



基于 GNSS 的空间环境参数反演平台及精度评估

摘要

基于全球和区域全球导航卫星系统 (GNSS) 参考站网进行对流层和电离层参数反演实现空间环境变化监测具有成本低、精度高、实时性好等优点,得到了广泛应用.本文基于南京信息工程大学的北斗/GNSS 空间环境监测平台 Xsensing,以国际 GNSS 服务组织提供的对流层产品为参考,评估了不同气象条件下对流层参数反演精度,在此基础上采用固定非差模糊度的精密单点定位技术 (PPP) 实现高精度电离层参数反演.实验结果表明,基于全球参考站的对流层估计误差偏差为 0.05 mm,对应的标准差为 5.6 mm,在平稳和剧烈的气象条件下均能反映水汽变化趋势特征.基于短基线进行电离层延迟反演精度评估,结果表明浮点解 PPP 反演电离层延迟误差的平均偏差为 -0.09 TECU,精度为 0.38 TECU,采用非差模糊度固定技术对电离层延迟提取精度提高达 84.2%;静态模拟动态解算模式下电离层估计精度与静态相当.上述结果表明该平台可实现高精度空间环境参数反演,下一步将融合机载、船载等多种平台观测实现中小尺度空间变化监测.

关键词

全球导航卫星系统;精密单点定位技术;对流层;电离层;反演;Xsensing 平台

中图分类号 P228.4

文献标志码 A

收稿日期 2020-12-13

资助项目 南京信息工程大学人才启动经费项目(2019r081);江苏省高校自然科学研究面上项目(20KJB170008)

作者简介

赵乐文,男,博士,讲师,主要研究 GNSS 实时精密定位技术.lwzhao@nuist.edu.cn

0 引言

对流层和电离层是近地空间环境的重要组成部分,其中对流层是暴雨、冰雹等各种灾害性天气形成和演变的重要因子,而电离层扰动对无线电通信、定位与导航等有破坏性影响,因此对近地空间环境中对流层和电离层变化进行实时监测具有重要的意义^[1].作为全球导航卫星系统 (GNSS) 信号传播过程中的主要误差源,对流层和电离层对信号传播的影响机制存在较大差异.因此,通过适当的参数化建模策略可基于 GNSS 观测值实现高精度空间环境参数的反演.

地基 GNSS 解算中往往将天顶方向总对流层延迟 (Zenith Total Delay, ZTD) 分为由干空气引起的流体静力学延迟 (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD) 和水汽造成的湿延迟 (Zenith Wet Delay, ZWD)^[2].ZHD 可以通过地面气压等气象元素利用经验模型来精确地估算得到,而从 ZTD 中剔除 ZHD,并顾及对流层水平梯度的影响,即可得到 ZWD.根据 ZWD 与大气可降水量 (Precipitable Water Vapor, PWV) 的函数关系进行转换即可探测大气水汽^[3-5].基于北斗二代系统和 GPS 水汽反演技术已相对成熟,2013 年 3 月,气象部门首个地基北斗水汽探测网在湖北省开展建设.该项目利用中国自主北斗导航卫星系统开展地基水汽探测,获取高时间分辨率大气水汽资料.文献[6]比较了湖北省地基 GNSS 观测网中 GPS 和北斗信号探测大气水汽的结果,发现两个系统之间的系统误差为 2~3.3 mm,均方根误差约 2.5 mm,基于北斗信号探测的 PWV 略高于基于 GPS 信号的探测结果.文献[7]分析了上海市气象局建立的地基北斗站观测的数据,结果表明利用北斗卫星信号解算的大气水汽总量与目前较为成熟的 GPS 卫星信号反演结果基本一致,两者均方根误差小于 3.5 mm,相关系数均在 0.95 以上.上述研究表明利用北斗/GNSS 反演得到对流层和大气可降水量能很好地反映大气中水汽的变化特征,对于气象短时临近预报、气候分析有指示作用.

大气电离层延迟误差修正策略与 GNSS 用户的接收机类型相关.针对双频接收机用户,通过电离层延迟与信号频率的平方成反比的关系,形成消电离层组合观测值,进而在观测域尽可能消除电离层延迟的影响.对于单频接收机用户而言,需要先基于全球或区域 GNSS 参考站数据获取高精度先验电离层改正,进而用于消除用户定位中的电离层延迟误差.获取站星视线方向上的高精度倾斜电离层延迟

¹ 南京信息工程大学 遥感与测绘工程学院, 南京, 210044

(Slant Total Electron Content, STEC)信息是电离层研究与应用的基础.基于双/多频 GNSS 观测值提取 STEC 信息的方法可分为传统的无几何组合法和非差非组合 PPP (Precise Point Positioning, 精密单点定位)技术两种^[8].伪距中包含绝对的电离层 STEC 信息,组合载波相位观测值进行平滑滤波,可以实现电离层提取,但受观测噪声及多路径效应等因素的影响,其精度较差;非组合 PPP 优于相位平滑伪距技术,更适用于高精度电离层延迟的提取与建模^[9].

PPP 技术可利用单台接收机实现高精度对流层水汽和电离层参数反演,基于区域或全球参考站 GNSS 观测数据组网可实现中小尺度对流层、电离层延迟建模和空间环境变化监测,具有重要的研究意义和应用价值.本文首先介绍南京信息工程大学 Xsensing 平台空间环境参数反演的数学模型和系统流程,在此基础上进行对流层反演精度评估和电离层反演模型精化,为实现多源数据融合、中小尺度空间环境变化实时监测提供技术支撑.

1 PPP 数学模型

基于原始观测量的非差非组合 PPP 观测方程可表示为

$$\begin{aligned} P_{r,i}^s &= \rho_r^s + dt_r - dt^s + T_r^s + \mu_i I_{r,1}^s + b_{r,i} + b_i^s + \varepsilon_{i,P}^s, \\ L_{r,i}^s &= \rho_r^s + dt_r - dt^s + T_r^s - \mu_i I_{r,1}^s + \lambda_i N_{r,i}^s + B_{r,i} + \\ & B_i^s + \varepsilon_{i,L}^s, \end{aligned} \quad (1)$$

式中: r, s 分别为接收机和卫星标识; i 表示频率; $P_{r,i}^s, L_{r,i}^s$ 分别是以 m 为单位的伪距和载波相位观测值; ρ_r^s 表示信号发射时刻的卫星位置到信号接收时刻接收机位置之间的几何距离; dt_r, dt^s 分别表示接收机和卫星钟差; T_r^s 表示对流层延迟; μ_i 为与频率有关的常系数 $\left(\mu_i^s = \frac{f_1^2}{f_i^2}\right)$; $I_{r,1}^s$ 表示第 1 个频率上的站星斜路径电离层延迟量; $N_{r,i}^s$ 表示整周模糊度参数; λ_i 表示卫星对应频率的波长; $b_{r,i}$ 和 b_i^s 分别表示接收机端和卫星端的伪距硬件延迟偏差; $B_{r,i}$ 和 B_i^s 分别表示接收机端和卫星端的相位硬件延迟偏差; $\varepsilon_{i,P}^s$ 和 $\varepsilon_{i,L}^s$ 分别表示伪距和相位观测值中未模型化的残余误差.

国际 GNSS 服务组织(IGS)发布的卫星精密钟差产品吸收了无电离层组合的伪距硬件延迟偏差 b_{if}^s , 即:

$$d\tilde{t}^s = dt^s - b_{if}^s = dt^s - \frac{\mu_2}{\mu_2 - 1} b_1^s + \frac{1}{\mu_2 - 1} b_2^s. \quad (2)$$

考虑到硬件延迟偏差的影响,式(2)和式(1)进行参数重构后可表示为

$$\begin{aligned} P_{r,i}^s &= \rho_r^s + d\tilde{t}_r + T_r^s + \mu_i \tilde{I}_{r,1}^s + \varepsilon_{i,P}^s, \\ L_{r,i}^s &= \rho_r^s + d\tilde{t}_r + T_r^s - \mu_i \tilde{I}_{r,1}^s + \lambda_i \tilde{N}_{r,i}^s + \varepsilon_{i,L}^s, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\tilde{N}_{r,i}^s$ 表示吸收了卫星和接收机端硬件延迟偏差的实数模糊度.要恢复模糊度的整数特性以实现模糊度固定,需要采用卫星端宽巷和窄巷相位延迟偏差产品进行改正^[10].电离层参数也吸收了接收机和卫星的伪距硬件延迟偏差(Differential Code Bias, DCB),利用 IGS 提供的偏差改正产品修正卫星 DCB,并将接收机 DCB 作为参数估计,可以消除 DCB 的影响,估计得到“干净”的电离层延迟,进而用于区域建模和变化监测.

伪距和载波相位观测值的精度不同,且多路径误差等观测噪声与卫星高度角相关.因此,需要根据其噪声大小给定合适的权比.常用的是基于高度角的定权模型:

$$(\sigma_r^s)^2(E) = \sigma_0^2 / \sin^2(E), \quad (4)$$

其中 $(\sigma_r^s)^2$ 为测站 r 可视卫星 s 的方差, σ_0^2 为单位权方差, E 为卫星 s 高度角.

基于式(3)和(4)的函数模型和随机模型即可实现 PPP 参数估计,待估参数主要包含测站坐标、接收机钟差、天顶对流层延迟、模糊度参数和站星方向上电离层斜延迟.对于多模 GNSS,还需要额外考虑系统间偏差的影响.基于前向 Kalman 滤波算法可进行实时空间环境参数反演,基于反向滤波算法可以提高参数反演精度,实现近实时空间环境变化监测^[11].

图 1 给出了空间环境参数反演平台 Xsensing 数据处理流程.将不同用户终端的观测数据通过网络推送到数据处理引擎,同时接收和处理全球 GNSS 实时精密轨道、钟差改正产品,基于非组合 PPP 技术实现对流层和电离层参数反演,进而可用于构建高精度区域模型,实现定位增强和空间环境变化监测.

图 2 给出了 GNSS 引擎数据的关键模块,主要包括实时数据流的接收和解码、实时数据质量控制、实时卫星钟差和相位偏差产品估计、基于 PPP 的对流层和电离层参数反演等.在基于传统浮点解 PPP 解算模型的基础上,系统实现了基于非差模糊度固定进行高精度电离层延迟提取,本文将对其精度进行分析验证.

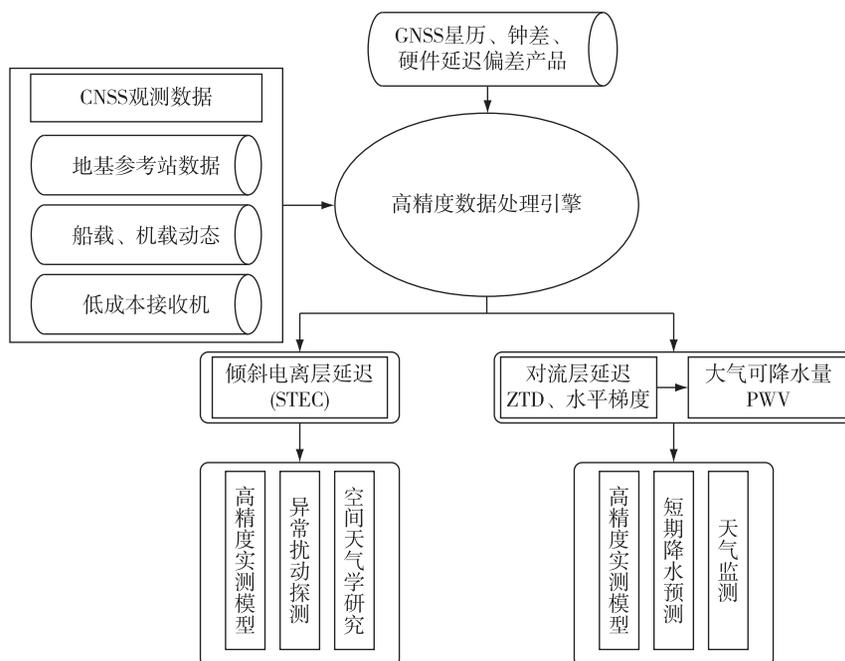


图 1 GNSS 实时空间环境参数反演系统流程

Fig. 1 Flowchart for real-time space environment parameter inversion using GNSS

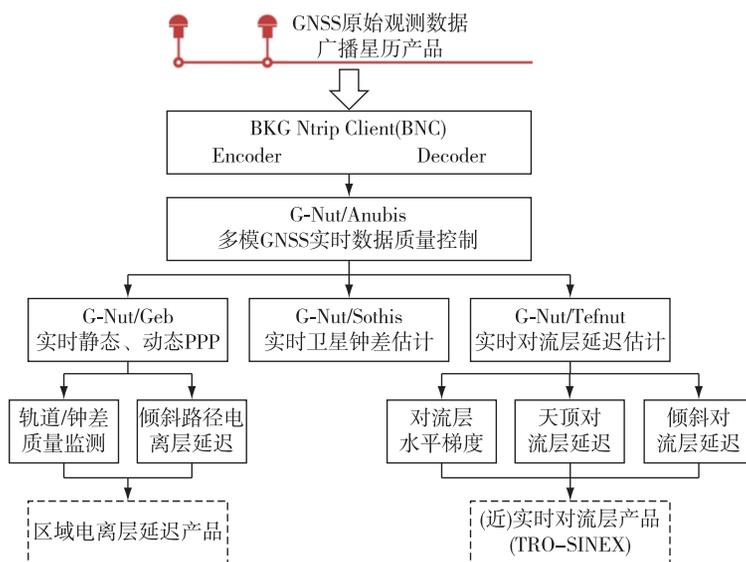


图 2 北斗/GNSS 实时高精度数据处理引擎

Fig. 2 The process engine for real-time Beidou/GNSS data processing

2 算法验证

本节基于全球跟踪站网的观测数据评估不同气象条件下的 Xsensing 平台对流层参数反演精度,并在此基础上,验证非差模糊度固定 PPP 对静、动态场景下高精度电离层参数反演的精度改善。

2.1 对流层参数反演精度评估

Xsensing 平台的对流层参数反演主要是基于自

研 G-Nut/Tefnut 软件解算得到的,其实时和事后解算精度已经得到广泛验证^[12-14]。本文选取 2020 年年积日 (DOY) 第 200 至 230 天基于全球 MGEX 跟踪站网估计的对流层延迟产品,以 IGS 提供的对流层产品作为基准进行精度评估,全球测站分布如图 3 所示。

图 4 给出了全球测站对流层延迟估计误差的偏差均值 (Bias) 和标准差 (STD),从中可以看到除了测

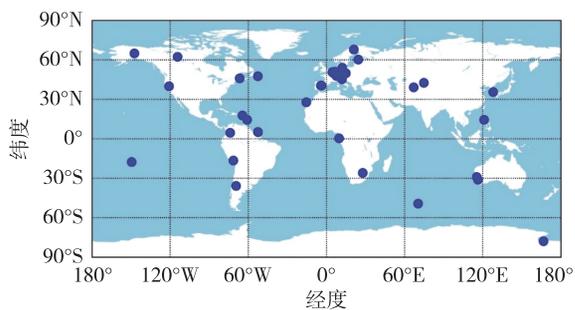


图3 对流层估计精度评估全球测站分布

Fig.3 Distribution of global stations used for troposphere evaluation

站 ARHT 对流层延迟估计存在较大误差外,各测站对流层延迟误差偏差均值为 0.05 mm,对流层延迟估计的精度为 5.6 mm,大部分测站对流层延迟估计的绝对误差均小于 6 mm.图 5 给出了基于本文在线处理系统(NUIST)和 IGS 估计的测站 COR1 天顶方向对流层延迟变化序列及其差异,可以看到在对流层变化平稳(DOY 202~209)和变化剧烈(DOY 210~215)情况下,Xsensing 平台解算结果均与 IGS 参考产品具有较好的一致性.总体而言,该站对流层延迟估计误差的偏差为 0.25 mm,STD 为 7.1 mm.

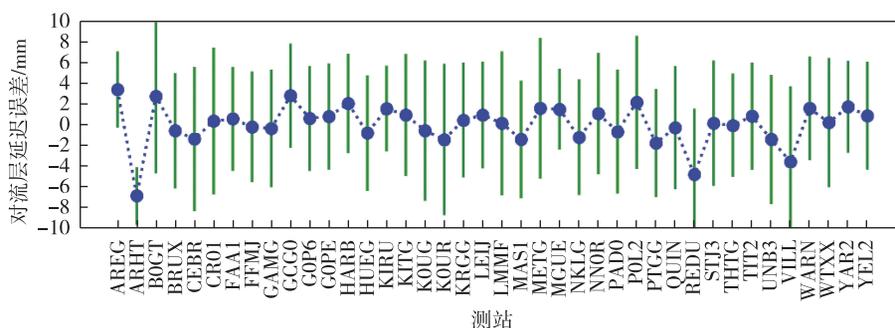


图4 以 IGS 对流层产品为参考的全球测站对流层估计误差均值和标准误差

Fig.4 Mean bias and standard deviation (STD) of tropospheric delay errors estimated by global GNSS stations compared to the IGS reference product

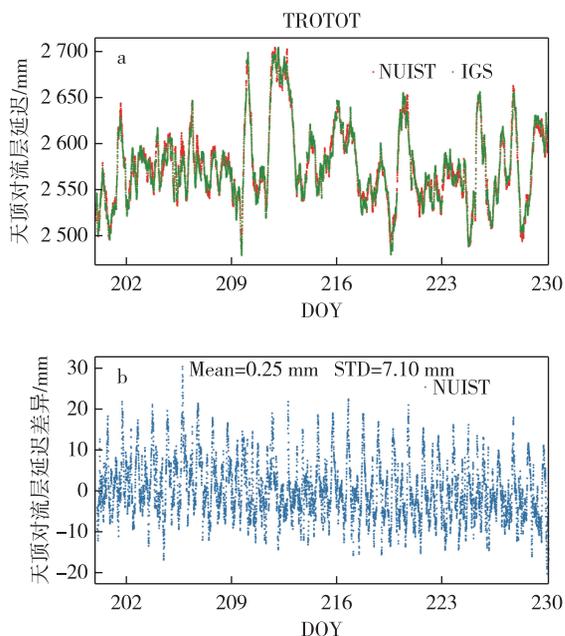


图5 不同分析中心估计的测站 COR1 天顶方向对流层延迟变化情况(a)及精度(b)

Fig.5 Comparison of ZTD variations (a) and errors (b) on station COR1 from different centers

2.2 电离层参数反演精度验证

本文采用非差非组合 PPP 模型进行电离层延迟提取,并采用模糊度固定技术进一步提高电离层估计精度.参数估计中卫星端硬件延迟偏差(DCB)采用 IGS 提供的精密产品进行改正,接收机端的 DCB 作为参数进行估计,因此本文估计的是不受硬件延迟偏差影响的“干净”电离层延迟.目前国际 GNSS 服务组织提供的电离层延迟产品精度为 3~8 TECU(1 TECU 引起的 GPS L1 观测值的误差为 0.16 m),其产品精度无法用于电离层延迟估计精度评估.因此,本文基于电离层延迟的空间相关性特征,通过站间单差消除卫星端和信号传播过程的空间相关性误差,残余的误差仅受观测噪声和不同测站接收机硬件延迟偏差的影响,故不同卫星的单差电离层应该重合.

实验选取一组短基线观测数据进行不同解算模式下的电离层延迟精度评估,表 1 列出了选取数据的接收机和天线类型信息.由于缺少多 GNSS 模糊度固定所需的相位偏差产品,本文主要基于 GPS 系统观测值分析模糊度固定技术对电离层反演精度的改善.图 6 和图 7 分别给出了浮点解和固定解模式下,每颗卫

星经过站间单差的电离层差异(STEC diff),图中不同颜色代表不同的卫星,横坐标时间为对应历元的 GPS 时.图 7 中存在部分离散点主要是由于低高度角卫星的影响导致部分历元模糊度固定失败引起的.可知,两组数据的站间单差电离层均在零均值附近波动,其中浮点解模糊度得到的电离层一致性稍差,平均偏差为 -0.09 TECU,STD 为 0.38 TECU.采用模糊度固定技术可显著提高电离层延迟提取的一致性,电离层延迟估计标准差从 0.38 TECU 提高到 0.06 TECU,精度改善达 84.2% ,验证了模糊度固定技术用于高精度电离层延迟获取的可行性.

表 1 短基线数据说明

Table 1 Description of the short-baseline data

测站	接收机类型	天线类型
GOP6	SEPT POLARX5	LEIAR25.R4 LEIT
GOP7	TRIMBLE NETR9	LEIAR25.R4 LEIT

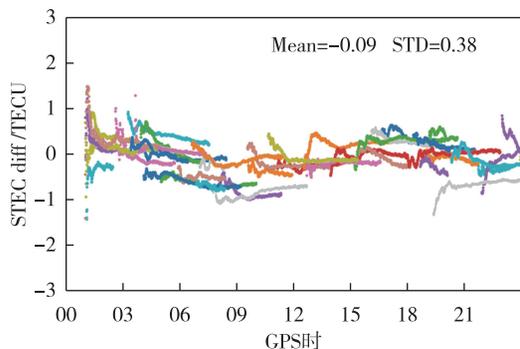


图 6 GOP6~GOP7 短基线模糊度浮点解电离层序列

Fig. 6 Ionospheric error estimated with ambiguity float PPP for short baseline GOP6-GOP7

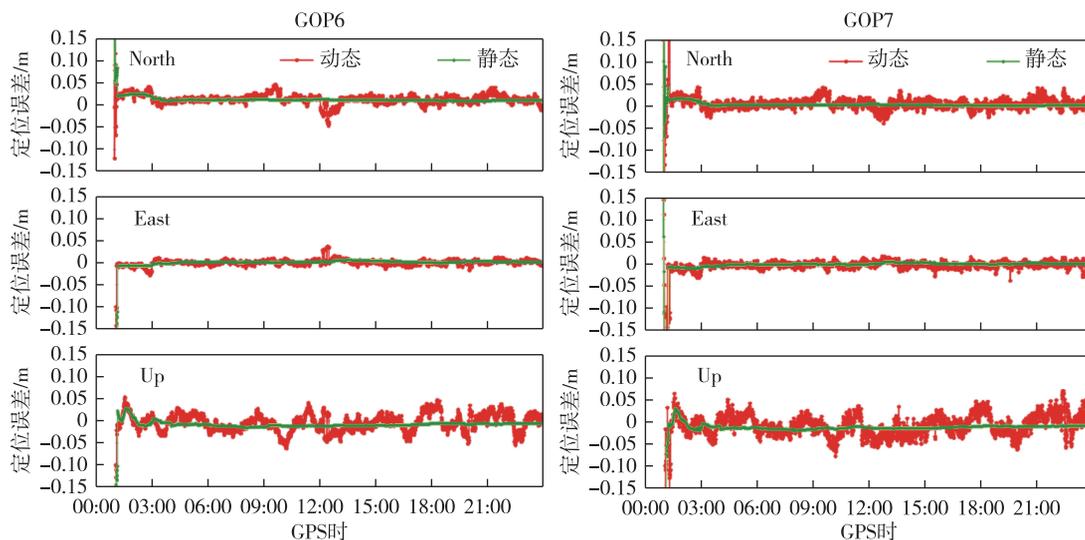


图 8 静态、动态解算模式下 PPP 定位误差时间序列

Fig. 8 Time series of positioning error for static and kinematic PPP

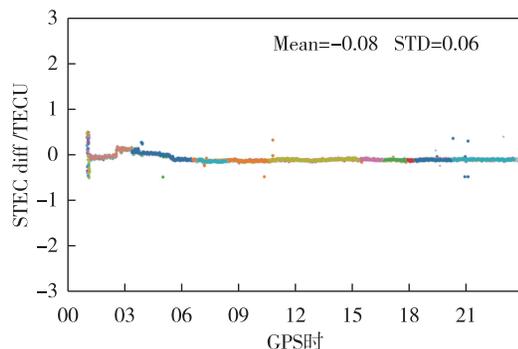


图 7 GOP6~GOP7 短基线模糊度固定解电离层序列

Fig. 7 Ionospheric error estimated with ambiguity fixed PPP for short baseline GOP6-GOP7

为了满足动态载体 GNSS 接收机用于电离层提取的要求,提高全球电离层穿刺点的时空分辨率,本文进一步研究动态 PPP 提取电离层延迟的精度.图 8 给出了不同解算模式下,测站 GOP6 和 GOP7 定位结果在北 (North)、东 (East) 和高程 (Up) 方向分量的定位误差时间序列.由图 8 可知,经过一定初始化时间后,静态 PPP 能达到毫米级定位精度,且定位误差序列时间稳定性较好.动态 PPP 能达到厘米级的定位精度,其在水平方向定位误差小于 5 cm、高程方向小于 8 cm.

图 9 分别给出了动态解算模式下 PPP 模糊度固定解提取的短基线电离层延迟误差时间序列.对比图 7 可以看到,动态解算模式下 PPP 电离层延迟提取仍能达到较高精度,其平均偏差为 -0.08 TECU,STD 为 0.07 TECU,验证了动态 PPP 用于高精度电

高层延迟提取的可行性。

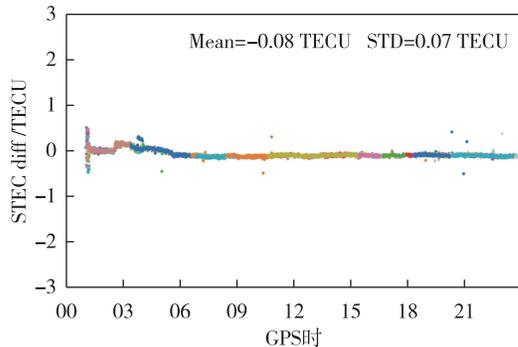


图9 动态PPP模糊度固定解PPP提取电离层延迟误差

Fig. 9 Ionospheric delay error estimated with ambiguity fixed kinematic PPP

3 结论及展望

本文介绍了 Xsensing 空间环境监测平台(www.xsensing.cn)进行对流层和电离层参数反演的数据处理流程、数学模型和关键算法模块,用户只需通过网络将数据推送到该平台即可近实时和事后获取反演参数.基于该平台的数据产品,以 IGS 提供的对流层产品为参考评估了其对流层延迟解算精度,在此基础上提出基于固定模糊度的 PPP 技术实现高精度电离层参数反演.基于本文研究,可以得到如下结论:

1) 基于全球测站估计的对流层延迟误差的平均偏差为 0.05 mm,STD 为 5.6 mm.反演结果能够实现不同气象条件下的大气水汽变化探测.

2) 基于浮点解的电离层估计精度为 0.38 TECU,采用非差模糊度固定技术对电离层估计精度提高达 84.2%以上;基于静态模拟动态 PPP 解算模式进行电离层反演精度与静态解算模式精度相当.本文还验证了非差模糊度固定技术在静态、动态场景下用于高精度电离层延迟提取的可行性.

由于缺少多 GNSS 卫星相位偏差产品,本文电离层精度评估仅基于 GPS 观测值.下一步将融合多系统和多种观测平台的 GNSS 数据进行电离层参数反演,实现中小尺度空间环境变化监测.

参考文献

References

[1] 姚宜斌,张顺,孔建.GNSS 空间环境学研究进展和展望[J].测绘学报,2017,46(10):1408-1420
YAO Yibin, ZHANG Shun, KONG Jian. Research progress and prospect of GNSS space environment

science [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1408-1420

- [2] Bevis M, Businger S, Chiswell S, et al. GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water [J]. Journal of Applied Meteorology, 1994, 33(3): 379-386
- [3] Askne J, Nordius H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data [J]. Radio Science, 1987, 22(3): 379-386
- [4] Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97 (D14): 15787-15801
- [5] Businger S, Chiswell S R, Bevis M, et al. The promise of GPS in atmospheric monitoring [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77(1): 5-18
- [6] 施闯,王海深,曹云昌,等.基于北斗卫星的水汽探测性能分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2016,41(3):285-289
SHI Chuang, WANG Haishen, CAO Yunchang, et al. Analysis on performance of water vapor detection based on Beidou satellite [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(3): 285-289
- [7] 郭巍,尹球,杜明斌,等.利用地北斗站反演大气水汽总量的精度检验[J].应用气象学报,2015,26(3):346-353
GUO Wei, YIN Qiu, DU Mingbin, et al. The accuracy test of retrieved precipitation water vapor based on Beidou observations [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(3): 346-353
- [8] 张宝成.GNSS 非差非组合精密单点定位的理论方法与应用研究[J].测绘学报,2014,43(10):1099
ZHANG Baocheng. Study on the theoretical methodology and applications of precise point positioning using undifferenced and uncombined GNSS data [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(10): 1099
- [9] Zhang B C, Ou J K, Yuan Y B, et al. Extraction of line-of-sight ionospheric observables from GPS data using precise point positioning [J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(11): 1919-1928
- [10] Ge M, Gendt G, Rothacher M, et al. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations [J]. Journal of Geodesy, 2008, 82(7): 389-399
- [11] Vaclavovic P, Dousa J. Backward smoothing for precise GNSS applications [J]. Advances in Space Research, 2015, 56(8): 1627-1634
- [12] Zus F, Douša J, Kačmařík M, et al. Estimating the impact of global navigation satellite system horizontal delay gradients in variational data assimilation [J]. Remote Sensing, 2018, 11(1): 41
- [13] Zus F, Douša J, Kačmařík M, et al. Improving GNSS zenith wet delay interpolation by utilizing tropospheric gradients: experiments with a dense station network in central Europe in the warm season [J]. Remote Sensing, 2019, 11(6): 674
- [14] Zhao L W, Vaclavovic P, Douša J. Performance evaluation of troposphere estimated from Galileo-only multi-frequency observations [J]. Remote Sensing, 2020, 12(3): 373

Platform for GNSS real-time space environment parameter inversion and its accuracy evaluation

ZHAO Lewen¹ REN Jiaqian¹ DING Yang¹

¹ School of Remote Sensing & Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract The retrieval of tropospheric and ionospheric parameters from global and regional Global Navigation Satellite System (GNSS) reference station networks has the benefits of low cost, high precision and real-time. The GNSS space environmental monitoring platform of Xsensing proposed by Nanjing University of Information Science and Technology is introduced in this paper. Firstly, the accuracy of tropospheric parameter inversion under different meteorological conditions is evaluated with the tropospheric products provided by the international GNSS service as a reference. Then, the ambiguity-fixed Precise Point Positioning (PPP) method is used to realize high-precision ionospheric parameter inversion. The experimental results show that the mean bias of the tropospheric delay errors is 0.05 mm, and the corresponding standard deviation is 5.6 mm. The results can reflect the trend of water vapor changes with high accuracy under stable or severe weather conditions. The accuracy of ionospheric inversion is evaluated based on a short baseline test. The mean bias of ionospheric delay errors from the ambiguity-float PPP is -0.09 TECU, and the accuracy is 0.38 TECU. The ambiguity fixed PPP method can improve the accuracy by 84.2%. Besides, comparable accuracy can be achieved using the static and simulated kinematic PPP. The results verify the initial accuracy of the Xsensing platform and pave the way for improving the spatial and temporal resolution of the space environment monitoring using airborne and shipborne platforms.

Key words Global Navigation Satellite System (GNSS); Precise Point Positioning (PPP); troposphere; ionosphere; inversion; Xsensing platform