试 10: 即将测试 11: 错误	2 bits
	电文龄期因子:	
IOD	滚动更新, 方便索引最新电文	4 bits
Page Num	子帧序号	8 bit
Lat Index	纬向格网点序号	16 bits
Lon Index	经向格网点	16 bits
Height	格网点参考高度	16 bits
ZHD	天顶静力学延迟	16 bits
Tm	大气加权平均温度	16 bits
ZWD	天顶湿延迟	16 bits

HDTM 模型站点产品编码规则

单一 GNSS 用户在实时获取 HDTM 产品对 GNSS 对流层延迟精确改正或进行 GNSS 高精度水汽反演时, 直接接收广域的 HDTM 格网实时流信息会带来数据冗余和传输负担, 不适用于单一用户对站点参数的高效获取。因此, 为满足站点的即时数据服务, 本节提出一种 HDTM 模型站点产品数据实时流播发方案, 设计的电文格式和编码结构如图 4-18 所示。

由于站点坐标和其他相关参数的具有一定的隐私性, 本节在设计播发 HDTM 模型站点产品的电文格式时, 采用授信密钥机制播发数据。具体实现流程如下: 用户在申请站点数据时会获取站点 ID 和实时流数据密钥, 长度为 10 bits。用户在从挂载点获取 HDTM 站点电文时, 获取电文中的“Auth code”段, 利用已知的

密钥与“Auth code”段进行 XOR 运算，以获得前导数据长度 n。然后根据上述编码方式，在验证站点 ID 后，读取数据体的 ZHD 等参数。数据类型格式和编排与格网中“DATA ID”定义一致。



图 4-18 HDTM 格网站点数据电文编码结构

HDTM 格网和站点数据在服务端进行编码后，会利用 NTRIP 协议对上述电文利用固定挂载点进行播发。本节提出的基于实时流传输的 HDTM 模型服务具有高时效性、安全性和便捷性，能够同时面向区域/全球、不同空间分辨率等应用场景提供弹性服务，同时在未来增加播发其他参数时具有较高的传输性能和可拓展性。

综上，上述实时流数据编码规则的建立，有利于充分发挥 HDTM 模型的高时效优势，突破当前基于并址实测气象参数的水汽反演方法的局限性，为实时水汽反演应用提供便利可及的对流层辅助参数获取方式。

4.6 本章小结

本章利用数值天气模式建立了适用于实时 GNSS 水汽反演的对流层辅助参数模型并命名为 HDTM 模型。围绕 HDTM 模型，介绍 HDTM 模型的建立和应用方法。利用 ERA5、地表气压观测数据和探空数据分析验证了 HDTM 模型 ZHD 和 Tm 在中国区域的基本表现和其在时间分辨率和精度上的显著优势；同时，利用全国 GNSS/MET 网络的 GNSS 水汽产品，验证了 ZHD 和 Tm 参数质量对 PWV 反演精度的影响，为高时效和高时空分辨率的 GNSS 水汽监测业务提供研究参考。最后，本章还提出一种定制化的 HDTM 数模型实时服务模式，建立了适用于实时流播发的 HDTM 格网和站点格式的 ZHD 和 Tm 参数电文编码规则和服务，该服务具有可拓展性和弹性播发的特点，有利于在实时水汽监测业务中充分发挥 HDTM 模型的高时效性优势，从而突破现有水汽监测模式的应用局限。

第5章 低成本高时效水汽监测方法及其在复杂环境的应用研究

第三章已经论证低成本 GNSS 终端能够在实时和事后模式下提取高精度对流层延迟，第四章研发 HDTM 模型并建立其实时服务模式，为实时水汽反演提供 ZHD 和 Tm 的高时效获取方式。本章聚焦于低成本高时效水汽监测方法及其在复杂环境的应用，本章首先提出一种新的实时 GNSS 水汽反演方法并拓展到低成本终端，然后从“硬件平台”、“应用场景”和“天气响应”三方面论证了该方法的应用优势：实施简便，性能可靠，可拓展性强。新方法有效改善了现有水汽监测模式的兼容性和独立性，显著降低水汽监测终端的硬件成本，突破低成本北斗/GNSS 实时水汽监测方法的应用局限，同时进一步验证了其在感知极端天气水汽变化和获取海洋水汽资料等方面的潜力与优势。

5.1 引言

随着全球气候变暖，极端天气事件的发生频率呈现上升趋势，其中极端降水尤为突出。强降雨、台风、大气河流等极端天气通常具有突发性、强度大、持续时间短和破坏性强等特点，伴随大规模水汽输运，导致大气中水汽的剧烈波动，同时会引发其他极端天气和次生灾害，造成重大人员和财产损失(Bonafoni et al., 2019, Jones et al., 2020)。因此，灵敏地感知和监测大气中水汽的剧烈变化与输运过程，获取水汽过程的精细化结构，亟需依赖密集的地基 GNSS 观测网络以及兼具高时效和高精度的 GNSS 水汽监测模式(Wang et al., 2019b, 张克非 et al., 2022, 何琦敏, 2023)。低成本北斗/GNSS 水汽监测终端可以作为对测地型地基网络进行有效加密的潜在设备，但是当前并没有成熟可靠的低成本 GNSS 水汽监测终端、方法和模式研究，能为上述 GNSS 水汽监测模式的实现提供极具成本效益的解决方案。

另外，海洋是大气水汽的主要来源，也是水汽输送的重要载体(Wang et al., 2023)。然而，目前针对海洋水汽的高时效监测仍存在较大不足。传统的水汽探测技术可以在陆地上实现高精度的大气水汽含量监测，但在海洋区域的适用性较差，使得海洋水汽资料获取面临一定挑战(Wu et al., 2022)。一方面，现有的海洋 GNSS 水汽监测法主要是后处理方式，实时水汽产品获取困难，尤其是温压观测难以实时获取(Fujita et al., 2008, Wei et al., 2023)。另一方面，不同于陆地水汽监测站点的静态环境，终端在海洋动态环境中会受到海浪等外力的冲击和潮汐作用，卫星信号发生频繁失锁且观测姿态难以稳定，对流层延迟会与动态变化的高程高度

耦合。因此，基于海洋动态平台获取高精度对流层延迟并反演为水汽尤为困难。此外，既往的海洋水汽反演研究大都是基于测地型终端的，忽略了低成本北斗/GNSS 终端的高时空分辨率水汽监测上潜力和优势(Wang et al., 2019a)；同时，过多关注于船载 GNSS 数据及其水汽观测表现，而忽略适用于定点观测和高密度施放的 GNSS 浮标平台的水汽监测表现(郭博峰 et al.)。而本文提出的基于 HDTM 模型的水汽反演方法和低成本终端及其联合方案在获取海洋水汽资料上具有应用潜力和优势，能够为高时效和高时空分辨率的海洋水汽获取提供研究思路和参考。

综上，本章聚焦于低成本高时效 GNSS 水汽监测，从“天气响应”、“应用场景”和“硬件平台”三方面发展新型水汽监测服务模式，并开展复杂环境下的应用验证。在天气响应上，提出基于 HDTM 模型的水汽反演方法，并应用于强降雨和台风等两次天气事件中，探索其在感知水汽变化和预警极端天气等方面的应用潜力与优势。在应用场景上，联合新型水汽反演方法和低成本终端提出基于海上动态平台的水汽监测模式并利用海上浮标和调查船等动态平台检验其在海上水汽监测上的基本性能。在硬件平台上，将新的水汽反演方法拓展到低成本北斗/GNSS 终端，可以简便地将低成本终端转变为即时可用的实时水汽监测终端以服务于高时效水汽监测。

5.2 基于 HDTM 模型的实时水汽反演方法及应用

本节首先提出基于 HDTM 模型的实时水汽反演方法，然后利用暴雨和台风两次极端天气事件探究了本文提出的实时水汽反演方法在强降水事件中实际性能，为开展面向极端天气的水汽快速监测提供新的技术方案和前沿认识。

5.2.1 实时水汽反演方法

为解决传统水汽反演方法对实测气象参数的依赖，本文提出一种基于 HDTM 模型的实时 GNSS 水汽反演方法，服务于无实测气象参数场景下的实时水汽反演应用。新方法从 HDTM 模型中提前获取未来 6 小时内的逐小时间隔的格网参数，并结合上述高度归算模型计算站点处的 ZHD 和 Tm 来替代实测气象参数，进而结合实时精密单点定位解算的 ZTD 来实时反演高精度 PWV。

基于 HDTM 模型的实时水汽反演方法的具体实现过程表示如下：

$$ZWD = ZTD_{GNSS} - ZHD_{HDTM} \quad (5-1)$$

$$PWV = ZWD \cdot \Pi_{HDTM} \quad (5-2)$$

$$\Pi_{\text{HDTM}} = \frac{10^6}{\rho_w R_w \left(\frac{k_3}{T_{m\text{HDTM}}} + k'_2 \right)} \quad (5-3)$$

其中, R_w 为水汽气体常数, 取值为 461.495 J/kg ; 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, 经验值分别为 $22.13 \pm 2.20 \text{ K/hPa}$ 和 $(3.739 \pm 0.012) \times 10^5 \text{ K}^2/\text{hPa}$; ZTD_{GNSS} 为 GNSS 解算得到的 ZTD, Π_{HDTM} 是将 ZWD 转化为 PWV 的比例因子; $T_{m\text{HDTM}}$ 和 ZHD_{HDTM} 为 HDTM 提供的静力学延迟和大气加权平均温度。

图 5-1 展示了基于 HDTM 模型的 GNSS 实时水汽反演方法的工作模式。在服务端, HDTM 模型使用 GFS 和 IFS 两类 NWP 数据来构建对流层辅助参数模型, 有利于对预报参数的质量检核, 充分保证了模型的冗余性和可靠性; 在用户端, HDTM 模型可以直接给 GNSS 台站提供 ZHD 和 Tm, 解决了实时水汽反演中辅助参数难获取的问题, 同时摆脱气象传感器的硬件依赖, 改善 GNSS 实时水汽反演的独立性和灵活性。在水汽监测业务中, HDTM 模型可以为广域 GNSS 用户提供对流层辅助参数, 具有灵活便利的特点, 有利于改善现有 GNSS 水汽监测网络和模式对低成本 GNSS 测站的兼容性。

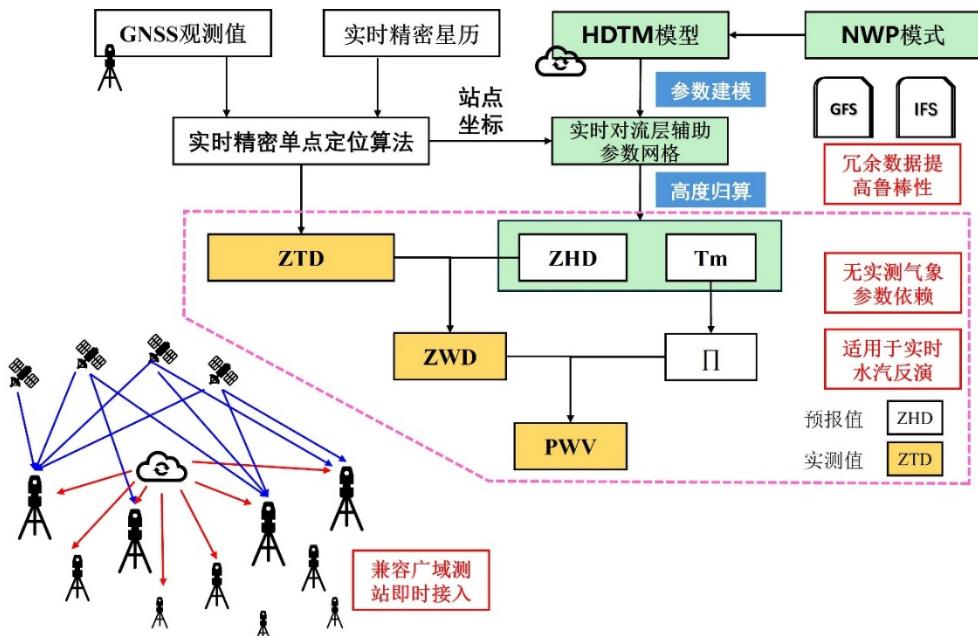


图 5-1 基于 HDTM 模型的 GNSS 实时水汽反演工作模式

5.2.2 武汉降雨天气事件

极端暴雨等恶劣天气事件通常在大气环流形势异常的背景下形成,受到多尺度系统和地形等多种因素的共同影响。暴雨的发生、发展和消散会引发大气中水汽的大规模输运和剧烈变化,从而导致显著的对流层扰动(何琦敏, 2023)。利用高时空分辨率的地基 GNSS 实时水汽监测技术可以灵敏地探测对流层扰动期间的水汽变化过程,为强降雨等极端天气的预报预警提供可靠的水汽观测资料(余洋 et al., 施闻 et al., 2022)。

根据历史气象资料,2023 年 6 月 17 日-18 日,湖北省发生大范围强降雨过程,特点是范围广、累计雨量大,并伴有强对流天气。其中鄂西南、江汉平原及鄂东地区有大到暴雨,局部大暴雨,并伴有短时强降水、雷暴大风等强对流天气。在此期间,武汉市出现阵雨或雷阵雨天气,全市雨量分布不均,强降水区主要位于黄陂北部,其累计雨量为 34~96 毫米。

本节利用武汉 6 月 17 日到 19 日发生的连续强降水事件来说明基于 HDTM 模型的实时水汽反演方法在强降雨极端天气中的应用效果。图 5-2 展示了基于 HDTM 模型的实时水汽反演方法在 BTCD (武汉) 站获得的 PWV 序列,记为 HDTM-PWV。其中,参考 PWV 来自中国气象局的后处理水汽产品结果,采用后处理策略和实测气象参数来获得 PWV 参考值,记为 RF-PWV; 本节还基于 TUW VMF-3 FC 提供的 ZHD 产品和 ERA5-Tm 计算了同期的 PWV 结果,记为 TUW-PWV。降水数据是武汉气象站记录的逐小时降水量数据,由湖北省气象局提供。

从图中可以看出,此次强降水事件主要分为两轮,降水强度第一轮要略弱于第二轮,降水集中时间段用浅灰色阴影进行标注。从 PWV 序列上来看,水汽从 DOY 166 开始快速抬升,持续上升到约 70 mm 左右。基于 HDTM 模型的 PWV 反演结果与参考 PWV 变化基本一致,能够清晰反映水汽的蓄积进程,也能捕获到中间短暂降低的现象。而 TUW-PWV 受限于 6 小时的时间间隔,只能粗糙的反映水汽蓄积变化。在两轮降水过程中,水汽发生明显的高位变化,在两轮降水中间,发生 PWV 的短暂降低,紧接着抬升到新的高点。可以从第二次降水的水汽顶点差异看出, HDTM-PWV 与参考结果基本一致,记录 PWV 达到 76.6 mm,而 TUW-PWV 记录的极大 PWV 为 72.5 mm,且其提示的水汽下降起点也要早于 HDTM-PWV。随着降水进程的结束, PWV 逐渐降低, HDTM-PWV 可以清晰刻画水汽“持续下降、降中有升”的抖动下降过程。而 TUW-PWV 由于过于稀疏,只能显示水汽的快速下降,不能够刻画水汽的细节变化。例如在 DOY 171-172,水汽还发生一个小抬升,但是受限于 6 小时分辨率的 TUW-PWV 会错漏这个 PWV 的抬升信号。

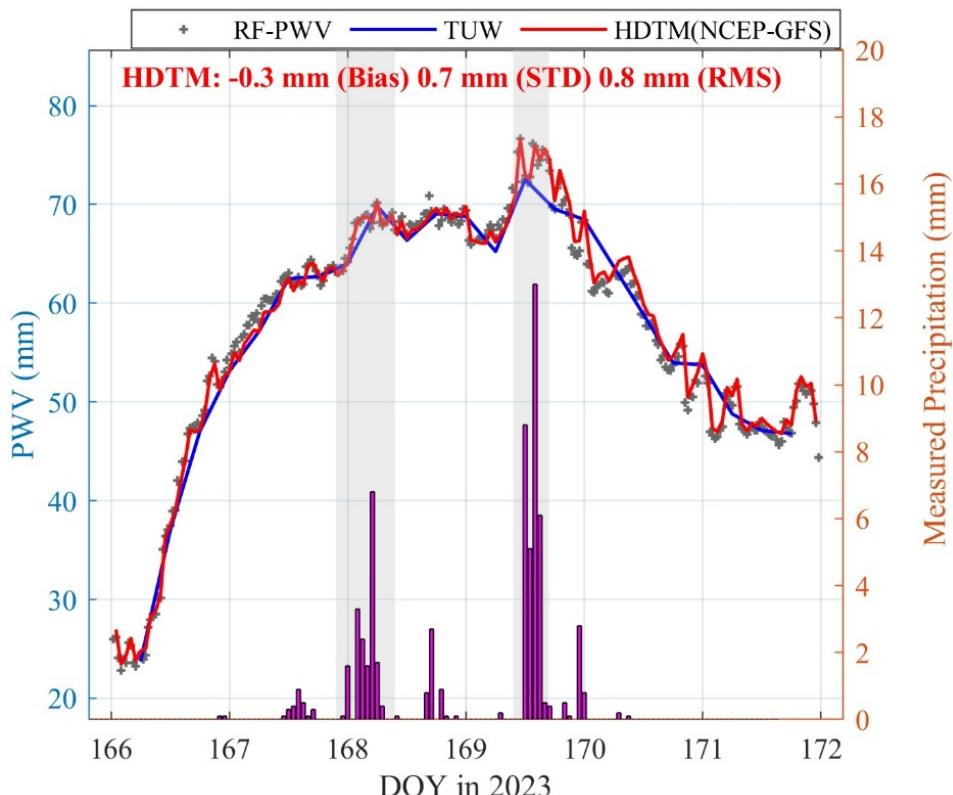


图 5-2 武汉强降水期间的 PWV 变化

注：图中参考 PWV 来自中国气象局在 BTCD 的常规水汽产品，红色折线指基于 HDTM 模型的水汽反演结果，蓝色线指基于 TUW 模型的水汽反演结果。以上结果充分说明 HDTM 模型可以在扰动天气下有效替代实测气象参数，支持在未配置气象传感器情况下独立实施 GNSS 水汽反演，并对强降雨极端天气下的水汽变化进行有效监测，充分改善了水汽监测技术的硬件依赖和应用限制。另外，结果也初步表明，基于 HDTM 模型的水汽反演方法在反映水汽动态变化上具有高时间分辨率优势，能够精准捕获水汽的关键峰值节点和抬升/下降的重要阶段，能够为实时降雨预报和研判提供参考依据。

5.2.3 台风“三巴”天气事件

不同于强降雨的水汽扰动，台风作为一种强对流天气，具有突发性强、破坏力大等特点，不仅会引起大气状态（如气压、温度）发生短时剧烈变化，还会引起水汽的大范围输运。本节分析了基于 HDTM 模型的实时水汽反演方法在台风“三巴”过境期间的性能表现，探究其在台风等恶劣天气下的可靠性。

台风“三巴”是 2023 年第 16 号台风，其发生、发展及影响主要集中在 10 月 17 日到 20 日。图 5-3 展示台风“三巴”的移动路径以及在 10 月 20 接近北海市附近的台风状态。此时台风中心相距北海站小于 30 公里，为强热带风暴状态。

受台风“三巴”和冷空气共同影响，北海市在 10 月 19 日至 21 日期间经历了强降雨，并引发了城市内涝、船舶停航和交通中断等灾害事件。掠过北海沿海后，在 10 月 20 日 9 时 45 分前后，“三巴”在广东省湛江市沿海再次登陆，登陆时仍维持热带风暴强度，中心附近最大风力为 8 级（20 米/秒），中心最低气压为 995 百帕(陈俊如 et al., 2025)。



图 5-3 台风“三巴”的移动路径和接近北海站时的风暴状态

注：相关气象数据信息来源于中国气象台台风网

按照与武汉站相同的处理方式，本节分别基于 HDTM 模型和 TUW 产品计算了北海站（GXBH）的 PWV 序列，分别记为 HDTM-PWV 和 TUW-PWV，还收集了后处理 PWV 结果作为参考，记为 RF-PWV。降水数据来源于美国国家海洋和大气管理局存档的全球气象观测资料，观测量为三小时累计降水量，间隔三小时。

图 5-4 展示了台风“三巴”期间基于 HDTM 模型的水汽反演方法获得的 PWV 结果（红色），蓝色曲线为 TUW-PWV，用以说明基于 TUW VMF3-FC 的水汽反演表现。从图中可以看出，台风以强热带风暴状态抵近北海站，导致在 10 月 19 日-20 日发生显著大规模降水，两天内连续累计降水量达到 2000 mm 以上，最大降水量达到 128 mm/h，充分说明这次台风引起的降水事件具有猛烈且集中的特点。

在此次降水事件中，基于 HDTM 模型的反演 PWV（HDTM-PWV）与参考 PWV（RF-PWV）的精度基本相当，其均方根误差在 1.1 mm 左右。反演得到的小时级 HDTM-PWV 有效刻画了水汽的快速变化，尤其是显著反映了水汽抬升变化的三个阶段：低点缓慢上升，逐步蓄积速度加快到高点，随后蓄积速度减缓继

续抬升至高点。在此次降水高峰时，水汽发生剧烈的高位抖动变化，期间达到最大水汽量。在降水基本结束时，水汽开始剧烈下降，但是下降过程同武汉强降水事件规律一致，“持续下降、降中有升”。在 TUW-PWV 受限于较低的时间分辨率，未能有效捕获上述水汽变化的细节性特征，并且在水汽峰值指标上出现低估现象。分析其背后的原因，一方面，这与 TUW-PWV 过于稀疏的采样点，导致难以获取高时间分辨率的反演结果，无法刻画细节变化有关；另一方面，极端天气也会引起大气参数的短时剧烈波动，预报的大气场参数存在一定的误差，导致反演水汽结果出现偏差。然而，HDTM 模型的高分辨率和高精度优势有效弥补了以上不足，在台风天气中依旧稳定可靠，反演的 GNSS-PWV 清晰刻画了极端天气中水汽的细节性变化，为阐明极端天气中水汽变化规律提供可靠的观测资料。

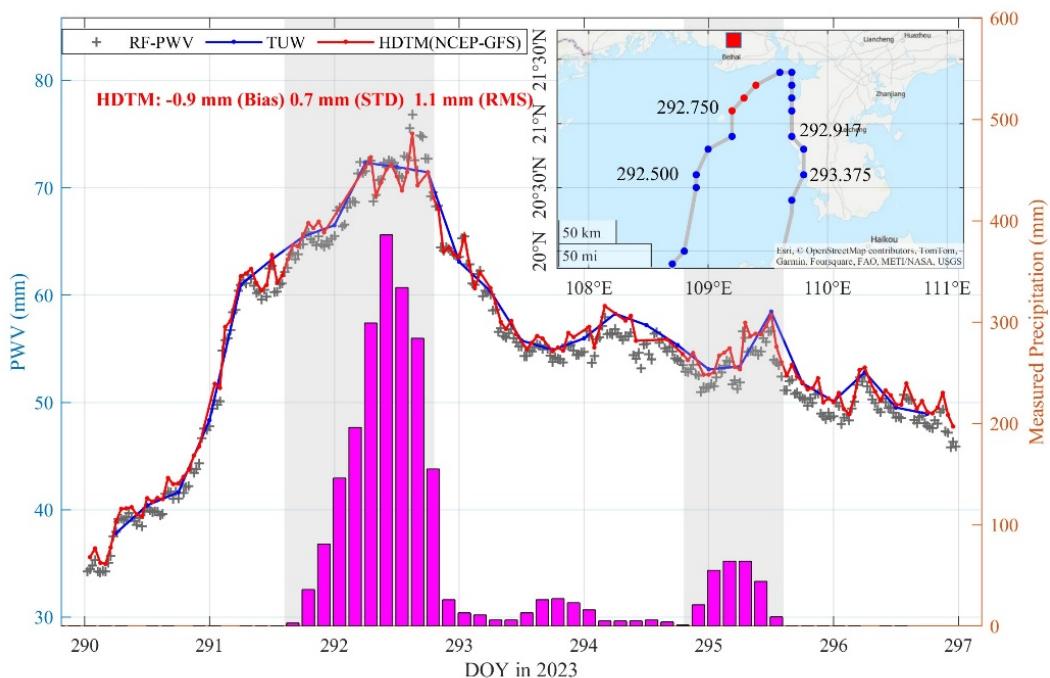


图 5-4 台风“三巴”过境期间实时水汽反演方法的表现

注：图中参考 PWV 来自中国气象局的常规水汽产品，红色折线指基于 HDTM 模型的水汽反演结果，蓝色线指基于 TUW 模型的水汽反演结果

综上，以上两次发生水汽剧烈变化的极端天气事件都充分展示了基于 HDTM 模型的水汽反演方法的性能优势：高时间分辨率和高精度。结果初步表明：基于 HDTM 模型的实时反演方法可以摆脱实测气象参数的依赖，在强降雨事件发生、发展和消散全过程中灵敏地监测水汽的细节性变化，有效探测水汽的峰值和变化规律，为开展强降雨等极端天气中水汽变化提供高时空分辨率的观测资料。

5.3 基于海上动态平台的低成本水汽反演方法及其应用

本节聚焦于低成本 GNSS 水汽监测方法在海洋动态观测平台上的应用，主要利用低成本 GNSS 浮标和船载 GNSS 观测验证低成本终端在海上获取高精度对流层延迟的可行性，另外利用 HDTM 模型辅助低成本 GNSS 终端开展海洋水汽反演并初步分析其在海上动态平台的基本表现，为后续开展基于低成本 GNSS 终端的实时水汽监测方法提供研究参考。

5.3.1 适用于海洋动态观测的低成本高时效水汽监测方法

调查船、浮标海洋等动态平台和岛礁固定台站是当前获取海洋水汽资料的重要基础设施。而现有的海洋水汽观测存在工作局限：其一，弱网络通信环境使得高时效水汽资料获取困难，主要体现在实时水汽反演需要依赖稳定可靠的网络环境来获取实时精密产品和回传水汽资料。我国北斗系统提供的区域/全球短报文服务和 PPP-B2b 星基服务可以有效改善当前实时水汽资料解算和回传的困难，尤其是在弱网络的海洋环境。其二，可靠的水汽监测需要依赖稳定的水汽监测终端。目前尚未开发出适用于海洋水汽反演的终端设备，水汽反演方法还需要依赖气象设备，在动态平台上获取水汽的灵活性不足。

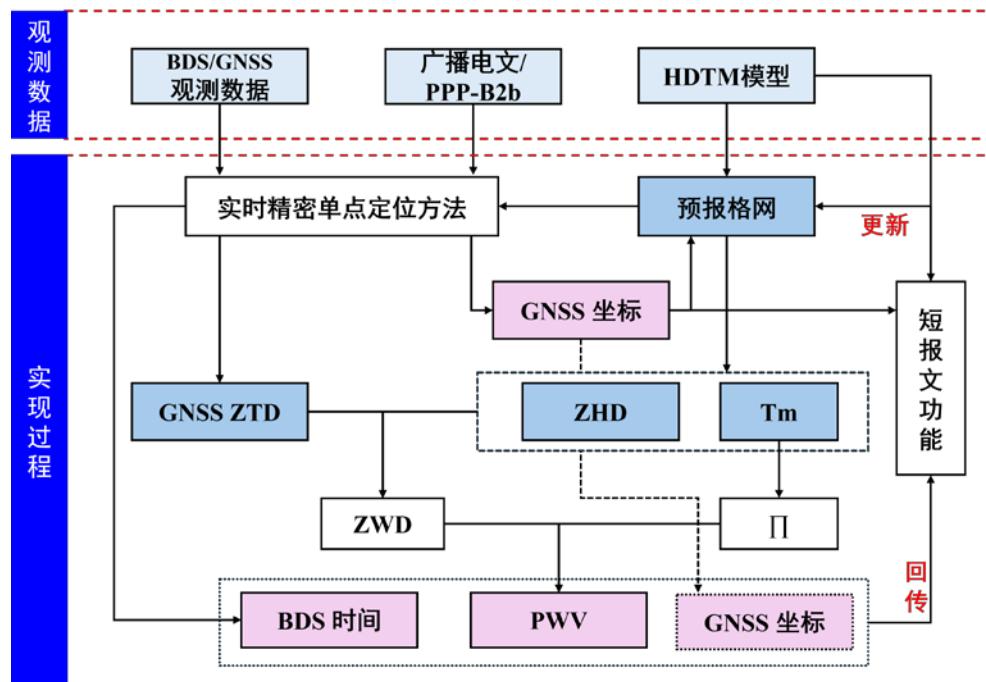


图 5-5 适用于海洋动态平台观测的低成本高时效水汽监测方法实现流程图

因此，本文提出了一种适用于海洋动态平台观测的低成本高时效水汽监测方法，具体实现流程如图 5-5 所示。该方法利用低成本北斗/GNSS 终端采集观测数据、广播电文和 PPP-B2b 信息，通过基于 PPP-B2b 的实时精密单点定位方法解

算当前的时间、坐标和对流层延迟。然后，根据 HDTM 模型的预报格网和站点坐标计算当前载体的 ZHD 和 Tm。一方面，ZHD 可以用于实时精密单点定位中对流层延迟静力学分量的改正；另一方面，ZHD 和 Tm 可以用于实时 PWV 的反演。反演的 PWV 可以随坐标和时间一同被编码通过北斗短报文服务发送到远程服务端。远程服务端也可以利用短报文系统向海洋动态平台上的终端播发 HDTM 格网产品信息。该方法能够充分发挥低成本 GNSS 浮标的灵活性，在提供连续可靠水汽资料获取的同时，可以将浮标采集的原位测量参数（如浪高和潮位）一并通过北斗短报文终端发送回服务端。HDTM 模型本身是实时辅助参数模型，能够为水汽反演提供高时效对流层辅助参数。因此，模型可以适用于海洋浮标和船载设备等动态平台对 ZHD 和 Tm 参数的实时获取需要，通过较高空间分辨率格网产品和精确的高度归算方法为实时水汽反演提供可靠的气象参数替代。

因此，本节利用低成本北斗/GNSS 浮标和船载低成本北斗/GNSS 终端对该方法的后处理模式进行验证和分析，讨论上述方法在海洋动态平台上获取高精度水汽资料的可靠性。另外，因为利用基于 PPP-B2b 精密单点定位实现对流层延迟的实时解算目前算法和模型较为成熟，且实验数据采集时刻同期的 PPP-B2b 电文难以获取，所以后文中对流层延迟采用后处理方式计算。

5.3.2 低成本 GNSS 浮标的 ZTD 估计和水汽反演表现

GNSS 浮标是一种重要的海洋浮动观测平台，利用多传感器集成可实现海面风速风向、温湿压、长短波辐射等参数的长期定点监测，还可以对海洋原位气象要素以及风浪和涌浪波高、周期、波向等海浪参数进行直接测量，同时也可以对近岸海洋水汽变化进行监测(Bosser et al., 2022)。

相比船载平台，浮标平台具有观测点位相对固定、分布范围广、改造和观测成本低廉的优势。另外，使用低成本 GNSS 硬件可以增加浮标的成本效益和观测时空分辨率，研究和分析低成本 GNSS 浮标的水汽监测方法有利于拓展浮标的应用场景，提供更丰富的海洋要素产品。因此，本节利用低成本 GNSS 浮标进行水汽反演的研究与验证，为海洋近岸水汽高时空分辨率观测提供参考。

为验证基于低成本 GNSS 浮标的水汽监测表现，本节采用一组在青岛近海投放的为期一个月的 GNSS 浮标数据来说明。基站为一台大地型接收机，在浮标工作期间坐标固定。GNSS 浮标为倒锥形，上端平台为 GNSS 天线，采用低成本蘑菇头型天线；接收机采用低成本 Ublox F9P 模组，内置在浮标内部，能够跟踪 GPEC 四系统双频信号；锥形扇形表面覆盖 4 块太阳能面板，用于整体浮标供电，具体外观样式如图 5-6 所示。浮标与基站间距为约 6 公里，在工作期间东西运动范围约 85m，南北运动范围约 63m，上下起伏约 10m，基本可以实现对海洋固

定点位上空水汽的长期观测。为验证对流层估计性能，青岛探空站（54857）同期廓线数据也被获取用作参考。GNSS 浮标与探空站和基站的相对位置如图 5-7 所示。



图 5-6 低成本 GNSS 浮标外观



图 5-7 GNSS 浮标与探空站和基站的相对位置

首先，为分析 GNSS 浮标观测值质量，本节展示了基站和浮标在 DOY 188 的可视 GPS 和 BDS 卫星数变化，如图 5-8 所示。值得说明的是，浮标在投放 10 天后，用于稳定其姿态的浮力球丢失，浮标姿态不理想导致观测质量变差。另外，浮标在运行期间还受到海上降雨和风浪天气的影响，其中，DOY 188 是回收浮标的前一天。从图中可以看出，测试浮标在漂流的运动状态下有效卫星个数相比于基站变化更为剧烈，应为海洋海浪冲击飞沫覆盖以及浮标姿态变化引起跟踪的卫星数量发生频繁失锁，导致观测值存在较为明显的误差，这给 ZTD 的解算带来了困难。其中，平均 BDS 和 GPS 可视卫星数为 5.7 颗和 7.5 颗数，发生频繁失锁的卫星主要为 GPS 卫星。由于在亚太地区实现重点增强，北斗系统极大地增

益海洋 GNSS 浮标的卫星跟踪能力和在动态环境下的抗干扰能力。

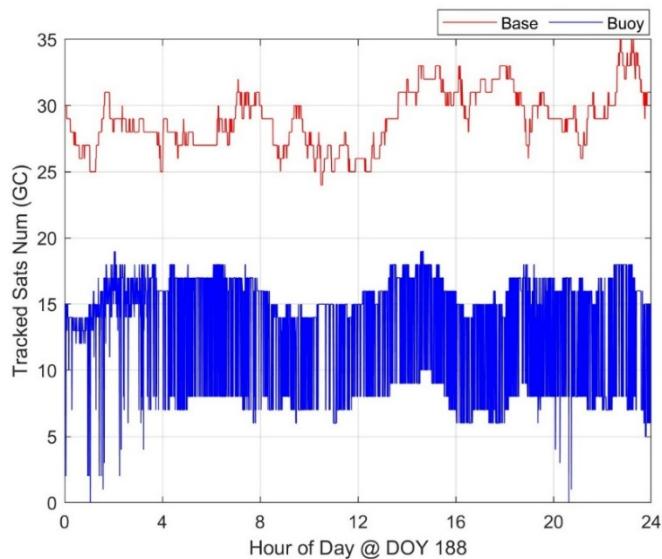


图 5-8 GNSS 基站和浮标跟踪卫星数量(GPS+BDS)变化

为了研究低成本 GNSS 浮标在海洋动态情况下,特别是卫星频繁失锁的恶劣情形,低成本浮标获取 ZTD 的准确性,图 5-9 展示了 GNSS 浮标后处理获得 ZTD 与探空和 ERA5 比较的结果。ERA5 和 RS 的结果是根据廓线数据和浮标动态位置计算得到的,由于浮标的高度在 ERA5 和 RS 的底层高度以下,计算 ZTD 时需要进行气象参数的延拓,这会产生一定的计算误差。GNSS 浮标的 ZTD 与参考结果的差异见表 5-1。从图中可以看出,浮标获得 GNSS ZTD 与 ERA5 具有较好的趋势一致性,但受限于动态观测环境,其 ZTD 质量与 ERA5 ZTD 存在显著差异,偏差约在-6.9 mm,均方根误差在 21.7 mm。而基站的观测环境较为稳定,其 ZTD 与 ERA5 结果的偏差约在 0.9 mm,均方根误差在 15.5 mm。由于探空站点与基站和浮标的距离较远,且存在一定的高度改正误差,统计结果不能直接说明 GNSS ZTD 的精度,但浮标和基站的结果差异可以佐证浮标的 ZTD 质量受海上观测环境影响显著。

表 5-1 相对于 ERA5 和探空结果的基站和浮标 GNSS ZTD 精度

站点	ERA5	RS
	Bias (RMS)	Bias (RMS)
测地型基站	0.9 (15.5)	-11.7 (22.2) mm
低成本浮标	-6.9 (21.7)	-21.7 (28.2) mm

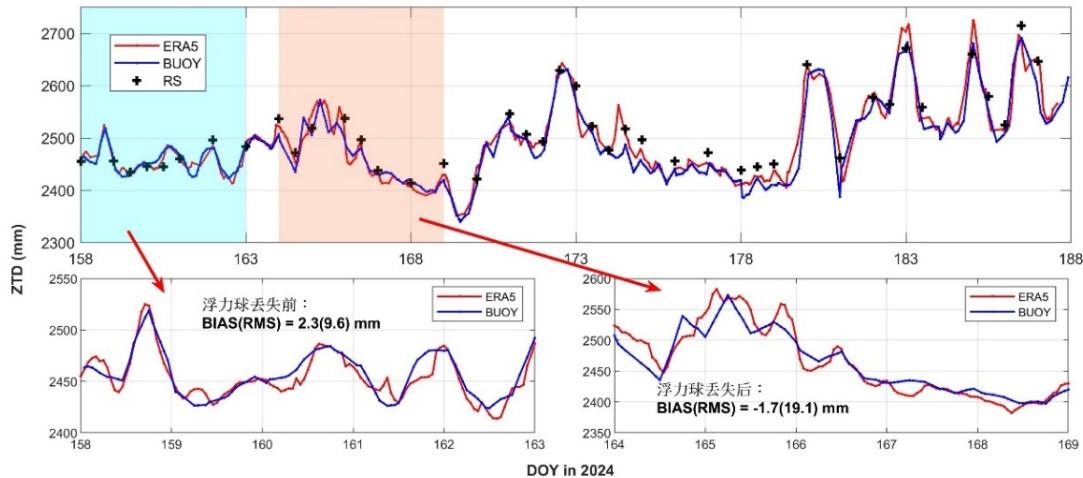


图 5-9 GNSS 浮标获取的 ZTD 与探空、ERA5 结果的比较

另外，由于 GNSS 浮标与测地型基站相距仅 6 公里，且高度平均差异在 38 m 左右，最大高差在 44 m，因此基于 GNSS 基站解算的 ZTD 也可以作为浮标 ZTD 结果的可靠参考。利用 Huang et al. (2023a) 提出的全球对流层高度改正格网模型计算基准站和 GNSS 浮标的 ZTD 差异，再将浮标 ZTD 订正高度差异后与基准站的 ZTD 进行比较，结果如图 5-10 所示。从图中可以看出，两者结果趋势基本一致，差异在-4.2 mm，均方根误差在 15.4 mm，结果与前述比较结果相符。与岸基基准站相比，GNSS 浮标的 ZTD 波动更为明显，这是由于观测环境易受到海浪运动有关。但是低成本平台仍可以实现较为可靠的对流层估计，基本达到实现水汽反演的 ZTD 质量。

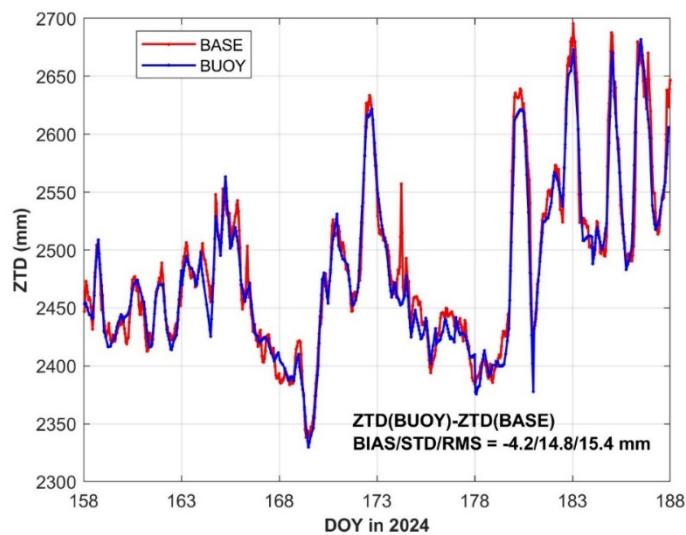


图 5-10 GNSS 浮标与基准站间的对流层差异

为进一步充分说明低成本浮标获取水汽信息的可行性，本节另外处理了2021年在青岛小麦岛海域投放的海上GNSS浮标数据，来源于自然资源部第一海洋研究所杨磊博士发布的低成本浮标数据集（<https://doi.org/10.5281/zenodo.5774652>）。浮标轨迹如图5-10所示，同样采用低成本GNSS芯片级终端和小型天线，东西方向运动范围约165 m，南北方向运动范围约84 m，高程方向上起伏范围在3.3 m以内。

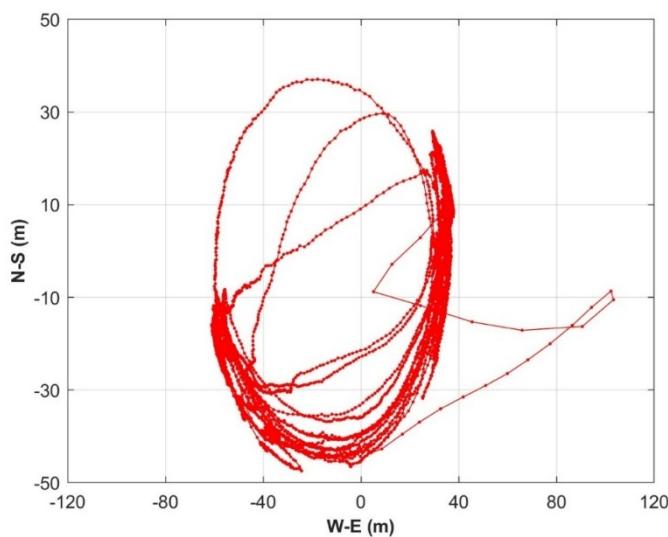


图5-11 低成本GNSS浮标的平面运动轨迹

为验证基于低成本GNSS浮标平台的水汽提取表现，利用浮标GNSS数据计算后处理对流层延迟并使用ERA5和RS结果作为参考进行对比，其ZTD估计表现和水汽反演表现如图5-12所示。从图中可以看出，ZTD在浮标运行期间发生显著抬升(DOY 143)，低成本浮标获取的ZTD能够清晰反映ZTD的变化。同ERA5相比，偏差和均方根误差分别在0.6 mm和10.4 mm。

由于浮标并未采集并址的气象数据，且HDTM模型服务在试验期间没有存档数据，采用ERA5在浮标位置的插值的气象数据作为GNSS水汽反演的辅助参数。从图中可以看出，以ERA5结果为参考，基于实测ZTD反演的GNSS PWV精度在1.6 mm。与ZTD相对应的是，PWV也在DOY 143发生显著抬升，并在达到高峰后迅速回落，应该是由一次短期的降雨事件导致的。另外，反演的PWV结果具有较为明显的周期性变化的信号，考虑到浮标受到海面浪高和潮汐等周期性信号的影响，在本实验中难以对该信号进行精确分离。

实验结果表明，低成本GNSS浮标可以在海洋动态环境中获取高质量的ZTD估计，而且具备开展水汽监测的可靠性能。利用GNSS浮标结合HDTM模型，可以将现有的GNSS浮标在无需任何硬件变更和人工操作的前提下简便地实现

海洋水汽监测终端的基本功能，在其他环境要素观测的基础上，增加毫米级海洋水汽的长期观测能力，这对投放在公海区域的浮标或者随洋流漂动的非锚固浮标，尤为有利。

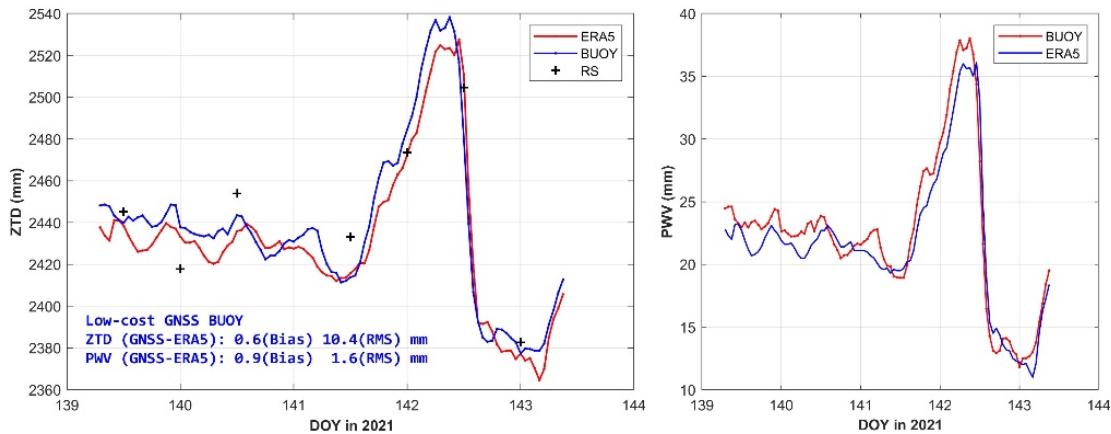


图 5-12 低成本 GNSS 浮标的 ZTD 估计表现和水汽反演表现

未来将会基于 GNSS 浮标开展基于 PPP-B2b 的实时水汽反演方法的研究，实现海洋水汽的连续高时效监测，同时利用北斗短报文服务将海上 GNSS 浮标观测和解算的位置、ZTD 和 PWV 等环境要素即时回传到服务端，用于海上数值天气预报的数据同化，服务海洋天气预报与海洋潮汐和洋流研究。

5.3.3 船载低成本终端的水汽监测表现

船载 GNSS 终端是海洋水汽监测的可靠来源，而低成本 GNSS 终端在前述实验中已经展现出较好的 ZTD 估计效果和水汽监测表现。为实现对海洋水汽的高精度监测，本节主要提出了一种基于 HDTM 模型的船载高精度 GNSS 水汽监测方法。首先利用船载的低成本/测地型并址 GNSS 阵列对船载低成本终端的 ZTD 估计质量进行评估，然后利用搭载船舶气象设备的航试数据对 HDTM 模型在海上动态平台的应用精度进行了检验，最终对新的水汽监测方法进行了验证。

船载低成本 GNSS 终端的后处理 ZTD 估计质量

为了更加全面研究低成本北斗/GNSS 终端在船载动态平台获取 ZTD 的能力，通过在“向阳红 18 号”国家海洋调查船上搭建“短基线”测试环境，即在罗经甲板同时安装低成本 GNSS 终端（Septentrio Mosaic X5）和测地型接收机（SEPT POLARX5TR 和 Trimble R9），GNSS 天线统一配置为司南 AT360 且基本等高，具体终端的安装情况如图 5-13 所示。本节在中国近海海域开展了近 30 天的海上观测实验，探讨并分析船载低成本 GNSS 终端在海上 ZTD 估计的性能表现。

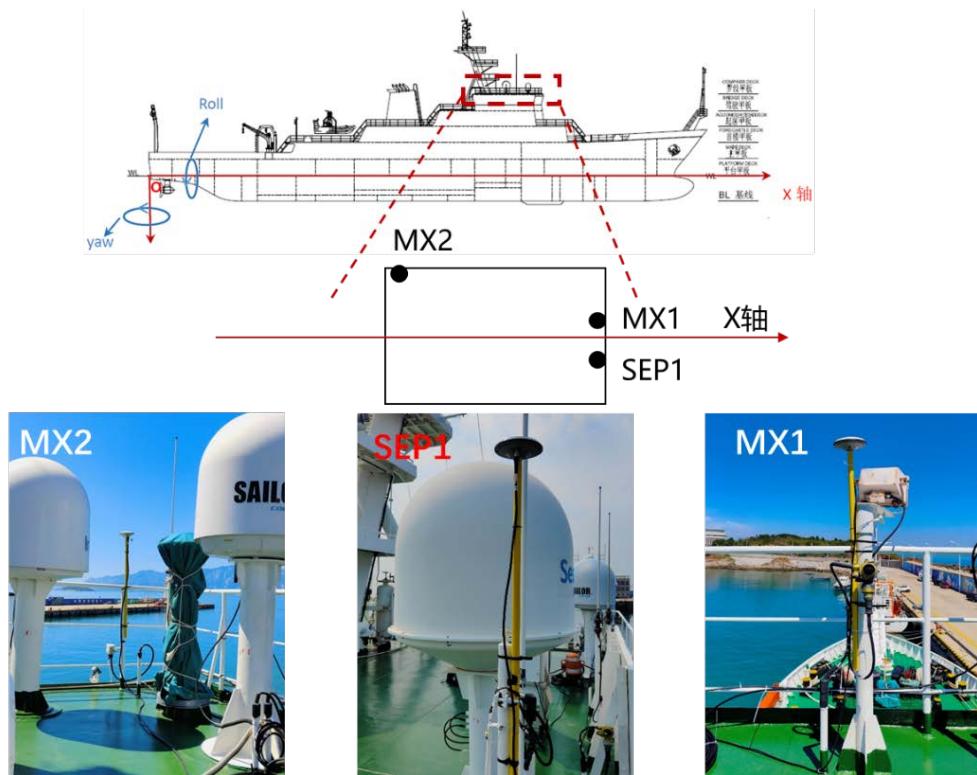


图 5-13 船载 GNSS 终端安装情况

以位置相近的测地型终端为参考,本节首先在后处理模式下计算了低成本终端和测地型终端的对流层延迟,利用三组数据分别对低成本终端间和低成本-测地型终端间的 ZTD 差异进行比较分析,统计结果如表 5-2 所示。首先是两台低成本终端获得 ZTD 差异,偏差和均方根误差分别为 1.7 mm 和 3.2 mm。ZTD 结果的差异是因为两台终端被安装在甲板不同位置,可视卫星区域会受到附近的甲板设施遮挡,观测卫星构型和数量存在一定差异。与测地型终端 Trimble R9 和 Septentrio POLARX5TR 相比,ZTD 差异的平均误差分别在 5.3 mm 和 -0.5 mm,均方根误差分别在 6.0 mm 和 4.5 mm。综上,结果表明船载低成本 GNSS 终端可以在海洋动态环境估计高精度 ZTD,精度优于 6.0 mm,与测地型终端精度基本相当。

表 5-2 航试任务中低成本终端后处理 ZTD 的精度

数据集	接收机类型	时间跨度 (Hours)	精度质量
			(Bias/STD/RMS)
I	Septentrio Mosaic X5(MX2)	25.5	5.3/2.9/6.0 mm
	Septentrio Trimble R9		

II	Septentrio Mosaic X5(MX2)	12.0	1.7/2.8/3.2 mm
	Septentrio Mosaic X5(MX1)		
III	Septentrio Mosaic X5(MX1)	168.0	-0.5/4.5/4.5 mm
	Septentrio POLARX5TR(SEP1)		

由于前述 Trimble R9 接收机终端存在供电故障，未能在返程航行中记录数据，本节以同等质量的测地型终端 Septentrio POLARX5TR 为参考。为具体说明低成本终端在真实航行中的长期表现，本节选取返程航行中 Mosaic X5 和 Septentrio POLARX5TR 记录的 GNSS 观测值并计算连续 168 小时（7 天）ZTD 结果，两者的 ZTD 时间序列如图 5-14 所示。从图中可以看出，对流层延迟在返程航行中发生连续快速变化，特别是在 DOY 264-265 期间，发生显著的下降和抬升变化。另外，与前述浮标的 ZTD 结果类似，船载终端记录的 ZTD 具有较为明显的周期性信号，在每天下午 18 点左右会达到日峰值。上述现象反映海洋水汽在区域上具有较为显著的差异，但存在一定的周期性规律，对其精细探测有利于增进对海洋水汽规律的认识。在不同终端获得的 ZTD 差异上，结果表明低成本终端获取的 ZTD 与测地型终端的 ZTD 基本一致，其连续 168 小时的 ZTD 估计结果的平均偏差和 RMS 分别在 -0.5 和 4.5 mm。相较于测地型终端，低成本北斗/GNSS 终端具有明显的成本效益优势，且精度满足水汽反演对 ZTD 估计质量的要求。综上，以上结果证实低成本终端在海上船载动态平台上能够获得高质量的对流层观测，并且具有稳定的精度表现和开展长期水汽监测的潜力。

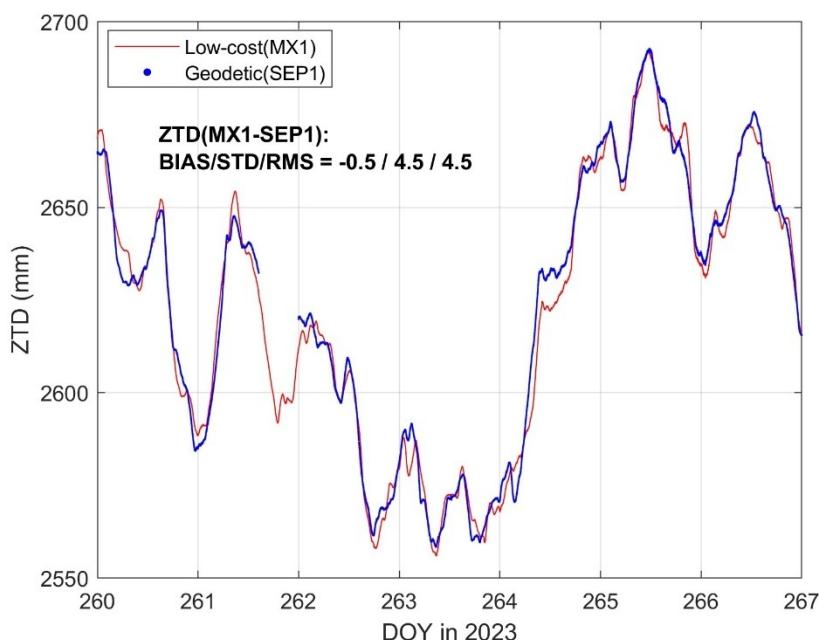


图 5-14 数据集 III 的低成本和测地型终端估计的 ZTD 序列

为解决低成本高时效海洋水汽获取的问题,本节提出采用低成本终端搭载在开展海洋调查的船载动态平台,采用 HDTM 模型来提供动态终端位置的 ZHD 和 Tm 参数,结合低成本北斗/GNSS 终端解算的对流层延迟来实现海上水汽反演。

为验证低成本终端在海上的水汽监测长期表现以及 HDTM 模型在海上水汽监测的应用效果,本节在北部湾开展的某次航试任务搭载低成本 GNSS 北斗/终端并采集长航时海上船载 GNSS 观测数据来进行验证分析。其中,接收机模组为 Septentrio Mosaic X5, GNSS 天线为司南导航 AT360, 还利用专业船舶气象终端采集了与 GNSS 天线并址的实测气象数据。任务时间从 2024 年 8 月 5 日 (DOY 217) 开始,8 月 21 日 (DOY 233) 结束,共计 17 天。图 5-15 展示了此次试验任务的航迹和区域。调查船从湛江港出发,经过琼州海峡,对北部湾区域开展海洋调查,完成航试任务后经琼州海峡回到湛江港。值得说明的是,由于海上难以获取稳定可靠的网络信号,无法及时获取 IGS-RTS 实时流改正信息且本节主要关注提出的水汽反演方法在海洋的应用精度,因此主要是采用后处理方法进行验证。

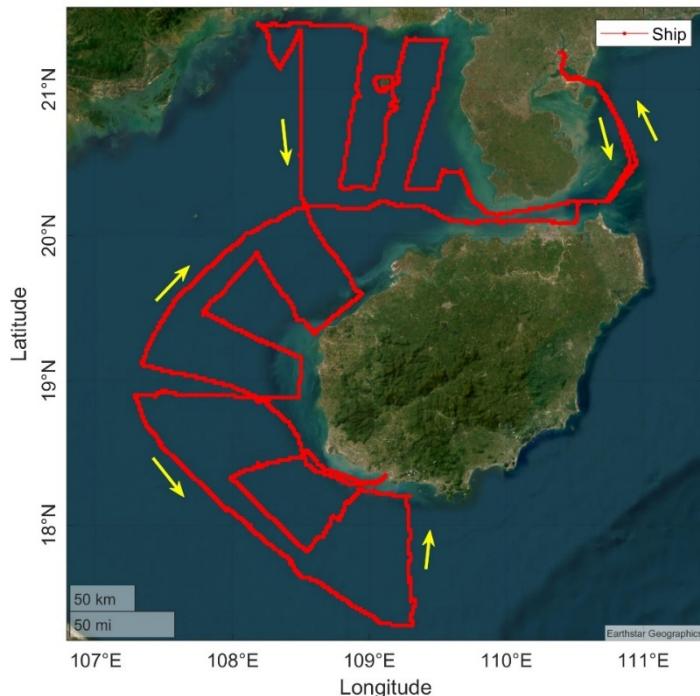


图 5-15 北部湾船载 GNSS 水汽监测试验航迹

以实测气压数据计算的 ZHD 为参考,首先评估 HDTM 模型在海上的质量表现。图 5-16 展示了 HDTM-ZHD、TUV-ZHD 与实测气压计算的 ZHD 在本次航试任务期间的时间序列。从图中可以看出,在长达 17 天的海洋航行中, HDTM 模型为海洋船载动态平台提供 ZHD, 精度在 1.8 mm, 与实测气压计算的 ZHD 基

本一致。尤其在小时尺度的短期变化上，HDTM 模型除了能够表现 ZHD 的日周期变化，还能反映 ZHD 的扰动，有效填补船舶气象终端（因船舶换电导致的）短期失效时的观测空白。为方便对比分析，本节也绘制了 TUW 模型预报格网产品提供的 ZHD，从图中可以发现，TUW 与实测结果存在约 2.9 mm 的偏差，其稀疏的时间分辨率导致刻画 ZHD 的周日变化，且无法精细反演 ZHD 的短时扰动变化，进而会引起 PWV 反演结果的误差。由此可以说明，HDTM 模型可以为海洋水汽反演应用提供高质量的 ZHD 预报，即使在动态平台上也具有高精度、高时空分辨率和高时效的优势，有效支持面向海洋的高精度 GNSS 水汽监测应用。

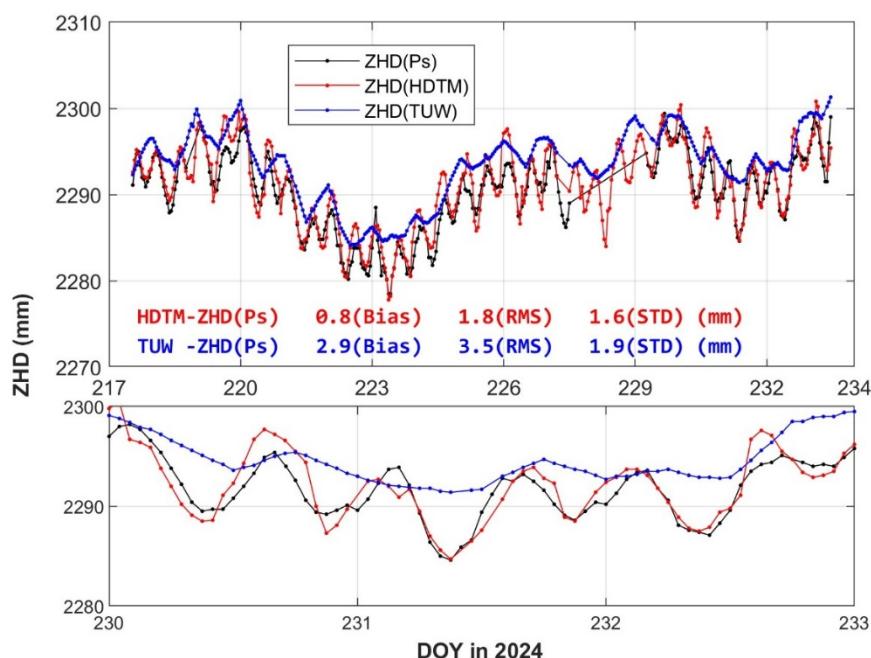


图 5-16 HDTM 模型和 TUW 产品提供的海洋船载动态平台的 ZHD 的比较

注：以船舶气象设备实测气压转换的 ZHD 为参考

为进一步验证基于 HDTM 模型和船载低成本终端的水汽反演方法的可靠性，本节分别利用 HDTM 模型和实测气象参数进行 GNSS 水汽反演，如图 5-17 所示。从图中可以看出，与基于实测气象参数的结果相比，基于 HDTM 模型反演的 GNSS-PWV 能够清晰反映航行过程的水汽变化，在 PWV 数值上主要表现为高估，其偏差和均方根误差均为 0.8 mm。另外，任务船在 8 月 21 日 12 时许靠抵海口港，基于 HDTM 模型反演的 PWV 与海口探空站（59758）的积分 PWV 基本相近，差异在 1.0 mm 左右，进一步证明联合 HDTM 模型和低成本 GNSS 终端可以在海洋水汽反演实现高精度应用。

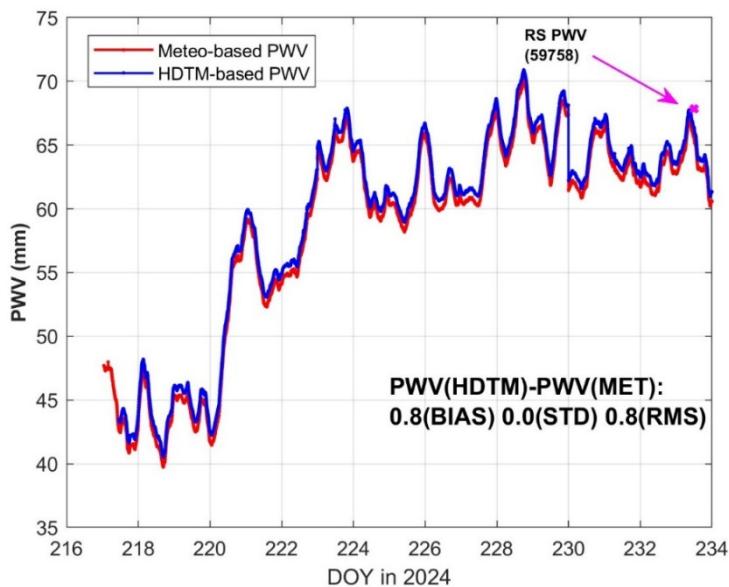


图 5-17 基于 HDTM 模型的 GNSS 水汽反演方法在北部湾航试中的表现

综上,本节主要提出了一种针对船载动态终端的低成本高时效 GNSS 水汽监测方法,初步探究了其在海洋水汽获取上的应用表现。实验结果表明低成本北斗/GNSS 终端获取的 ZTD 与测地型终端的 ZTD 精度基本相当,平均偏差和均方根误差分别可达到-0.5 和 4.5 mm。相较于测地型终端,低成本北斗/GNSS 终端具有明显的成本效益优势,且精度满足水汽反演对 ZTD 估计质量的要求。另外,基于 HDTM 模型的船载低成本终端水汽反演方法在航海任务中可以有效解决低成本终端在水汽反演中需要依赖实测气象参数的问题,在不引入明显 PWV 误差(约 0.8 mm)的前提下,可以显著降低硬件成本(GNSS 接收机和天线硬件与气象终端),实现与测地型终端基本相当的水汽反演质量。因此,本方法具有工作灵活、精度可靠和使用简便的特点,可以简易部署在渔船/商船上,为海洋水汽获取提供简单高效的低成本解决方案。

5.4 一种低成本且无温压观测依赖的实时 GNSS 水汽监测方案

鉴于 HDTM 模型可以提供预报的 ZHD 和 Tm,其在水汽反演中表现出显著的高时间分辨率优势,且在极端天气中也具有稳定可靠的表现,有助于改善地基 GNSS 水汽监测技术高时效性应用的技术瓶颈。而实现水汽密集化观测是当前地基 GNSS 水汽监测技术的另一发展重点。但是现有水汽监测网络中的水汽监测终端造价昂贵,维护成本较高,在短期内不会显著增加。

当前,高精度北斗/GNSS 终端的硬件成本不断降低和实时 GNSS 数据处理技术的发展,联合利用 HDTM 模型和低成本终端来加密现有水汽监测网络,可

以为大气水汽高时空分辨率和高时效观测提供了新机遇(Marut et al., 2022)。本节聚焦低成本北斗/GNSS 终端的实时水汽方法, 提出了一种低成本且无温压观测依赖的实时 GNSS 水汽监测方案。相比传统利用测地型接收机的观测技术, 新方案在保持高精度的同时, 将终端硬件成本降低了约 99%, 还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。因此, 新方法改善了当前水汽监测网络的可拓展性, 为在当前水汽监测网络中应用低成本终端提供了解决方案。

5.4.1 低成本北斗/GNSS 终端和工作流程

低成本北斗/GNSS 终端的 GNSS 模组选用和芯星通公司的 UM980 高精度模块, 具备较好的跟踪性能和观测值质量, 天线采用司南导航 AT360。单台接收机和天线的终端成本约为 1500 元人民币, 仅为我国现有 GNSS 水汽监测网络终端成本的百分之一。基于上述高精度模块 UM980, 基于嵌入式开发完成核心算法设计与实现, 终端能够通过获取实时数据流和预报资料来进行实时 ZTD 计算和实时水汽反演, 能够输出 5 分钟间隔的水汽产品并自动上报至远程服务端。本文提出的基于低成本接收机的 ZTD 计算和实时 PWV 反演方法全流程如图 5-18 所示, 采用的实时处理策略如表 5-3 所示。

表 5-3 低成本北斗终端中实时 PPP 处理策略

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/函数模型	卡尔曼滤波 (forwards) / 无电离层组合 伪距和相位噪声方差分别为 0.6m 和 0.003m.
加权策略	高 度 角 度 加 权 : $\sigma = \sigma_0 \sqrt{1 + \cos^8 e}$ (Hadas et al., 2020)
截止高度角	5°
电离层延迟	无电离层组合消除
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
映射函数	GMF 模型
相对论、地球自转、相位绕转	模型改正

实验结果在真实环境中利用北斗/GPS 终端实时运行 PPP 软件获得的。BDS/GPS 双频观测值和广播星历通过串口通信协议实时获取。实时 PPP 软件实时解码接收机输出的二进制电文和 NTRIP Caster 的 RTCM 电文，获取 BDS/GNSS 卫星观测值、混合广播星历和精密产品改正数。服务端基于 NCEP-GFS 预报资料计算未来 6 小时站点的 ZHD 和 Tm，并推送至低成本终端。实时 PPP 软件根据当前时间对预报产品进行线性插值，并结合实时 ZTD 估计，反演实时 GNSS PWV。

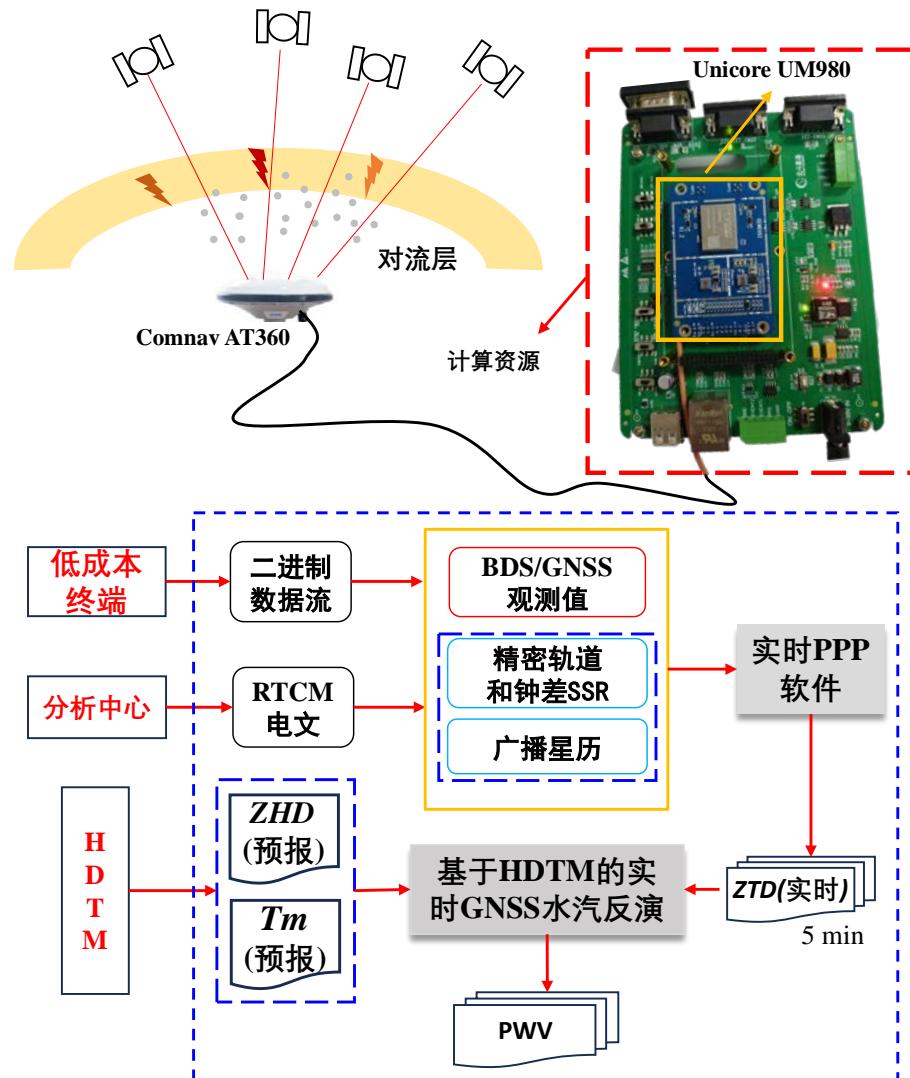


图 5-18 联合低成本北斗终端和 HDTM 模型的实时 ZTD/PWV 计算流程图

5.4.2 实验数据及资料

GNSS ZTD 数据

为验证基于 HDTM 模型的实时水汽反演方法获取实时水汽的长期性能，首先本节基于自研实时精密单点定位软件处理原始观测数据流并实时计算对流层总延迟；然后利用基于 HDTM 模型获取 GNSS 站点处对流层静力学延迟和大气

加权平均温度，进而实时反演大气可降水量。其中，ZTD 和 PWV 的间隔为 5 分钟。实验时间跨度从 2024 年 9 月 24 日至 11 月 14 日，共计 50 天。同时，本节利用加拿大自然资源局提供的基于 PPP-AR 的 GNSS 在线后处理服务 CSRS-PPP 计算了存档的观测数据，获得后处理的 ZTD 产品，时间间隔在 30 秒，以此检验基于实时 PPP 软件计算的 ZTD 产品。

气象数据和探空数据

武汉气象观测站(编号 57494)为国家基本气象站，每天定期自动记录地表温度、湿度、压力等气象参数并释放探空气球来采集大气廓线数据。低成本 GNSS 终端位于观测场内，与上述气象传感器并址。武汉气象站采集的气象参数是从中国气象数据网 (<https://data.cma.cn/>) 下载获取的，时间间隔为 3 小时。探空站大气廓线数据是从美国怀俄明州气象探空数据存档网站 (<https://weather.uwyo.edu/upperair/bufrraob.shtml>) 获取的。本节利用探空廓线数据积分得到站点高度的 PWV，间隔为 12 小时，记为 RS-PWV。同时，本节利用 GNSS-ZTD 和实测气压、温度数据也反演了 PWV，间隔为 3 小时，记为 MET-PWV。以上两类 PWV 产品用于比较和检核基于新方法反演的水汽产品。另外，为比较扰动天气和平静天气下 GNSS 水汽反演方法的精度表现，本节还从中国气象数据网获取了同期的降雨数据，这是由自动雨量计采集逐三小时累计降水量。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 5-19 所示。

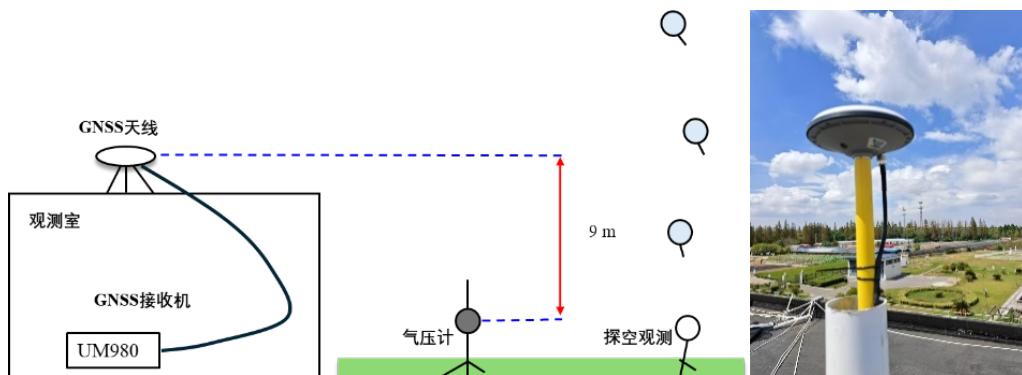


图 5-19 观测终端的相对位置示意图

5.4.3 结果分析

对流层延迟的计算精度

本节采用实时 PPP 软件对低成本观测值进行处理得到的 ZTD 产品，记为 RT-ZTD。利用加拿大 CSRS-PPP 服务计算的后处理的 ZTD，记为 Reference(PPP-AR)-ZTD。值得说明的是，CSRS 利用 PPP-AR 处理的低成本观测值，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 CSRS-ZTD

为参考，评估分析了基于低成本观测值的实时 GNSS ZTD 计算结果。

图 5-20 (a) 显示了实时 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。图中可以看出 RT-ZTD 与 Reference(PPP-AR)-ZTD 结果在总体上有较好地一致性，反映了基于低成本观测值的实时 ZTD 计算算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上具备长期稳定性和可靠性，具备开展长期水汽业务监测的潜力。

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，以后处理结果为参考，本节分别展示实时 ZTD 结果在 DOY 277-281 和 DOY 295.5-296.5 两个时间段的变化，如图 5-20 (b) 和图 5-20 (c)。在图 5-20 (b) 中，ZTD 在这期间内从 2378 mm 抬升到 2637 mm，变化了约 260 mm。图中可见，实时计算得到 RT-ZTD 依旧与后处理结果基本一致，没有发生明显的偏差和剧烈抖动。在图 5-20 (c) 中，ZTD 也发生了剧烈波动，24 小时内下降了 210 mm，但是实时计算的 RT-ZTD 与后处理的 Reference(PPP-AR)-ZTD 的变化相同。这充分说明了基于低成本观测值计算的实时 ZTD 具有较高的精度质量，并且在对流层发生快速变化时仍能较好地准确刻画 ZTD。

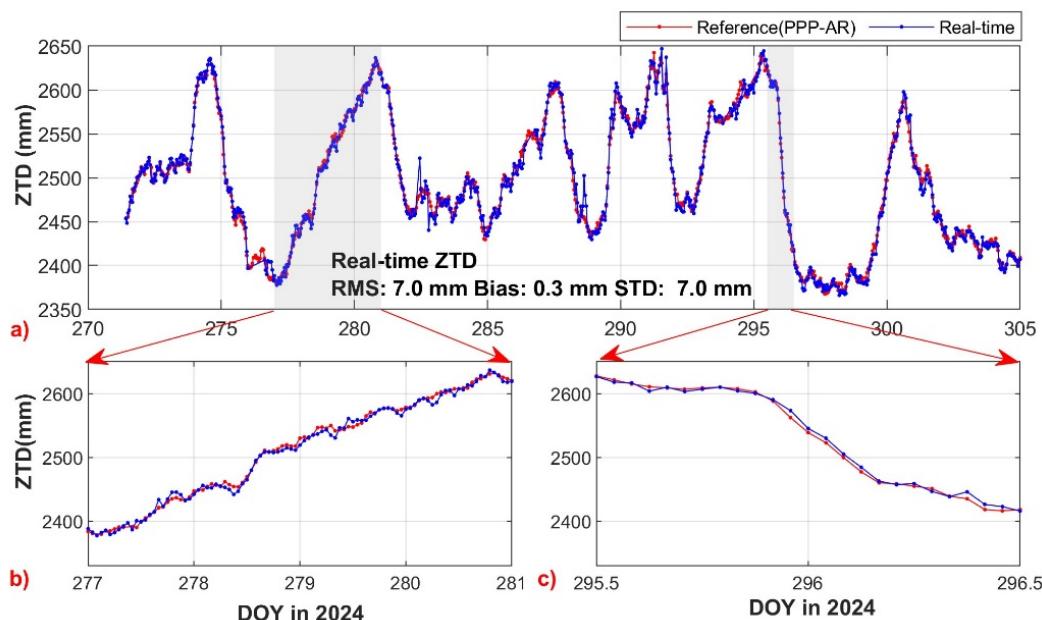


图 5-20 利用低成本北斗终端计算实时 ZTD 序列与参考序列

ZHD 和 Tm 的质量分析

为分析 HDTM 模型提供的 ZHD 的质量，本节利用实测气压观测数据（3 小时间隔）对 ZHD 预报结果进行比较，如图 5-21 所示。图中红线代表 HDTM(NCEP-

GFS) 预报资料提供的 GNSS 站点处 ZHD 序列, 蓝线代表利用实测气压参数归算到 GNSS 站点高度处的 ZHD, 青线代表利用经验模型 GPT3 计算的 ZHD。

从图中可以看出, HDTM 模型的站点 ZHD 可以与实测气压参数获得的 ZHD 高度一致, 两者差异的偏差在 -0.1 mm , 标准差和均方根误差分别为 1.0 和 1.1 mm ; GPT3 提供的 ZHD 均方根误差为 11.0 mm 。在表现 ZHD 日变化上, HDTM 模型站点产品可以较为准确的反映 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 相差可到 20 mm 。这说明 GPT3 提供的 ZHD 精度略低, 会给实时 PWV 反演引入约 $2\text{-}3 \text{ mm}$ 的误差。相较 GPT3 模型, HDTM (NCEP-GFS) 预报资料提供的 ZHD 在均方根误差上减小约 10mm , 显著降低了给实时 PWV 反演引入的 ZHD 误差。

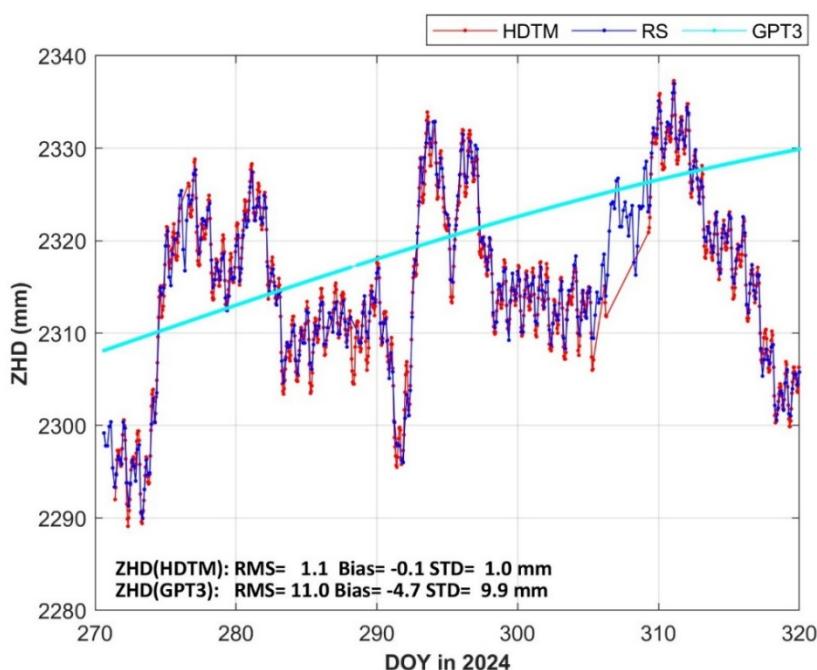


图 5-21 用 HDTM 和 GPT3 模型计算的实时 ZHD 与参考值的对比

图 5-22 展示了 HDTM (NCEP-GFS) 预报资料, GPT3 模型和探空数据积分三种方式得到的 Tm 时间序列。以探空廓线数据经数值积分得到的 Tm (RS-Tm) 为参考, HDTM 的 Tm 与 RS-Tm 差异的均方根误差为 1.8 K ; 而 GPT3 模型提供的 Tm, 其均方根误差为 5.3 K 。在表现 Tm 日变化上, 间隔 12 小时 的 RS-Tm 存在明显不足, 预报资料却能够较好地反映 Tm 变化。而 GPT3 因为在建模过程中未考虑日周期因素, 无法准确表达 Tm 的日变化, 会造成约 $2\text{-}4 \text{ K}$ 的偏差。因此, HDTM 模型提供的 Tm 参数, 相较 GPT3 在均方根误差上提升了 66% , 具有精度更高、实时性更好和能够反映参数日变化等优点, 在实时水汽反演中有较好的应用潜力。

综上, HDTM 模型提供的 ZHD 和 Tm 与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, 满足水汽反演对两个辅助参数的精度要求。相较于经验模型, HDTM 模型提供 ZHD 和 Tm 更为精确, 减小了辅助参数给 PWV 反演结果引入的误差, 并适用于极端天气等场景。因此, 基于 HDTM 模型的对流层延迟参数获取可以有效解决实时 GNSS 水汽反演的气象参数依赖问题, 支持无气象传感器的 GNSS 台站开展水汽监测应用。

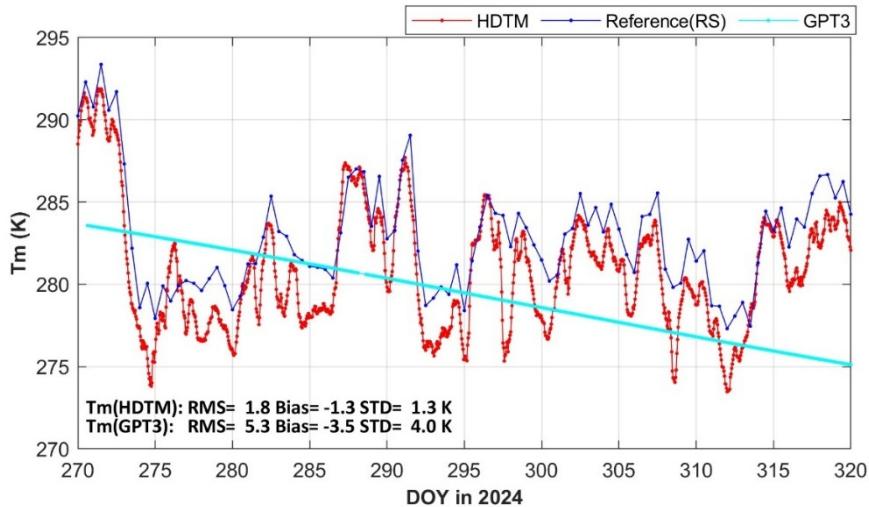


图 5-22 用 HDTM 和 GPT3 模型计算的 Tm 和参考值的对比

GNSS 水汽反演质量分析

为了详细说明联合低成本北斗/GNSS 终端和 HDTM 模型的实时 GNSS 水汽反演方法的优势, 图 5-23 分别是基于 HDTM 模型的实时水汽反演方法获得的 PWV (HDTM+GNSS) (绿色)、探空数据得到的 PWV(RS) (红色)和基于实测气象参数获得的 PWV(MET+GNSS) (紫色)。RS-PWV 作为评估 GNSS-PWV 的可靠参考, MET-PWV 用于代表传统实时水汽方法的 PWV 反演结果。

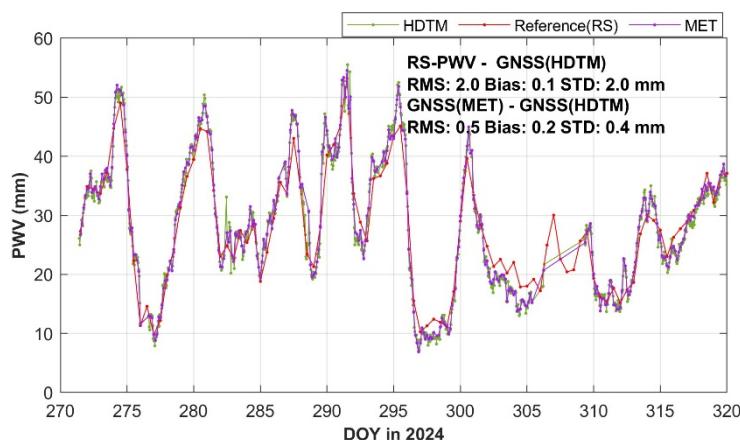


图 5-23 联合低成本北斗终端与 HDTM 模型反演的实时 PWV 与参考值的对比

注：图中绿色代表基于 HDTM 模型的水汽反演结果，红色代表探空廓线计算的结果，紫色是基于实测气象参数的水汽反演结果

从图中可以看出，以无线电探空结果作为参考，基于 HDTM 模型和低成本观测值实时反演的 PWV (HDTM+GNSS) 在总体趋势上基本一致，其偏差在 0.1 mm，均方根误差和标准差均在 2.0 mm 左右。在连续 50 天的实时连续运行中，实时反演结果稳定可靠。以 PWV(MET+GNSS) 为参考，基于 HDTM 模型反演得到的实时 PWV 的均方根误差约为 0.5 mm，在水汽峰值和谷值区域，两者结果也基本一致，说明 HDTM 模型提供的辅助参数可以作为实测气象参数的高质量替代，不会引入明显的 PWV 误差。

以上结果说明本文提出的联合方案可以服务于快速水汽反演，实现均方根误差在 2 mm 以内的实时 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 HDTM 预报资料让实时水汽反演摆脱了气象传感器依赖，既显著降低水汽监测站的硬件成本，又简化了水汽反演过程。

图 5-24 反映了 PWV 变化和实测降雨量的关系，其中绿线代表基于 HDTM 模型的 GNSS PWV 反演结果，红线代表基于探空廓线数据计算的 PWV，而紫线是利用实测气象反演的 GNSS PWV 结果，红色柱状图代表同期三小时累计降水量。在 DOY 291-292 期间，武汉发生一次集中降雨，PWV 会在降雨前快速抬升和蓄积，在降水事件发生后，水汽又会快速降低。PWV(HDTM+GNSS) 相较 PWV(RS) 和 PWV(MET+GNSS) 可以提供更高时间分辨率的反演结果，能够有效反映水汽的细节性变化。而基于探空廓线数据 (12 小时间隔) 和气象观测 (3 小时间隔) 的 PWV 在捕获水汽峰值和快速变化存在一定的局限性。

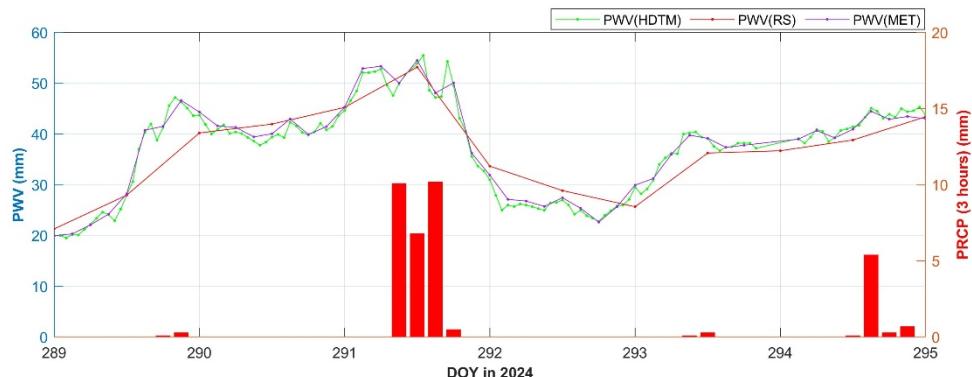


图 5-24 在降水场景下的反演的实时 GNSS PWV 序列

值得强调的是，这种对水汽快速变化的响应是由一台其硬件造价成本在 1500 元的 GNSS 接收机捕获的。由此可见，本文提出的水汽监测方法可以便利地将低成本 GNSS 接收机转为高精度水汽监测终端，既能减小硬件成本和维护负担，又能灵敏地实时监测降水事件中的水汽变化。

相较于平静天气，降水事件中水汽会发生快速波动，引起 PWV 快速抬升和下降。表 5-4 统计有无降水事件发生场景下的实时 PWV 反演精度。以基于实测气象参数反演的 PWV 为参考，联合基于 HDTM 模型的水汽反演方法和低成本终端得到的 PWV 的偏差在 0.19 mm，其均方根误差要轻微增加，但是与平静天气的水汽反演结果基本相当。综合来看，降水事件不会明显影响实时水汽反演质量，既充分说明了 HDTM 模型提供的 ZHD 和 Tm 辅助参数的准确性，也证明了基于低成本接收机的实时反演方法的可靠性，具备监测强降雨等天气中快速水汽变化的能力。

综上，低成本 GNSS 终端具有实时反演高精度 PWV 的可行性和潜力。相较于传统的测地型接收机终端，低成本 GNSS 终端具有成本低廉的优势，更有利于对现有观测网络的密集化补充。基于 HDTM 模型的实时水汽反演方法，可以在摆脱实测气象参数依赖的前提下提供高时效性的精确 PWV 结果，进一步改进了地基监测网络对低成本 GNSS 接收机的兼容性。

表 5-4 在有无降水发生场景下实时反演 PWV 的质量统计

场景	Bias (mm)	STD (mm)	RMS (mm)
有降水	- 0.19	0.49	0.52
无降水	0.19	0.37	0.42

5.5 本章小结

本章从“天气响应”、“海洋环境”和“硬件平台”等三方面发展和检验复杂环境下新型低成本高时效 GNSS 水汽监测方法。首先，本文提出了基于 HDTM 模型的实时水汽反演方法。为研究水汽在恶劣天气下的响应规律，将新的水汽方法应用在武汉强降雨和台风“三巴”两次天气事件中，并初步检验了新方法在恶劣天气中稳定性能和时间分辨率优势。其次，针对海洋水汽获取困难的问题，探究了低成本北斗/GNSS 终端在海洋浮标和船载动态平台上获取精确对流层延迟的可行性，还提出并验证了一种低成本高时效的海洋水汽监测方法，为海洋水汽资料的高时效获取提供了新的研究思路和参考。最后，针对提升水汽监测网络时空分辨率和时效性的需求，提出并实现了一种低成本且无需温压观测依赖的实时 GNSS 水汽监测方案，并将其应用于长期实时水汽监测业务并取得较好的应用效果。

第 6 章 总结与展望

本章系统梳理和总结了本文的研究内容、结论及贡献，并为后续研究工作做出初步的展望。

6.1 本文工作总结

大气水汽是表征极端天气事件和气候变化的重要参数。实现高精度和高时空分辨率的水汽连续监测，对于精准预测各类灾害性天气事件与研究气候变化具有显著意义。地基 GNSS 是一种低成本、高精度和全天候的水汽观测手段，随着 IGS-RTS 的推动，可以为临近极端天气预报预警提供高时效水汽资料。当前，低成本北斗/GNSS 终端成本优势凸显，可以显著降低监测网络进一步扩充的建设和维护成本，有望建立低成本与测地型终端相互兼容的新型水汽观测网络和兼具高时效、高精度和高时空分辨率的水汽监测服务新模式。

针对现有研究面临的技术瓶颈与现实需求，本文聚焦以低成本北斗/GNSS 终端为基础的 GNSS 对流层估计、水汽反演辅助参数模型和实时水汽反演方法和应用等方面，系统性地开展了以下四个方面的研究工作：

1. 从“天线 PCV 处理”和“实时高精度”两方面开展了低成本北斗/GNSS 终端的实时 ZTD 估计方法研究：提出了基于超短基线的相对 PCV 估计方法，探究了低成本天线 PCV 的特性及其对 ZTD 估计的影响，同时分析低成本设备的实时 ZTD 估计质量并探究了其在扰动天气下的表现。

针对低成本天线 PCV 难以获取和订正的问题，本文首先分析了 PCV 对 ZTD 解算的影响并采用超短基线相对定位法提取低成本天线的 PCV 改正值。通过改正 JFNG、JFTA 和 JFSP 三个站的天线 PCV，后处理 ZTD 的均方根误差分别减小了 9.3 mm、2.1 mm 和 0.7 mm，相对于改正前分别降低了 66.2%、20.8% 和 11.1%，充分说明正确改正 PCV 可以显著提高 ZTD 估计精度以及与参考结果一致性。低成本天线的 PCV 主要表现为随高度角变化，可以采用简化的高度角 PCV 模型进行改正。其次，本文对低成本终端的实时 ZTD 估计方法进行研究，详细分析了后处理和实时模式下的 ZTD 估计特征，探讨了其在不同水汽活跃水平下的精度表现。结果表明，低成本终端的 ZTD 估计与测地型终端的精度相当，在事后和实时模式下精度分别为 6.3 mm 和 10.0 mm。在季节差异上，冬（冷）季对流层变化平稳，夏（暖）季水汽活动活跃，冬季的实时估计精度要高于夏季。此外，本文以武汉市一次强降水事件为例，进一步验证了低成本终端在扰动天气条件下的实时对流层估计性能。结果表明，在小时雨强超过 33 mm/h 的强降雨中，低成本终端仍能获得高质量的 ZTD 估计，能够清晰反映强降水引起的对流层扰动变

化，初步证明其在极端天气对流层监测中的可靠性和应用潜力。

该研究为利用低成本北斗/GNSS 设备实时获取对流层延迟进而反演为水汽信息提供了参考。基于上述研究成果撰写的学术论文 “On the real-time tropospheric delay estimates using low-cost GNSS receivers and antennas” 已发表于 GPS Solutions 上。有关低成本设备观测值质量分析等前置性研究工作亦整理为论文 “On low-cost GNSS observables under different grades of antennas: Receiver-related biases and RTK results” 发表在 Measurement 上。

2. 从“模型构建”、“精度分析”和“实时服务”三方面开展了实时水汽反演辅助参数模型构建研究：研发了一种基于数值天气预报的对流层水汽反演辅助参数模型（HDTM），系统分析了 HDTM 模型在中国区域的参数特征和时空分辨率优势，初步建立了一种适用于实时播发的 HDTM 模型服务方法。

为实现高精度 ZHD 和 Tm 的高时效获取，本文基于数值天气预报模式研发了实时水汽反演辅助参数模型（HDTM）并建立了对应的应用方法。通过多源数据（ERA5、探空数据和实测气压）的验证，本文评估了 HDTM 模型在中国区域的基本表现：HDTM 模型能够提供高时效的站点位置 ZHD 和 Tm 参数，精度分别在 3.2 mm 和 1.5 K，与实测气象参数精度基本相当。相较于 GPT3 和 Bevis 模型以及 TUW 产品，HDTM 模型具备高时效、高时间分辨率和高精度的优势，能够清晰刻画 ZHD 和 Tm 的周日变化和短期扰动变化，均方根误差明显减小。此外，利用 953 个 GNSS/MET 测站的水汽产品证明 HDTM 模型可以在引入的 PWV 反演误差小于 2.1 mm 的前提下使得 GNSS 水汽反演过程摆脱气象参数依赖，并取得同传统方法相一致的 PWV 结果。为促进 HDTM 模型与现有实时 GNSS 数据处理模式相互兼容，在基于 HTTP 和 SFTP 等网络协议实现数据传输基础上，本文提出了适用实时播发的 HDTM 实时流服务并编制了兼具完备性、可扩展性和私密性的 HDTM 格网和站点参数编码规则，显著提升了 HDTM 模型在现有 GNSS 实时数据处理中的适用性。上述研究解决了海量 GNSS 台站在没有实测气象的情况下获取高时效辅助参数（ZHD 和 Tm）的问题，使得其可以独立反演实时水汽，有力地支持高时空分辨率水汽观测。

该研究为实时水汽反演提供高时效和高时空分辨率的 ZHD 和 Tm 参数，摆脱实测气象参数的依赖，可以有效兼容低成本设备开展实时水汽反演。基于相关研究成果撰写的学术论文 “HDTM: A novel model providing hydrostatic delay and weighted mean temperature for real-time GNSS precipitable water vapor retrieval” 已发表在 “IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (IEEE TGRS)” 上。

3. 提出了一种基于 HDTM 模型且无实测气象参数依赖的实时 GNSS 水汽反演方法并且探究了其在极端天气中的水汽监测能力。

针对现有实时水汽反演方法需要依赖并址气象观测的问题，本文基于 HDTM 模型提出了一种无需实测气象参数的水汽监测方法，在保证高精度的同时摆脱实

测气象参数依赖，兼容海量地基 GNSS 测站且适用于低成本设备。以两次极端天气事件（武汉强降雨和台风“三巴”）为例，本文检验了提出的新的水汽监测方法在极端天气发生、发展和消灭全过程中的表现，并探究了其与传统方法的优势。结果表明，新方法在刻画水汽含量变化方面具有高时间分辨率和高精度的优势。其中，扰动天气下 PWV 反演误差在 1.0 mm 左右，可以灵敏探测水汽蓄积的抬升信号和阶段，精确捕获水汽峰值时刻的信息、刻画水汽在降水期间发生显著的“高位波动”现象和记录降水后水汽“持续下降、降中有升”的抖动下降过程。综上，本文提出的水汽反演方法能够有效记录水汽从蓄积到衰减全过程的重要特征和关键节点，为常规天气预报与极端灾害天气预警提供可靠的观测资料。

该研究为开展极端天气水汽监测以及强降水预报等研究应用提供研究参考，相关研究工作是前述 HDTM 论文论证的重要部分，其余研究结果亦在整理中。

4. 提出了适用于海洋动态观测的低成本高时效水汽监测方法，并探究了其在海洋动态平台上的水汽监测潜力，还开发了低成本高时效水汽监测终端，并应用于实时水汽监测。

针对海洋水汽探测困难的问题，本文发挥北斗系统在恶劣海况环境中的应用优势，提出了联合低成本终端和 HDTM 模型来获取海洋水汽，并利用低成本浮标和船载平台等海洋动态观测平台采集的多场景观测数据进行检验。结果表明 HDTM 模型可以为海洋船载动态平台提供高时效 ZHD，经实测气压检验的精度为 1.8 mm。另外，低成本方案在浮标和船载平台获得的 ZTD 精度分别为 21.9 mm 和 6.0 mm，而 PWV 精度分别为 1.6 mm 和 0.8 mm。针对高时效水汽监测终端匮乏的问题，本文利用北斗/GNSS 模组并结合提出的实时水汽反演方法，研制了一套低成本实时水汽监测终端，成本仅为当前测地型终端硬件成本的 1%，能够获得分钟级高时效水汽产品。通过将低成本终端布设在武汉气象站观测场进行长期实时业务验证，长达 50 天的实验结果表明：基于新方法和低成本设备实时反演的 PWV 与并址探空结果基本一致，其偏差和均方根误差分别约为 0.1 mm 和 2.0 mm。以上研究充分证明低成本水汽监测终端在多场景和多模式水汽资料获取上的应用潜力，为海洋等复杂环境下的水汽资料获取提供了新的方法和思路。

该研究为低成本 GNSS 水汽监测设备研制与应用提供新颖的方案设计和丰富的应用场景，有助于拓展低成本水汽监测设备的落地应用。基于上述成果以通讯作者撰写的论文“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”已被《导航定位与授时》录用。

综上，上述研究工作聚焦于低成本水汽反演方法及应用研究，以“误差改正—参数精化—方法研发—终端研制”为技术路径，在硬件终端上，解决了“低成本天线未知 PCV 难以估计及改正”、“实时水汽反演辅助参数难获取”以及“低成本观测网水汽产品与现有模式难兼容”等问题；在水汽辅助参数获取上，研发的 HDTM 模型解决了 GNSS 站点气象参数高时效获取的问题；在水汽反演方法

上, 提出了基于 HDTM 模型的实时水汽反演方法, 兼具适用技术独立、应用简便, 适用低成本终端且在极端天气中性能可靠等优势, 革新了实时水汽监测模式; 在水汽应用场景上, 开展新水汽监测方法在多场景和多模式的应用研究, 提出了适用于海洋动态观测的低成本高时效水汽监测方法并初步验证了新方法和低成本终端在海洋环境和极端天气中的应用潜力。上述创新可以为后续构建高时空分辨率、高时效和高精度水汽监测模式提供实用的模型、方法和创新思路。

6.2 下一步工作设想

本文围绕低成本北斗/GNSS 终端水汽反演理论和关键技术展开了深入研究, 取得的研究成果可以为后续研究提供相关终端平台和模型方法。因此, 开展基于低成本北斗/GNSS 观测网络的高时空分辨率、高时效和高精度水汽监测等相关研究是下一步发展方向。为此, 结合本文研究内容与当前研究现状, 拟在以下方面继续开展研究:

在实时水汽反演方法和模型方面, 本文研发的 HDTM 模型在实时水汽反演中展现高精度和高时效的特点, 后续主要从模型订正、应用方法和服务模式等三方面进行拓展: ①本文利用 ECMWF-IFS 和 NCEP-GFS 分别构建 HDTM 模型并发布产品, 后续可以对两个模型进行融合, 并利用实时(历史)地表气象观测和廓线观测(如 RS、掩星)结合机器学习模型等人工智能新技术进行订正和降尺度模型构建, 提高模型的应用精度、时空分辨率和预报长度; ②在 HDTM 模型的应用方法上, 研究分析其在大高差复杂地形、海洋和近低空等场景下的误差特征, 优化 HDTM 模型参数的高度归算方法, 提出并建立时变高度改正模型以确保大气扰动下的模型精度; ③在服务模式上, 在现有实时流播发的基础上, 开展实时模型验证和优化研究, 申请实时流挂载点建立稳定长期的实时服务。

在低成本水汽方法和终端研制方面, 可以从动态水汽反演方法、海洋实时水汽监测方法及终端研制和基于低成本观测网的水汽监测模式等方面开展研究: ①动态水汽反演, 低成本终端具有容易便捷和成本低廉的优势, 针对强降雨等强对流天气中水汽发生剧烈波动的场景, 开展基于无人机/车载平台的动态(二维/三维)水汽监测方法研究, 提升和改进固定网形在水汽监测的不足; ②面向海洋水汽资料难获取的难题, 结合北斗 PPP-B2b 和短报文的应用优势, 开展基于低成本北斗/GNSS 终端的自主实时水汽监测方法和模式研究, 研发浮标型低成本北斗/GNSS 终端, 为海洋水汽监测提供高时效和低成本的解决方案; ③结合 GNSS-IR 技术, 研究和研制土壤湿度(河水深度)和大气水汽一体化监测预警方法和终端, 服务于暴雨、洪涝和干旱等灾害事件的监测; ④开展低成本北斗/GNSS 观测网水汽监测模式研究, 重点解决低成本和测地型网络水汽产品统一的问题, 构建可拓展的实时水汽监测模式, 探讨基于混合监测网的二维/三维水汽反演方法。

在低成本实时水汽产品应用场景方面，可以从天气预报同化、极端天气水汽变化规律和水汽输运活动监测等方面开展研究：①开展低成本实时水汽产品的天气预报同化研究，研究分析低成本观测网数据对短临天气预报的影响；②开展基于低成本观测网的水汽监测方法研究，探究水汽输运活动（如大气河流、水汽通道，强对流）的高时空分辨率监测方法；③研究特殊天气事件（如焚风、强降雨和台风）中水汽分布和结构特征及其演变规律。

限于作者水平，文中如有错漏之处，敬请批评指正！

参考文献

- Aichinger-Rosenberger M, Wolf A, Senn C, et al. (2023). MPG-NET: A low-cost, multi-purpose GNSS co-location station network for environmental monitoring. *Measurement* [J], 216.
- Askne J, Nordius H (1987). Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Science* [J], 22: 379-386.
- Barindelli S, Realini E, Venuti G, et al. (2018). Detection of water vapor time variations associated with heavy rain in northern Italy by geodetic and low-cost GNSS receivers. *Earth, Planets and Space* [J], 70.
- Bernet L, Brockmann E, von Clarmann T, et al. (2020). Trends of atmospheric water vapour in Switzerland from ground-based radiometry, FTIR and GNSS data. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* [J], 2020: 1-39.
- Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [J], 97: 15787-15801.
- Black H D (1978). An easily implemented algorithm for the tropospheric range correction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* [J], 83: 1825-1828.
- Blewitt G, Hammond W, Kreemer C (2018). Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science. *Eos* [J], 99: e2020943118.
- Böhm J, Heinkelmann R, Schuh H (2007). Short note: a global model of pressure and temperature for geodetic applications. *Journal of Geodesy* [J], 81: 679-683.
- Böhm J, Möller G, Schindelegger M, et al. (2015). Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w). *GPS Solutions* [J], 19: 433-441.
- Böhm J, Niell A, Tregoning P, et al. (2006). Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters* [J], 33.
- Bonafoni S, Biondi R, Brenot H, et al. (2019). Radio occultation and ground-based GNSS products for observing, understanding and predicting extreme events: A review. *Atmospheric Research* [J], 230: 104624.
- Bosser P, Ancelin J, Métois M, et al. (2024). Evaluation of tropospheric estimates from CentipedeRTK, a collaborative network of low-cost GNSS stations. *GPS Solutions* [J], 28: 158.
- Bosser P, Bennini V, Bouasria M, et al. A low-cost GNSS buoy for water vapour monitoring over the Oceans[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts.2022:EGU22-1811.
- Braun J, Rocken C, Liljegren J (2003). Comparisons of line-of-sight water vapor observations using the global positioning system and a pointing microwave radiometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* [J], 20: 606-612.
- Chadwell C D, Bock Y (2001). Direct estimation of absolute precipitable water in oceanic regions by GPS tracking of a coastal buoy. *Geophysical Research Letters* [J], 28: 3701-3704.
- Chen B, Dai W, Liu Z, et al. (2018). Constructing a precipitable water vapor map from regional GNSS network observations without collocated meteorological data for weather forecasting. *Atmospheric Measurement Techniques* [J], 11: 5153-5166.
- Chen B, Yu W, Wang W, et al. (2021). A global assessment of precipitable water vapor derived from GNSS zenith tropospheric delays with ERA5, NCEP FNL, and

- NCEP GFS products. *Earth and Space Science* [J], 8: e2021EA001796.
- Chen G, Herring T (1997). Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* [J], 102: 20489-20502.
- Choi K K, Ray J, Griffiths J, et al. (2013). Evaluation of GPS orbit prediction strategies for the IGS Ultra-rapid products. *GPS Solutions* [J], 17: 403-412.
- Crocetti L, Schartner M, Zus F, et al. (2024). Global, spatially explicit modelling of zenith wet delay with XGBoost. *Journal of Geodesy* [J], 98: 23.
- Dach R, Brockmann E, Schaer S, et al. (2009). GNSS processing at CODE: status report. *Journal of Geodesy* [J], 83: 353-365.
- Dach R, Schär S, Arnold D, et al. (2024). CODE final product series for the IGS.
- Davis J, Elgered G, Niell A, et al. (1993). Ground - based measurement of gradients in the “wet” radio refractivity of air. *Radio Science* [J], 28: 1003-1018.
- Davis J, Herring T, Shapiro I, et al. (1985). Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science* [J], 20: 1593-1607.
- Dousa J, Elias M, Václavovic P, et al. (2018). A two-stage tropospheric correction model combining data from GNSS and numerical weather model. *GPS Solutions* [J], 22.
- Dousa J, Vaclavovic P (2014). Real-time zenith tropospheric delays in support of numerical weather prediction applications. *Advances in Space Research* [J], 53: 1347-1358.
- Duan J, Bevis M, Fang P, et al. (1996). GPS meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* [J], 35: 830-838.
- Emardson T R, Elgered G, Johansson J M (1998). Three months of continuous monitoring of atmospheric water vapor with a network of Global Positioning System receivers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [J], 103: 1807-1820.
- Fang P, Gendt G, Springer T, et al. (2001). IGS near real-time products and their applications. *GPS Solutions* [J], 4: 2-8.
- Fujita M, Kimura F, Yoneyama K, et al. (2008). Verification of precipitable water vapor estimated from shipborne GPS measurements. *Geophysical Research Letters* [J], 35.
- Guerova G, Jones J, Douša J, et al. (2016). Review of the state of the art and future prospects of the ground-based GNSS meteorology in Europe. *Atmospheric Measurement Techniques* [J], 9: 5385-5406.
- Hadas T, Hobiger T, Hordyniec P (2020). Considering different recent advancements in GNSS on real-time zenith troposphere estimates. *GPS Solutions* [J], 24.
- Hadas T, Teferle F N, Kazmierski K, et al. (2017). Optimum stochastic modeling for GNSS tropospheric delay estimation in real-time. *GPS Solutions* [J], 21: 1069-1081.
- Hagemann S, Bengtsson L, Gendt G (2003). On the determination of atmospheric water vapor from GPS measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [J], 108.
- Hamza V, Stopar B, Sterle O, et al. (2024). Observations and positioning quality of low-cost GNSS receivers: a review. *GPS Solutions* [J], 28.
- Held I M, Soden B J (2000). Water vapor feedback and global warming. *Annual Review of Energy and the Environment* [J], 25: 441-475.
- Herring T (1992). Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data.

- Proceedings of Refraction of Transatmospheric signals in Geodesy, eds. JC De Munck and TA Spoelstra, Netherlands Geodetic Commission Publications on Geodesy [J], 36.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* [J], 146: 1999-2049.
- Hopfield H S (1971). Tropospheric effect on electromagnetically measured range: Prediction from surface weather data. *Radio Science* [J], 6: 357-367.
- Huang L, Lan S, Zhu G, et al. (2023a). A global grid model for the estimation of zenith tropospheric delay considering the variations at different altitudes. *Geoscientific Model Development Discussions* [J], 2023: 1-18.
- Huang L, Liu L, Chen H, et al. (2019). An improved atmospheric weighted mean temperature model and its impact on GNSS precipitable water vapor estimates for China. *GPS Solutions* [J], 23: 51.
- Huang L, Liu Z, Peng H, et al. (2023b). A novel global grid model for atmospheric weighted mean temperature in real-time GNSS precipitable water vapor sounding. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* [J], 16: 3322-3335.
- Huang L, Peng H, Liu L, et al. (2021). GNSS precipitable water vapor retrieval with the aid of NWM data for China. *Earth and Space Science* [J], 8: e2020EA001550.
- Iwabuchi T, Rocken C, Lukes Z, et al. PPP and network true real-time 30 sec estimation of ZTD in dense and giant regional GPS network and the application of ZTD for nowcasting of heavy rainfall[C]//Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2006).2006:1902-1909.
- Jade S, Vijayan M (2008). GPS - based atmospheric precipitable water vapor estimation using meteorological parameters interpolated from NCEP global reanalysis data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [J], 113.
- Jones J, Guerova G, Douša J, et al. (2020). Advanced GNSS tropospheric products for monitoring severe weather events and climate. COST action ES1206 final action dissemination report [J]: 563.
- Karegar M A, Kusche J, Geremia - Nievinski F, et al. (2022). Raspberry Pi Reflector (RPR): A Low - Cost Water - Level Monitoring System Based on GNSS Interferometric Reflectometry. *Water Resources Research* [J], 58.
- Kiehl J T, Trenberth K E (1997). Earth's annual global mean energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* [J], 78: 197-208.
- Krietemeyer A, Ten Veldhuis M-c, Van der Marel H, et al. (2018a). Potential of Cost-Efficient Single Frequency GNSS Receivers for Water Vapor Monitoring. *Remote Sensing* [J], 10.
- Krietemeyer A, Ten Veldhuis M-c, Van der Marel H, et al. (2018b). Potential of Cost-Efficient Single Frequency GNSS Receivers for Water Vapor Monitoring. *Remote Sensing* [J], 10: 1493.
- Krietemeyer A, van der Marel H, ten Veldhuis M-c, et al. Improving the antenna performance for Zenith Tropospheric Delay estimations with consumer-grade antennas and a low-cost dual-frequency receiver[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts.2020:9663.
- Lagler K, Schindelegger M, Böhm J, et al. (2013). GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. *Geophysical Research Letters* [J], 40: 1069-1073.
- Landskron D, Böhm J (2018). VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of Geodesy* [J], 92: 349-360.

- Li H, Choy S, Wang X, et al. (2023a). Investigating the optimal spatial resolution for assimilating GNSS PWV into an NWP system to improve the accuracy of humidity field. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* [J], 16: 6876-6888.
- Li J, Li F, Liu L, et al. (2024). A Weighted Mean Temperature Forecast Model Based on Fused Data and Generalized Regression Neural Network and Its Impact on GNSS-based Precipitable Water Vapor Estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* [J].
- Li L, Wu S, Zhang K, et al. (2021). A new zenith hydrostatic delay model for real-time retrievals of GNSS-PWV. *Atmospheric Measurement Techniques* [J], 14: 6379-6394.
- Li L, Yuan Y, Zhang P (2023b). On low-cost GNSS observables under different grades of antennas: Receiver-related biases and RTK results. *Measurement* [J], 214: 112771.
- Li L, Zhang H, Yuan Y, et al. (2025). HDTM: A Novel Model Providing Hydrostatic Delay and Weighted Mean Temperature for Real-Time GNSS Precipitable Water Vapor Retrieval. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* [J], 63: 1-11.
- Li Q, Yuan L, Chen P, et al. (2020). Global grid-based T m model with vertical adjustment for GNSS precipitable water retrieval. *GPS Solutions* [J], 24: 73.
- Liang H, Cao Y, Wan X, et al. (2015). Meteorological applications of precipitable water vapor measurements retrieved by the national GNSS network of China. *Geodesy and Geodynamics* [J], 6: 135-142.
- Liu M, Lou Y, Zhang W, et al. (2025). Improving forecast of “21.7” Henan extreme heavy rain by assimilating high spatial resolution GNSS ZTDs. *Atmospheric Research* [J], 315: 107880.
- Lu C, Zhong Y, Wu Z, et al. (2023). A tropospheric delay model to integrate ERA5 and GNSS reference network for mountainous areas: application to precise point positioning. *GPS Solutions* [J], 27.
- Mader G L (1999). GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey. *GPS Solutions* [J], 3: 50-58.
- Manzini N, Orcesi A, Thom C, et al. (2022). Performance analysis of low-cost GNSS stations for structural health monitoring of civil engineering structures. *Structure and Infrastructure Engineering* [J], 18: 595-611.
- Marini J W (1972). Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile. *Radio Science* [J], 7: 223-231.
- Marut G, Hadas T, Kaplon J, et al. (2022). Monitoring the Water Vapor Content at High Spatio-Temporal Resolution Using a Network of Low-Cost Multi-GNSS Receivers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* [J], 60: 1-14.
- Mateus P, Catalão J, Mendes V B, et al. (2020). An ERA5-based hourly global pressure and temperature (HGPT) model. *Remote Sensing* [J], 12: 1098.
- Moran J M. Weather studies: introduction to atmospheric science[C]//American Meteorological Society Boston, Massachusetts,2009
- Niell A E (1996). Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* [J], 101: 3227-3246.
- Nilsson T, Böhm J, Wijaya D D, et al. Path delays in the neutral atmosphere[C]//Atmospheric effects in space geodesy. Springer,2013:73-136.
- Ninsawat S, Chitsutti P, Chaudhary S, et al. (2022). Development of Near Real-Time PWV Estimation System for Monitoring the Meteorological Events in Thailand. *International Journal of Geoinformatics* [J], 18.

- Paziewski J (2021). Multi-constellation single-frequency ionospheric-free precise point positioning with low-cost receivers. *GPS Solutions* [J], 26.
- Poli P, Moll P, Rabier F, et al. (2007). Forecast impact studies of zenith total delay data from European near real - time GPS stations in Météo France 4DVAR. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [J], 112.
- Rapp R (1997). Use of potential coefficient models for geoid undulation determinations using a spherical harmonic representation of the height anomaly/geoid undulation difference. *Journal of Geodesy* [J], 71: 282-289.
- Rocken C, HOvE T V, Johnson J, et al. (1995). GPS/STORM—GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* [J], 12: 468-478.
- Rocken C, Ware R, Van Hove T, et al. (1993). Sensing atmospheric water vapor with the Global Positioning System. *Geophysical Research Letters* [J], 20: 2631-2634.
- Rohm W, Guzikowski J, Wilgan K, et al. (2019). 4DVAR assimilation of GNSS zenith path delays and precipitable water into a numerical weather prediction model WRF. *Atmospheric Measurement Techniques* [J], 12: 345-361.
- Rohm W, Yuan Y, Biadeglgne B, et al. (2014). Ground-based GNSS ZTD/IWV estimation system for numerical weather prediction in challenging weather conditions. *Atmospheric Research* [J], 138: 414-426.
- Rüeger J M. Refractive index formulae for radio waves[C]//Proceedings of the FIG XXII international congress, Washington, DC, USA.2002
- Saastamoinen J (1972). Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. 3rd International Symposium on the Use of Artificial Satellites for Geodesy [J]: 247-251.
- Seidel D J, Berger F H, Diamond H J, et al. (2009). Reference upper-air observations for climate: Rationale, progress, and plans. *Bulletin of the American Meteorological Society* [J], 90: 361-369.
- Smith J, Kast A, Geraschenko A, et al. (2024). Mapping the ionosphere with millions of phones. *Nature* [J], 635: 365-369.
- Stępiński K, Paziewski J (2022). On the quality of tropospheric estimates from low-cost GNSS receiver data processing. *Measurement* [J], 198.
- Sun J, Wu Z, Yin Z, et al. (2017). A simplified GNSS tropospheric delay model based on the nonlinear hypothesis. *GPS Solutions* [J], 21: 1735-1745.
- Teunissen P J, Montenbruck O. Springer handbook of global navigation satellite systems[C]//:Springer,2017
- Wang J, Pan F, An P, et al. (2023). Atmospheric water vapor transport between ocean and land under climate warming. *Journal of Climate* [J], 36: 5861-5880.
- Wang J, Wu Z, Semmling M, et al. (2019a). Retrieving precipitable water vapor from shipborne multi - GNSS observations. *Geophysical Research Letters* [J], 46: 5000-5008.
- Wang M, Wang J, Bock Y, et al. (2019b). Dynamic mapping of the movement of landfalling atmospheric rivers over southern California with GPS data. *Geophysical Research Letters* [J], 46: 3551-3559.
- Wang Z, Li Z, Wang L, et al. (2018). Assessment of multiple GNSS real-time SSR products from different analysis centers. *ISPRS International Journal of Geo-Information* [J], 7: 85.
- Wei J, Shu Y, Liu Y, et al. (2023). Retrieving Accurate Precipitable Water Vapor Based on GNSS Multi - Antenna PPP With an Ocean - Based Dynamic Experiment. *Geophysical Research Letters* [J], 50: e2023GL102982.
- Wilgan K, Dick G, Zus F, et al. (2023). Tropospheric parameters from multi-GNSS and

- numerical weather models: case study of severe precipitation and flooding in Germany in July 2021. *GPS Solutions* [J], 27.
- Wolfe D E, Gutman S I (2000). Developing an operational, surface-based, GPS, water vapor observing system for NOAA: Network design and results. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* [J], 17: 426-440.
- Wu J, Wang X, Wu W (2024). Evaluating antenna phase center variation effects on tropospheric delay retrieval using a low-cost dual-frequency GNSS receiver. *Measurement Science and Technology* [J], 36: 016309.
- Wu Z, Lu C, Zheng Y, et al. (2022). Evaluation of Shipborne GNSS Precipitable Water Vapor Over Global Oceans From 2014 to 2018. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* [J], 60: 1-15.
- Xu L, Zha J, Li M, et al. (2022). Estimation of ionospheric total electron content using GNSS observations derived from a smartphone. *GPS Solutions* [J], 26: 138.
- Yang F, Tallapragada V. Evaluation of retrospective and real-time NGGPS FV3GFS experiments for Q3FY18 beta implementation[C]//25th Conf. on Numerical Weather Prediction.2018
- Yang Y, Liu L, Li J, et al. (2021). Featured services and performance of BDS-3. *Science Bulletin* [J], 66: 2135-2143.
- Yao Y, Xu C, Shi J, et al. (2015). ITG: A new global GNSS tropospheric correction model. *Scientific Reports* [J], 5: 10273.
- Yao Y, Zhang B, Yue S, et al. (2013). Global empirical model for mapping zenith wet delays onto precipitable water. *Journal of Geodesy* [J], 87: 439-448.
- Yao Y, Zhu S, Yue S (2012). A globally applicable, season-specific model for estimating the weighted mean temperature of the atmosphere. *Journal of Geodesy* [J], 86: 1125-1135.
- Zhang H, Yuan Y, Li W (2022). Real-time wide-area precise tropospheric corrections (WAPTCs) jointly using GNSS and NWP forecasts for China. *Journal of Geodesy* [J], 96.
- Zhang H, Yuan Y, Li W, et al. (2021). Implementation of Ready-Made Hydrostatic Delay Products for Timely GPS Precipitable Water Vapor Retrieval Over Complex Topography: A Case Study in the Tibetan Plateau. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* [J], 14: 9462-9474.
- Zhang W, Zhang H, Liang H, et al. (2019). On the suitability of ERA5 in hourly GPS precipitable water vapor retrieval over China. *Journal of Geodesy* [J], 93: 1897-1909.
- Zhao C, Zhang B, Li W, et al. (2019). Simultaneous Retrieval of PWV and VTEC by Low - Cost Multi - GNSS Single - Frequency Receivers. *Earth and Space Science* [J], 6: 1694-1709.
- Zheng Y, Lu C, Wu Z, et al. (2022). Machine Learning - Based Model for Real - Time GNSS Precipitable Water Vapor Sensing. *Geophysical Research Letters* [J], 49: e2021GL096408.
- Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* [J], 102: 5005-5017.
- 陈俊如, 王云琳, 黄滢, et al. (2025). 2023 年台风“三巴”强降雨过程分析. 气象水文海洋仪器 [J], 42: 71-73+77.
- 葛玉龙 (2020). 多频多系统精密单点定位时间传递方法研究 [D]. 中国科学院大学 (中国科学院国家授时中心).
- 郭博峰, 陈玺元, 邝明伟, et al. 船载低成本 GNSS 海上水汽反演性能分析. 导航

- 定位与授时 [J]: 1-14.
- 何琦敏 (2023). 地基 GNSS 水汽反演及其在极端天气中的应用研究. 测绘学报 [J], 52: 1610.
- 黄聪, 郭杭 (2022). 基于 GPT3 模型的 ZTD 及 PWV 反演精度分析. 大地测量与地球动力学 [J], 42: 489-493.
- 黄良珂 (2020). 顾及时空因素的高精度全球对流层关键参量模型构建研究 [D]. 武汉大学.
- 刘腾 (2018). 多模 GNSS 非组合精客单点定位算法及其电离层应用研究 [D]. 中国科学院大学 (中国科学院测量与地球物理研究所) .
- 莫智翔 (2022). 实时高精度全球地基GNSS水汽监测关键参量模型构建研究 [D]. 桂林理工大学.
- 施闯, 周凌昊, 范磊, et al. (2022). 利用北斗/GNSS 观测数据分析 “21·7” 河南极端暴雨过程. 地球物理学报 [J], 65: 186-196.
- 宋淑丽 (2004). 地基 GPS 网对水汽三维分布的监测及其在气象学中的应用 [D]. 中国科学院研究生院 (中国科学院上海天文台) .
- 汪亮 (2019). 北斗/GNSS 大众实时精密定位理论与方法研究 [D]. 中国科学院大学 (中国科学院空天信息创新研究院) .
- 王明华 (2019). 基于 GPS PPP 的高时空分辨率 ZTD/PW 精度评估及气象学应用 [D]. 同济大学.
- 肖恭伟 (2021). 多系统GNSS实时精客单点定位研究及对流层延迟稀疏表示 [D]. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院.
- 谢劭峰, 王义杰, 黄良珂, et al. (2023). 中国区域大气加权平均温度垂直递减率格网模型. 测绘学报 [J], 52: 206-217.
- 徐黎, 袁运斌 (2020). 不同分析中心 GNSS 实时 SSR 产品研究与分析. 导航定位学报 [J], 8: 71-81.
- 杨元喜, 许扬胤, 李金龙, et al. (2018). 北斗三号系统进展及性能预测——试验验证数据分析. 中国科学:地球科学 [J], 48: 584-594.
- 姚宜斌, 赵庆志 (2022). GNSS 对流层水汽监测研究进展与展望. 测绘学报 [J], 51: 935-952.
- 余洋, 万蓉, 付志康, et al. 基于地基 GNSS 观测的典型暴雨过程水汽特征. 大地测量与地球动力学 [J]: 1-10.
- 袁运斌 (2002). 基于 GPS 的电离层监测及延迟改正理论与方法的研究 [D]. 中国科学院研究生院 (中国科学院测量与地球物理研究所) .
- 张宝成 (2013). GNSS 非差非组合精客单点定位的理论方法与应用研究 [D]. 中国科学院研究生院 (中国科学院测量与地球物理研究所) .
- 张红星 (2019). 基于多系统非组合精客单点定位的对流层延迟估计及建模与应用研究 [D]. 中国科学院大学 (中国科学院测量与地球物理研究所) .
- 张克非, 李浩博, 王晓明, et al. (2022). 地基 GNSS 大气水汽探测遥感研究进展和展望. 测绘学报 [J], 51: 1172-1191.
- 张卫星 (2016). 中国区域融合地基 GNSS 等多种资料水汽反演、变化分析及应用 [D]. 武汉大学.
- 张小红, 何锡扬, 郭博峰, et al. (2010). 基于 GPS 非差观测值估计大气可降水量. 武汉大学学报(信息科学版) [J], 35: 806-810.
- 张镇驿 (2023). 机载 GNSS 高精度对流层产品处理及应用 [D]. 武汉大学.
- 赵传宝 (2021). 多模 GNSS 非组合精客单点定位: 低成本单频模型构建与多频模

- 型精化 [D]. 中国科学院大学（中国科学院精密测量科学与技术创新研究院）.
- 周要宗 (2022). 北斗/GNSS 高精度对流层映射函数及水平梯度模型建立方法研究 [D]. 武汉大学.
- 朱童, 张克非, 李龙江, et al. 非实测气象参数在 GNSS 水汽反演中的适用性. 导航定位学报 [J]: 1-12.

致 谢

大江歌罢掉头东，邃密群科济世穷。
面壁十年图破壁，难酬蹈海亦英雄。

——周恩来

回首二十载求学之路，十年的高等教育，六年的硕博学习时光，过往奋斗还历历在目。忆及 2018 年初到东湖，时光仍在眼前。真当回顾其间的学习收获和成长得失，竟发觉光阴难愈拙思。一路艰辛困苦，已成为过眼云烟。

首先感谢我的导师袁运斌研究员。袁老师在学术上一丝不苟，在工作上孜孜不倦。您精益求精的科研作风、严谨求实的治学态度以及忘我的工作精神一直引领我勤奋工作，刻苦科研，学有所成。硕博学习期间，做出的每一次重大选择，都少不了袁老师的鼓励、支持和帮助：忆及参加推免面试时，本想因为生病放弃面试，袁老师专门打来电话鼓励我积极报考；再到报考博士时，觉得成果不够条件，袁老师与我面谈鼓励我大胆尝试；又到申请出国访问时，袁老师不遗余力支持和推荐我。袁老师虽然工作繁忙，但对我的科研工作十分关注：在确定选题的时候，袁老师鼓励我“在科研上要肯下大功夫，敢啃硬骨头，少做重复工作”；在我有成果迫不及待想要发表时，袁老师劝诫我“好成果是研究出来的，要以做成果为首要，总结论文为次要”；在我科研迷茫时，袁老师鼓励我，“人的青春时间有限，要在你精力最旺盛的时候，多做成果。”回想起来，因为过于浮躁和倦怠，我在科研工作中忽略了袁老师字字珠玑的提醒和劝诫，现在追悔莫及。

感谢欧吉坤老师在我学习期间的关心和帮助。欧老师治学严谨，年逾古稀仍奋斗在科研一线，对待科学研究抱有激情和热爱；欧老师关心学生，在我的学术报告会上，总能够一针见血指出我的问题，又提出切实可行的建议和指导。欧老师是当之无愧的“学为人师，行为世范”，也是我学习的榜样。希望我在未来科研事业中能做到您的十之一二。祝愿欧老师未来身体健康，万事如意。在此谨向两位老师致以深深的敬意和最诚挚的谢意。

然后感谢我的论文合作者和指导老师：张红星老师、Prof. Benedikt Soja 和 Dr. Matthias Aichinger-Rosenberger。张红星老师是我开展 GNSS 对流层和水汽反演方法研究的引路人，对待科研一丝不苟、对待工作饱含热情。在科研上，张老师把自己的所学所思能够无私传授给我，提点我开展论文工作的思路和方法，教导我“好论文既是做出来的，也是改出来的，改论文要做到每改一次都能有一个提高和精进”，还不断给我分享最新的论文，让我有幸在巨人的肩膀上添砖加瓦。除此之外，张老师也会关心我的学业进展，考虑我的职业规划，不断鞭策我进步。每每回忆论文几易其稿，隔着 6 小时时差，字斟句酌修改论文，感激涕零。感谢

我在苏黎世联邦理工大学访问期间，两位导师兼合作者 Benedikt 教授和 Matthias 博士的支持，帮助和指导。Benedikt Soja 对待科研一丝不苟，对待工作忘我专注，为课题组创造一个轻松不失严谨，充实不失快乐的工作氛围。时至今日，仍忘不了您凌晨两点还在给我的论文“Give some comments”。两位导师在我访问期间给予了我极大的自主探索的空间，支持我参加学术会议进行学术交流；同时鼓励我 Work-Life Balance，邀请我参加组里的滑雪、徒步、Social Drink, BBQ 等活动。同时也感谢两位合作者对我论文提出的建议和意见，特别是 Matthias 博士给我论文语法问题的详细修改和订正。

感谢课题组的丁文武、霍星亮、张宝成、刘腾、潭冰峰、李敏、刘明明、宋敏、柴艳菊、李薇、王海涛等老师在我平时科研学习生活中的指导、支持与帮助；感谢院里刘根友、闫昊明、郭爱智、张子占、王虎彪、陈晓东、柳林涛和周冲冲等老师对我科研工作的建议、关心和帮助。感谢课题组喻佳、王宇竹和魏曼老师对我学习生活和科研工作的支持和帮助。感谢母校长沙理工大学的彭文澜、赵彬彬、丁美青、张云菲、刘斌和徐鹏等老师对我学业的关心和支持。老师们的鼓励和帮助，让我倍感温暖，也激励我不断进步。感谢三位匿名评阅人和姚宜斌、王泽民、徐天河、赵齐乐、欧吉坤、罗孝文和张宝成等答辩专家对本文详细且深刻的意见，对改进本文论文工作、提高科研质量，甚至于改善本人的科研学习态度和思路都有很大的裨益。

感谢一起在 803 办公室奋战的同学们：薛兵、杨洲铭、刘煜、王晟哲、胡杰、张亭，愿你们未来科研顺利（工作顺心）；感谢课题组给予我帮助和关心的师兄弟姐妹们：艾青松、刘帅、翟锐、徐黎、刘昊杰、徐宏进、侯鹏宇、陈星宇、车德铭、黄文健、徐涵滢和孙玮鸿；我在硕博学习期间的学友们：胡辉雯、沈聪、李雨阳和莫丽桦等；感谢在瑞士苏黎世访问期间遇到的朋友和同事们：吕思婕、潘诚、曹新运老师、郑铭基、王超老师、潘元欣、毛姝尹、苟俊阳、张镇驿、Lukas Muller、Endrit Shehaj、Laura Crocetti、胡志斌、鲍聪、汪昭义、熊哲强和陈昶安，愿你们科研精进、学业进步和工作顺利；特别感谢课题组秘书 Jrène Müller-Gantenbein，您待人温和，又总能及时回应我的问题和请求，访问期间诸多事情都麻烦您沟通和处理，祝愿您身体健康，工作愉快；感谢在欧洲遇见的三位初高中同学：赵羿、余紫清和李腾；感谢我在开展课题研究和寻找工作期间得到的支持、帮助和有益交流：崔荣花老师、文志超、于志杰、张文渊、丁君生、韩韬、任栋、周志博、叶周润老师、熊朝晖、李忠亚、石杰、孟国杰老师、张明远、肖伟老师和李宗楠老师等。感谢中国科学院大学和中国科学院精密测量院提供的学习条件与科研环境；感谢管理部门在我硕博学习阶段提供的便利、帮助和支持，此间感谢蔡怡春、张垒、唐瑶、赵行双、杜龙、陈思梦、陈新晓、程方升、马铭和杨晓倩。

感谢党和国家提供的平等教育机会，托举一个泥地少年可以走出贫瘠乡村；

感谢国家助学贷款的贴息资助，托底贫寒学子可以完成博士学业；感谢留学基金委的资助，助力青年学者可以开拓国际视野。飞跃亚欧大陆，彼时世界刚走出疫情的危机，又陷入战乱此起彼伏的局部冲突，而我能在一隅安心科研，专精增长自己的学识和才干，这一切得益于我们日益强盛的国家，也得益于千千万万为祖国独立富强奋斗的劳动者。经此一年，落地武汉，感悟最深的就是：“伟大祖国是我们坚强的依靠，生逢盛世，当不负盛世”。

感谢我的父母，对我学业的支持和理解，希望你们身体健康。你们教会我的“勤奋、努力、谦虚、踏实、进取 …”，这些品质是我一路走来的铠甲，让我能够勇敢面对科学问题的疑难和人生的选择。

感恩所有帮助过我的人，我会怀抱感恩之心，继续努力，回报父母，造福乡梓，报效祖国。

学业到此，也算功德圆满，我不敢说这是自己努力的结果。回首二十载的求学之路，其间遇到很多学友，我是其中的愚钝者，也是其中的懒惰者。而一路相对平坦，只能归因于运气常伴左右。得遇良师，学业顺遂，荣誉傍身，幸甚之至。如今依靠幸运托举到此，面对今后一切坎坷，只能全凭自身本事，而我能做的只是：好生努力，静待机遇，看淡结果。

谨以此文献给在求学路上所有关心、帮助和支持过我的师长、同学和亲友，愿此拙绩能给你们带来些许欣慰。

——后记

2024 年 6 月 撰初稿於瑞士苏黎世

2025 年 5 月 终稿於武汉东湖一隅

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果

作者简历：

2015年9月——2019年6月，在长沙理工大学交通运输工程学院测绘工程专业获得工学学士学位。

2019年9月——至今，在中国科学院大学（培养单位：中国科学院精密测量科学与技术创新研究院）测绘科学与技术专业攻读博士学位。

2023年9月——2024年9月，在瑞士苏黎世联邦理工大学大地测量与摄影测量研究所联合培养（国家留学基金委资助）。

学术论文发表情况：

1. **Li, L.**, Zhang, H. *, Yuan, Y., Aichinger-Rosenberger, M., & Soja, B. (2025). HDTM: A novel model providing hydrostatic delay and weighted mean temperature for real-time GNSS precipitable water vapor retrieval. IEEE TGRS. (**SCI, IF=7.5**)
2. **Li, L.**, Zhang, H. *, Yuan, Y., Aichinger-Rosenberger, M., & Soja, B. (2024). On the real-time tropospheric delay estimates using low-cost GNSS receivers and antennas. GPS Solutions, 28(3), 1-13. (**SCI, IF=4.7**)
3. **Li, L.**, Yuan, Y. *, & Zhang, P. (2023). On low-cost GNSS observables under different grades of antennas: Receiver-related biases and RTK results. Measurement, 214, 112771. (**SCI, IF=5.6**)
4. **Li, L.**, Zhang, X., & Yuan, Y. * (2022). Variation of receiver code biases under the influence of the receiver type and antenna configuration in the IGS network. Measurement Science and Technology, 33(9), 095103. (**SCI, IF=2.4**)
5. Zhou, F., **Li, L.** *, Wang, Y., Dai, Z., Ding, C., Li, H., & Yuan, Y. (2024). Analysis of Different Height Correction Models for Tropospheric Delay Grid Products over the Yunnan Mountains. Atmosphere, 15, 872. (**SCI, IF=2.5**)
6. 叶寿洪，**李罗红***, 周若，王一帆，孙建文，卢操. 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. 导航定位与授时. (**通讯，已录用**)
7. Zhang, H. & **Li, L.** (2024). Machine learning-aided tropospheric delay modeling over China. 《Positioning and Navigation Using Machine Learning Methods》 (**英文专著章节**)
8. Real-time oceanic PWV sensing using BeiDou-3 PPP-B2b and low-cost GNSS devices. (**通讯，已审，Journal of Geodesy**)

学术交流情况：

1. 李罗红. (2023) 低成本接收机相关偏差的提取与分析. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院第四届博士生论坛. 2023年4月28日. 湖北武汉. (**口头报告，优秀奖**)

2. Li, L., Zhang, H., Yuan, Y., Aichinger-Rosenberger, M. & Soja, B. (2024). Performance of Real-time Tropospheric Delay Using Low-cost GNSS Receivers and Antennas with PCV Correction. **IGS Workshop**. 1-5 July 2024. University of Bern, Bern, Switzerland. (张贴报告)
3. Li, L., Zhang, H., Yuan, Y., Aichinger-Rosenberger, M. & Soja, B. (2024). A Novel Forecasting Zenith Hydrostatic Delay / Weighted Mean Temperature Model for Rapid PWV Retrieval and Its Application in Extreme Rainfall Events. **IGS Workshop**. 1-5 July 2024. University of Bern, Bern, Switzerland. (张贴报告)
4. 李罗红, 张红星, 袁运斌. (2024) 一种无气象参数依赖的对流层延迟模型及其低成本GNSS水汽反演应用. 2024全国空间智能遥感与海洋测绘导航学术大会暨先进装备展览会. 2024年9月21日-22日. 山东威海. (口头报告, 二等奖)

主要参与的科研项目:

1. 国家重点研发计划——协同精密定位技术 (No.2016YFB0501900)
2. 基于“星-地”协同空间大气反演的微气象关键要素预报预警研究与电网微气象服务系统试制

获奖情况:

1. 中国科学院大学武汉教育基地优秀毕业生 (2025年度)
2. 中国科学院武汉分院院长奖学金 (2025年度)
3. 博士生国家奖学金 (2024年度)
4. 中国科学院精密测量院青年突击手 (2023年度)
5. 中国科学院精密测量院优秀共产党员 (2022年度)
6. 中国科学院大学三好学生 (2020年度和2022年度)
7. 中国科学院大学优秀共青团员 (2021年度)

本论文的研究工作得到了国家重点研发计划 (2016YFB0501900, 2023YFA1009100)、国家自然科学基金(42274043, 42074045)、湖北省战略人才培育项目 (KJCXRC202400130), JD课题 (2023BAA0251)、武汉市自然科学基金(2024040801020244)和王宽诚率先人才计划卢嘉锡国际团队项目等课题的联合资助, 在此一并感谢!