引文格式:刘国林,黄观文,高扬,等.区域对流层异常下顾及相对梯度的GNSS RTK桥梁变形监测算法[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(7):1324-1335.DOI:10.13203/j.whugis20260047

Citation:LIU Guolin,HUANG Guanwen,GAO Yang,et al.GNSS RTK Bridge Deformation Monitoring Algorithm Considering Relative Gradient in Regional Tropospheric Anomalies[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(7):1324-1335.DOI:10.13203/j.whugis20260047

区域对流层异常下顾及相对梯度的GNSS RTK桥梁变形监测算法

刘国林[1,2,3] 黄观文[1,3] 高 扬[2] 景 策[1,3] 林买金[1,3]

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

2 卡尔加里大学舒利克工程学院,阿尔伯塔 卡尔加里,T2N 1N4

3 智能北斗陕西省高校工程研究中心,陕西 西安,710054

摘 要:在全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)桥梁监测中,实时动态定位(real time kinematic,RTK)技术因高精度与实时快速等优势而被广泛应用。在暴雨等区域对流层异常(regional tropospheric anomaly,RTA)条件下,针对山区大高差环境下融合气象估计(fusion weather estimation,FWE)方法存在水平延迟差异显著、差分残差较大的问题,提出一种面向RTA的顾及相对梯度的GNSS RTK监测方法。利用数值气象预报与射线追踪技术反演高精度三维延迟场,通过引入相对对流层延迟梯度参数增强对方向性残差的建模能力,并采用卡尔曼滤波实现坐标、模糊度与对流层参数的联合估计。实测暴雨数据验证表明,在RTA时段,相比于GPT3模型与FWE方法,所提方法使北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system,BDS)RTK垂向精度分别提升约19.8%与8.3%,北向精度平均提升约8%。残差分析结果显示,所提方法的圆度指标显著提高,残差点云形态由椭圆向近圆转变,BDS/GPS双系统卫星总圆度提升了14.9%。所提方法有效削弱了对流层的方位向残差,显著提升了RTA条件下桥梁变形监测的鲁棒性与工程适用性。

关键词:RTK;桥梁监测;区域对流层异常;相对对流层延迟梯度;数值气象预报;残差指标

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-04-24

DOI:10.13203/j.whugis20260047 **文章编号**:1671-8860(2026)07-1324-12

GNSS RTK Bridge Deformation Monitoring Algorithm Considering Relative Gradient in Regional Tropospheric Anomalies

LIU Guolin[1,2,3] *HUANG Guanwen*[1,3] *GAO Yang*[2] *JING Ce*[1,3] *LIN Maijin*[1,3]

1 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 Schulich School of Engineering, University of Calgary, Calgary T2N 1N4, Canada

3 Engineering Research Center of Intelligent BDS, Universities of Shaanxi Province, Xi'an 710054, China

Abstract: **Objectives**: Real-time kinematic (RTK) positioning is a prevalent method for bridge health monitoring due to its high accuracy and automation. As demonstrated in the previous research, a fusion weather estimation (FWE) method is developed to mitigate tropospheric delays in mountainous areas. However, it is observed that the performance of FWE method deteriorates in the presence of regional tropospheric anomaly (RTA) conditions, such as heavy rainfall. In RTA scenarios, significant horizontal variations in tropospheric delay introduce directional residuals even in short-baseline measurements, leading to reduced vertical accuracy and unstable ambiguity resolution. A key objective here is to address this limitation by developing an enhanced RTK algorithm tailored for RTA scenarios to improve the robustness and precision of structural displacement monitoring. **Methods**: An RTK algorithm is proposed that incorporates relative tro-

基金项目:国家自然科学基金(42374025);中央高校基本科研业务费专项资金-长安大学优秀博士学位论文培育资助项目(CHD300102263718);陕西省博士后科研项目(2025BSHSDZZ269)。

第一作者:刘国林,博士生,研究方向为GNSS桥梁监测。2021026018@chd.edu.cn

通信作者:黄观文,博士,教授。guanwen@chd.edu.cn

pospheric delay gradients derived from high-resolution numerical weather prediction (NWP) data. First, a 3-D, time-varying tropospheric delay field is constructed using NWP and ray tracing to enhance un-difference delay corrections. Second, relative tropospheric gradient parameters are incorporated into the double-difference observation model to explicitly account for horizontal delay non-isotropy. Finally, an extended Kalman filter is developed to jointly estimate coordinates, integer ambiguities and tropospheric parameters, including these gradients, using constraint strategy to balance model stability and sensitivity to atmospheric anomalies. **Results**: The efficacy of the proposed method is demonstrated through field validation during a heavy rainfall event. Compared with both the conventional GPT3 model and FWE method, the proposed method improves vertical positioning accuracy for BDS by approximately 19.8% and 8.3%, respectively. The accuracy in north direction is also improved by an average of about 8%. Residual analysis reveals a quantifiable mitigation of directional error. The introduced circularity index shows residual point clouds shifting from an elliptical to a near-circular distribution, and the total circularity for the combined BDS+GPS system increases by approximately 14.9%, directly indicating a reduction in azimuthally dominant residuals. **Conclusions**: The proposed gradient-considered RTK algorithm successfully mitigates the detrimental effects of directional tropospheric residuals during RTA events. The enhancement of both the accuracy (particularly in the vertical component) and the isotropy of residuals significantly improves the robustness and reliability of GNSS-based bridge displacement monitoring under complex meteorological conditions, offering strong potential for engineering applications.

Key words: RTK; bridge monitoring; regional tropospheric anomaly; relative tropospheric delay gradient; numerical weather prediction; residual index

全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)技术因具备三维定位、全天候运行、自动化程度高与易部署维护等优势,逐渐成为桥梁结构位移和姿态监测的重要手段[1-4]。与全站仪、光纤传感器等接触式或光学类传感器相比,GNSS具备更强的环境适应能力和长期运行稳定性,特别适用于大跨度桥梁的连续监测任务[5-7]。目前在工程实践中,GNSS监测主要采用实时动态定位(real time kinematic, RTK)[8-9]、精密单点定位(precise point positioning, PPP)[10]与PPP-RTK[11]3种技术。其中,RTK技术因实时定位精度高和初始化时间短,成为桥梁变形、振动等快速动态过程捕捉的核心技术[12-13]。

尽管RTK水平定位精度较高,但垂直方向误差依然较大,限制了其在桥梁挠度监测等高敏感度场景中的应用。在短基线条件下,双差技术能够基本消除电离层误差,但由于对流层水汽分布的空间不均匀性,即便在相距公里级的站点之间,对流层残余延迟差依然显著,从而干扰垂向解算精度和模糊度固定过程[14]。已有研究指出,RTK垂向定位误差通常可达到水平方向定位误差的约2~3倍[15-16],其主要原因在于高差或水汽引起的对流层延迟误差未得到充分处理[17]。

为提升RTK定位的稳定性与精度,目前处理对流层误差的方法主要有3类:(1)基于经验模型的误差改正,如Saastamoinen模型[18]、全球气压温度模型(global pressure and temperature, GPT)和维也纳映射函数(Vienna mapping function, VMF)系列[19-20]模型,这些模型通过站点高度、经纬度和观测历元进行延迟改正[21],优势在于使用便捷、计算效率高且不依赖实时气象数据,但难以准确反映由局部地形、突发天气过程引起的大气变化。(2)基于外部气象数据的误差改正,如利用地面气象站或高分辨率数值气象预报(numerical weather prediction, NWP)数据,通过积分或射线追踪法反演天顶对流层延迟(zenith tropospheric delay, ZTD)或斜路径延迟(slant path delay, SPD)并参与解算[22]。该方法能够更精细地刻画对流层延迟的时空变化,但其数据的获取、延迟性以及NWP模型自身在复杂地形下的预报精度都会直接影响最终改正效果。(3)对流层延迟残差参数估计,如在RTK解算中引入对流层状态参数来进行实时滤波估计[16,23-24],能吸收未模型化的残余误差,但在短基线下,该参数与高程参数高度相关,可能损害解算的稳定性。笔者团队前期的研究利用NWP反演的分层ZTD数据,提出了融合气象改正(fusion weather correction, FWC)和融合气象估计(fusion weather estimation, FWE)方法,优化了山区大高差环境下的对流层延迟估计,改善了垂

向监测精度[16]。然而,在由暴雨、强对流等引发的区域对流层异常(regional tropospheric anomaly, RTA)条件下,上述方法的局限性被放大。RTA会急剧破坏大气延迟在短距离内的空间相关性,导致水平方向出现强烈的、非均匀的延迟差异[25]。这种方向性残差无法被仅针对天顶延迟的模型有效吸收,是引发RTK垂向偏移和模糊度固定失败等问题的直接原因。在长基线RTK或PPP中,常通过引入绝对梯度参数来建模水平大气非均匀性[26-27],但在桥梁监测这类短基线、强实时性的应用场景中,直接引入此类参数会增加模型复杂度与参数相关性,威胁解算的稳定性与效率。

因此,亟需一种新的建模策略,能在不显著增加模型复杂度的前提下,有效融合高精度气象先验信息,以针对性地提升短基线RTK在RTA条件下的监测精度与可靠性。本文提出一种顾及相对梯度改正的GNSS RTK桥梁变形监测算法,核心在于引入相对对流层延迟梯度参数,用以统一表征并吸收由异常天气引起的站间水平方向延迟差异,旨在精准抑制方向性大气残差,从而显著增强复杂气象环境下桥梁形变监测的鲁棒性与工程实用价值。

1 监测方法与评价指标

1.1 射线追踪方法

在对流层建模研究中,射线追踪方法是最为直接和精确的一种计算手段,通过逐层积分大气折射率,可以得到GNSS信号在穿越大气时的实际传播路径及相应的SPD。本文仅简述二维射线追踪方法的基本原理[28-30]。球面分层大气射线追踪示意图如图1所示,图中,r_i为第i层球面半径,ϕ_i为第i层折射角,s_i为第i层倾斜路径的距离,h_i为s_i路径上的平均大气折射率,i=1,2,3,4。

在大气球对称的假设下,大气层被视为由多个与地球同心的球壳所组成的分层结构。根据球面分层大气的Snell折射定律[28],其表达式为:

$$rh\sin\phi=\Psi \tag{1}$$

式中,r为球面半径;h为球面折射率;ϕ为折射角;Ψ为常数。由式(1)可知,在球面半径和大气折射率已知的前提下,可以逐层推导出新的折射角。如图1所示,假设测站上空的大气被分成k层,则SPD的表达式为:

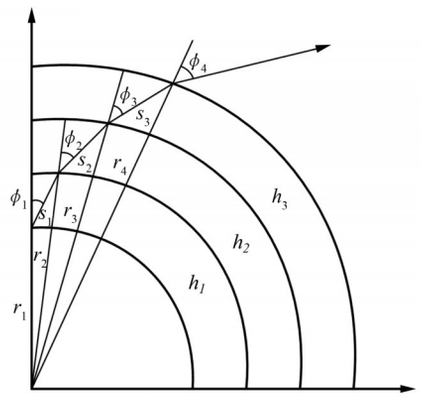


图1 球面分层大气射线追踪示意图

Fig. 1 Diagram of Ray Tracing for Spherical Stratified Atmosphere

$$I_{\mathrm{SPD}}=\sum_{i=1}^{k-1}(h_i-1)s_i+g_{\mathrm{bend}}=1\times10^{-6}\sum_{i=1}^{k-1}N_i s_i+g_{\mathrm{bend}} \tag{2}$$

式中,g_{bend}为射线路径长度与卫星到测站几何直线距离的差值,可用于修正大气折射效应;N_i为大气折射率差;s_i可利用正弦定理计算得出;$h_i(r_i)$可通过测站及周边气象参数(如温度、气压、湿度)结合插值方法获得,故射线追踪方法在对流层精密建模中具有很高的准确性[30]。

1.2 双频RTK残差指标

在RTK定位中,对流层延迟在双差后会被大幅度削减,但并不能完全剔除。研究表明,即使在短基线条件下,大气条件的快速变化也会使站间对流层相关性显著减弱。文献[25]提出了一种双差残差表征方法,用于识别双差残差的主要来源,计算公式为:

$$R_i^{kj}=\frac{T^k-T^j}{\lambda_i}-\left(I^k-I^j\right)\lambda_i+\frac{M_i^{kj}+W_i^{kj}}{\lambda_i} \tag{3}$$

式中,R_i^{kj}表示卫星k、j在i频率上的双差残差值;T^k、T^j分别表示卫星k、j的单差对流层延迟;λ_i表示i频率的波长;I^k、I^j分别表示卫星k、j的差分电离层延迟;M_i^{kj}、W_i^{kj}分别表示在i频率的双差多路径延迟和接收机噪声误差。为刻画双差残差点云的整体分布形态,本文采用基于协方差分析的椭圆拟合方法,设残差点云为$\left\{(x_i,y_i)\right\}_{i=1}^{n}$,其协方差矩阵为:

$$\boldsymbol{P}=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\begin{bmatrix}x_i-\bar{x}\\y_i-\bar{y}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_i-\bar{x} & y_i-\bar{y}\end{bmatrix} \tag{4}$$

对$\boldsymbol{P}$进行特征值分解,可得到特征值$\tau_1\geqslant\tau_2$及对应的特征向量,由此确定椭圆的长、短半轴a、b,计算公式为:

$$a=\gamma\sqrt{\tau_1} \tag{5}$$

$$b=\gamma\sqrt{\tau_2} \tag{6}$$

式中,γ为尺度因子,决定椭圆拟合的范围(本文取$\gamma=3$,表示3σ椭圆)。残差拟合的椭圆相当于点云分布的统计包络,能够直观反映残差的方向性与各向同性特征。为定量评价点云残差分布的各向同性程度,本文进一步采用圆度指标C进行表征,其定义式为:

$$C=\frac{4\pi A}{B^2} \tag{7}$$

式中,A为拟合椭圆面积;B为拟合椭圆周长;圆度C满足$0<C\leqslant 1$。以北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)B1/B3为例,双差残差圆度指标模拟如图2所示。由图2各个子图对比可知,当C接近1时,残差拟合的椭圆形状越接近完美圆形;C值越小,椭圆形状越扁。结合对流层残差而言,圆度越大,说明双差残差中对流层误差越小;反之,则表明对流层误差异常显著,需要进一步处理。

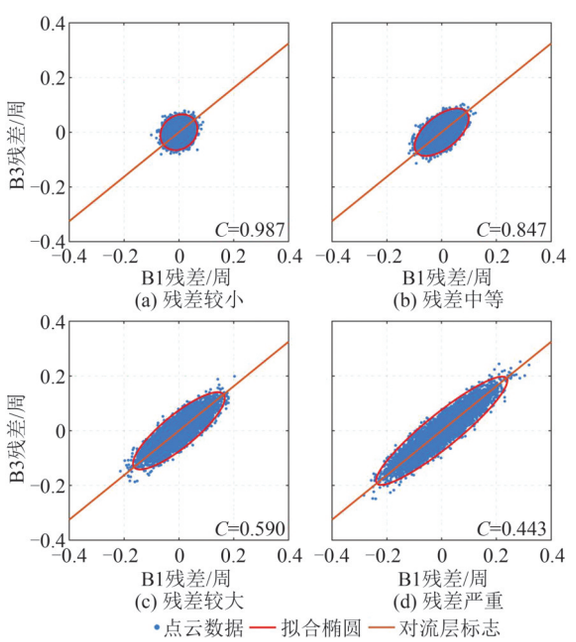


图2　模拟对流层延迟主导的双差残差圆度指标

Fig. 2　Circularity Index of Double-Difference Residuals Dominated by Simulated Tropospheric Delay

1.3　顾及相对梯度的RTK观测方程

一般情况下,参考站m、流动站n对卫星k、j的双差对流层延迟残差可表示为:

$$T_{mn}^{kj}=\left(\mathrm{MF}\left(e^j\right)-\mathrm{MF}\left(e^k\right)\right)\cdot R_{\mathrm{ZTD}_{mn}} \tag{8}$$

式中,MF(e)为映射函数(mapping function, MF);e为卫星高度角;$R_{\mathrm{ZTD}_{mn}}$为参考站m与流动站n之间的相对ZTD。在复杂气象条件下,残差往往表现出明显的方向性,需要引入水平梯度参数进行修正。若考虑对流层梯度,流动站n对卫星j的SPD可表示为:

$$I_{\mathrm{SPD}_n^j}=\mathrm{MF}\left(e^j\right)\cdot I_{\mathrm{ZTD}_n}+\mathrm{MG}\left(e^j\right)\cdot\left(\mathrm{Gn}_n\cdot\cos\alpha_n^j+\mathrm{Ge}_n\cdot\sin\alpha_n^j\right) \tag{9}$$

式中,MG(e)为梯度映射(gradient mapping, MG)函数;Gn_n和Ge_n分别为南北和东西方向的对流层梯度分量;α为卫星方位角;参考站m的表达式类似。由此构造的双差对流层延迟残差为:

$$T_{mn}^{kj}=(I_{\mathrm{SPD}_n^j}-I_{\mathrm{SPD}_n^k})-(I_{\mathrm{SPD}_m^j}-I_{\mathrm{SPD}_m^k}) \tag{10}$$

短距离基线中,有$e_m^j\approx e_n^j$,$\alpha_m^j\approx\alpha_n^j$,将式(9)代入式(10),整理可得:

$$T_{mn}^{kj}=\Delta\mathrm{MF}\left(e^{jk}\right)\cdot R_{\mathrm{ZTD}_{mn}}+\Delta\mathrm{Cn}\cdot R_{\mathrm{Gn}_{mn}}+\Delta\mathrm{Ce}\cdot R_{\mathrm{Ge}_{mn}} \tag{11}$$

式中,$\Delta\mathrm{MF}\left(e^{jk}\right)$为不同卫星下的对流层映射系数差;$R_{\mathrm{Gn}_{mn}}$和$R_{\mathrm{Ge}_{mn}}$分别为南北和东西方向的相对梯度参数;ΔCn和ΔCe分别为南北和东西向的梯度参数系数。$\Delta\mathrm{MF}\left(e^{jk}\right)$、$R_{\mathrm{Gn}_{mn}}$、$R_{\mathrm{Ge}_{mn}}$、ΔCn和ΔCe的计算公式分别为:

$$\Delta\mathrm{MF}\left(e^{jk}\right)=\mathrm{MF}\left(e^j\right)-\mathrm{MF}\left(e^k\right)$$

$$R_{\mathrm{Gn}_{mn}}=\mathrm{Gn}_n-\mathrm{Gn}_m$$

$$R_{\mathrm{Ge}_{mn}}=\mathrm{Ge}_n-\mathrm{Ge}_m$$

$$\Delta\mathrm{Cn}=\mathrm{MG}\left(e^j\right)\cdot\cos\alpha^j-\mathrm{MG}\left(e^k\right)\cdot\cos\alpha^k$$

$$\Delta\mathrm{Ce}=\mathrm{MG}\left(e^j\right)\cdot\sin\alpha^j-\mathrm{MG}\left(e^k\right)\cdot\sin\alpha^k$$

对流层梯度映射函数公式为[31]:

$$\mathrm{MG}(e)=\frac{1}{\sin e\cdot\tan e+Q} \tag{12}$$

式中,Q为调和参数,一般取$Q=0.003\ 2$。基于此,完整的双差观测方程可以写为:

$$\boldsymbol{y}-\hat{\boldsymbol{y}}=\boldsymbol{H}\delta\boldsymbol{x}+\boldsymbol{\varepsilon} \tag{13}$$

$$\delta\boldsymbol{x}=\left[\Delta x\quad\Delta y\quad\Delta z\quad R_{\mathrm{ZTD}_{mn}}\quad R_{\mathrm{Gn}_{mn}}\quad R_{\mathrm{Ge}_{mn}}\quad\nabla N_{mn}^1\quad\nabla N_{mn}^2\quad\cdots\quad\nabla N_{mn}^N\right]^{\mathrm{T}} \tag{14}$$

式中,$\boldsymbol{y}$为实际双差观测值;$\hat{\boldsymbol{y}}$为双差计算值;$\boldsymbol{H}$为设计矩阵;$\delta\boldsymbol{x}$为待估参数;$\boldsymbol{\varepsilon}$为噪声。待估参数包含3个方向坐标分量$\left[\Delta x\quad\Delta y\quad\Delta z\right]$、对流层参数$\left[R_{\mathrm{ZTD}_{mn}}\quad R_{\mathrm{Gn}_{mn}}\quad R_{\mathrm{Ge}_{mn}}\right]$以及单差整周模糊度参数$\left[\nabla N_{mn}^1\quad\nabla N_{mn}^2\quad\cdots\quad\nabla N_{mn}^N\right]$。通过这种参数化方式,RTK模型不仅能够有效地吸收由大高差引起的垂直方向对流层差异,也能表征区域性对流层异常带来的水平梯度影响,从而在复杂的气象环境下提升解算的稳健性与精度。顾及相对梯度的RTK方法监测流程如图3所示。

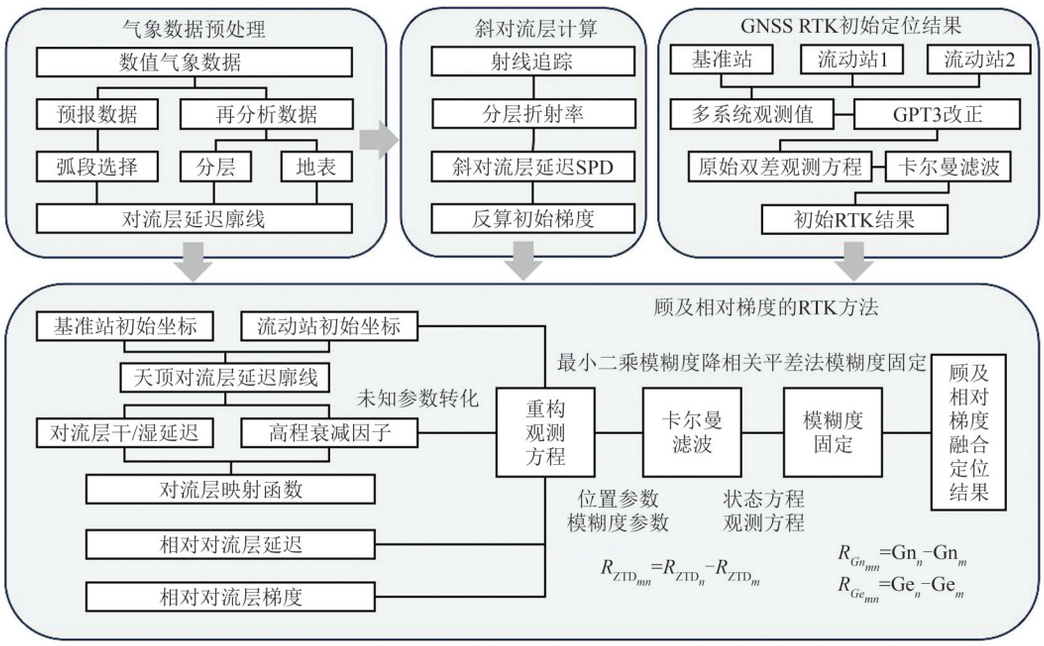


图3 顾及相对梯度的RTK方法监测流程

Fig. 3 Monitoring Process of RTK Method Considering Relative Gradient

2 实验区域与数据

为验证所提方法在复杂气象环境下的有效性,选定中国新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州霍城县果子沟大桥及其周边区域为研究区域。果子沟大桥为双塔双索面钢桁梁斜拉桥,其主跨约360 m,桥面距谷底最大高差约200 m。2024年8月11日,桥址所在的霍城县北部山区发生了由短时强降雨引发的暴雨红色预警事件。桥梁测站及周围环境如图4所示。



图4 桥梁测站及周围环境

Fig. 4 Bridge Observation Stations and Surrounding Environment

1)GNSS数据:GNSS参考站*B*01布设于桥梁附近稳固的山顶基岩上,该点位视野开阔,对空遮挡少,且地基稳定;监测站*R*01布设于桥梁南主塔的塔顶。数据接收时段为2024-08-11,受接收信号影响,只选取3个小时(05:30:00~08:30:00)有效观测时段进行实验。

2)再分析数据:采用欧洲中尺度天气预报中心第五代再分析数据(European centre for medium-range weather forecasts reanalysis v5, ERA5),该数据格网空间分辨率为0.25°×0.25°,时间分辨率为1 h,实验中使用的气象参数包括气压、温度、比湿和重力位势。

3 实验结果与分析

实验采用BDS/GPS(global positioning system)双系统观测值,采样频率为1 Hz,解算模式为短基线RTK,分别构造常规对流层改正RTK(GPT3)、融合气象改正的RTK(FWC)、融合数值气象数据的RTK(FWE)以及引入对流层相对梯度的RTK(FWE_G)4种方案进行对比,使用标

准差(standard deviation, STD)来表示各类方法的精度。RTK实验参数设置如表1所示。

表1　RTK实验参数设置

Table 1　RTK Experimental Parameter Settings

项目	参数设置	
	GPS	BDS
频点	L1+L2	B1+B3
截止高度角/(°)	10	
电离层延迟	忽略	
模糊度固定	最小二乘模糊度降相关平差法[32]	
固定策略	逐历元固定	
对流层延迟	GPT3[19]	模型改正ZTD
	FWC[16]	融合气象数据改正ZTD或SPD
	FWE[16]	融合气象数据改正ZTD+估计相对ZTD残差
	FWE_G	融合气象数据改正ZTD+估计相对ZTD残差+估计相对梯度
随机模型	高度角定权[33] $\begin{cases}1, e>30^\circ\\ 1/(2\sin e), e\leqslant 30^\circ\end{cases}$	
映射函数	全球映射函数[34]	

3.1　射线追踪结果及改正分析

为了清晰地展示暴雨过程的斜对流层变化,利用射线追踪方法计算基站不同方位角和高度角上对流层延迟的差异,计算结果如图5所示,其中,SPD差异为SPD计算值与每层高度角上的SPD平均值之差。由图5可知,对流层SPD随时间变化明显,SPD差异随高度角的降低而增大,且不同方向的SPD差异较大。实验时段内,SPD差异存在明显的南北向梯度,表现为南侧偏高、北侧偏低。具体而言,指向桥梁南侧的SPD差值普遍为正值,而指向北侧方向的SPD差值普遍为负值,尤其是高度角在10°~15°时差异更为明显。这种空间分布特征表明,对流层水汽场存在水平方向的差异,且差异近似由北向南递增。随着时间的推移,差异形态不断变化,西方向的差异变化明显,反映出对流层异常不仅具有显著的空间不均匀性,还伴随明显的时间演化过程。

图6分别给出了由FWC方法和GPT3模型改正对流层延迟后的*R*01测站分别在东(east, E)、北(north, N)、天(up, U)3个方向的位移序列。由图6可知,在水平方向上,相比于直接采用GPT3模型,FWC方法的结果差异较小,仅在N方向上有略微改善。但在垂向分量上,两种方法的时间序列存在约7 mm的系统偏移。此外,FWC方法计算出的垂向序列STD精度提升了约6.3%,位移整体偏移得到了一定的抑制。上述情况表明,不同的对流层延迟改正方法,其改正量的差异不仅影响基线解算的相对位移,也会导致一定量的绝对位移。FWC方法顾及了SPD随时间的变化,对低高度角的对流层延迟刻画也比常规GPT3模型准确,故其有较高的精度。

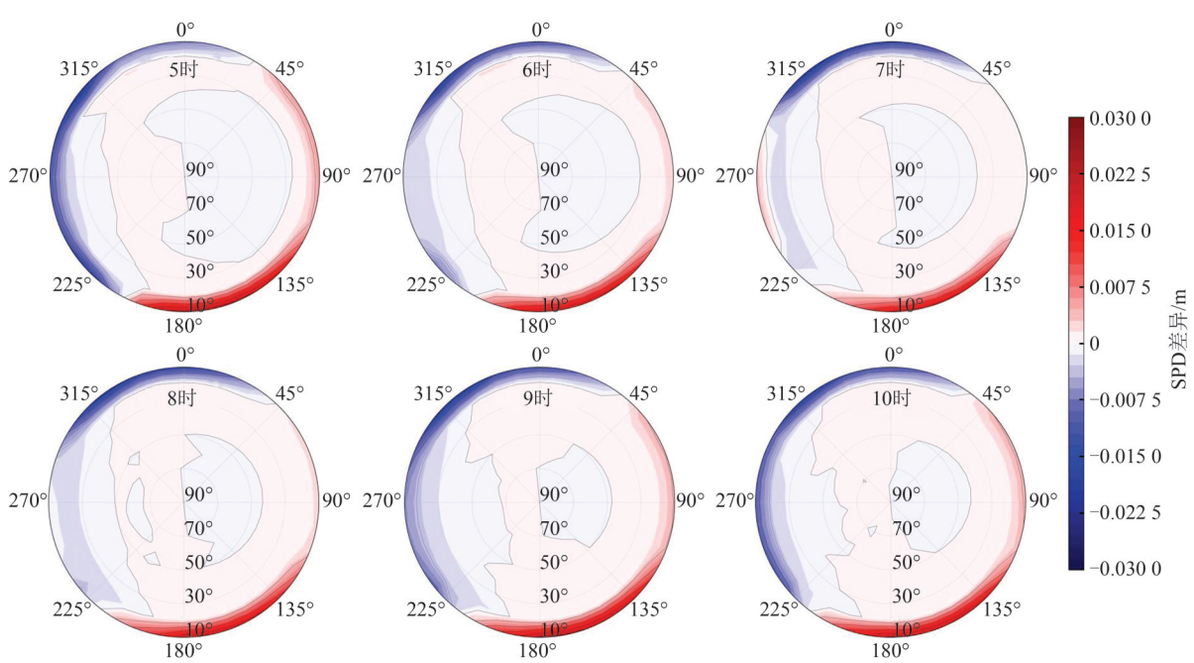


图5　逐时段基站斜对流层水平差异

Fig. 5　Hourly Horizontal Difference of Slant Troposphere at Base Station

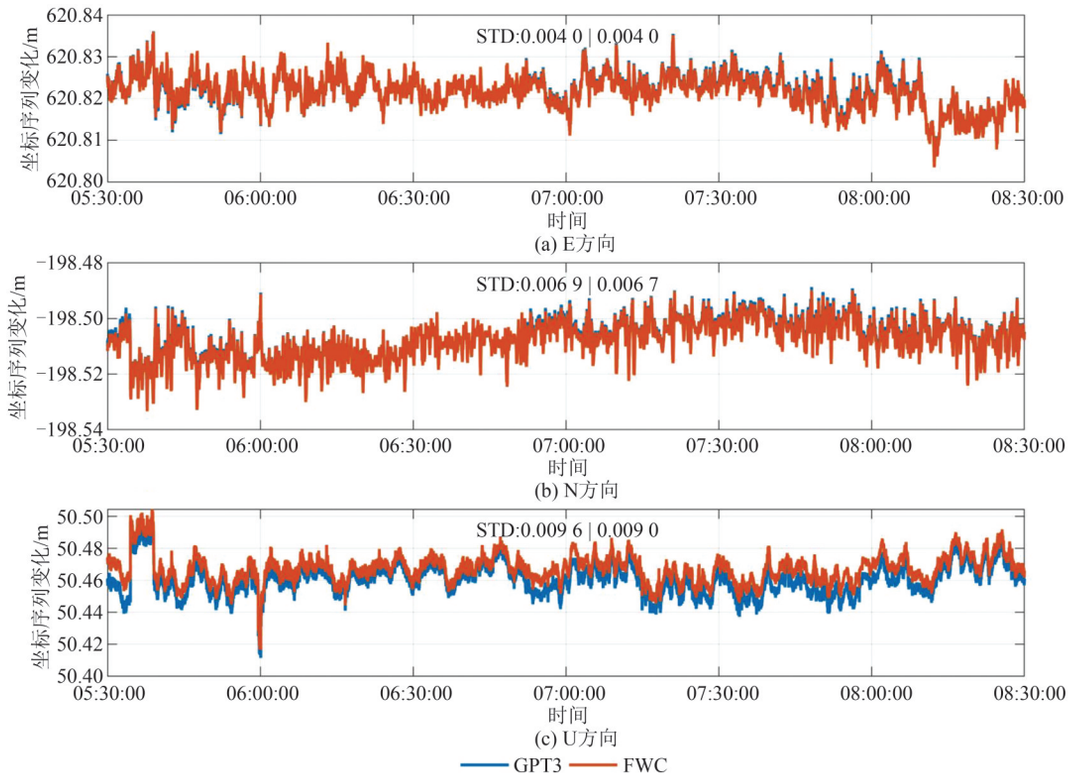


图6 射线追踪算法和GPT3模型计算的*R*01测站位移序列

Fig. 6 Displacement Series of *R*01 Station Calculated by Ray-Tracing Algorithm and GPT3 Model

为进一步说明两种方法在低高度角上的改正值差异,本文计算了10°高度角条件下,两个测站之间的SPD差异在不同方位角上的分布情况,如图7所示。

由图7可知,采用GPT3+全球对流层映射函数(global mapping function, GMF)模型计算的站间对流层延迟差异约为−0.065 m,且呈现各向同性分布。而基于射线追踪算法得到的站间延迟差异则在−0.080~−0.070 m之间,并表现出随方位角变化的明显特征。整体曲线形态说明在RTA条件下,对流层残差在水平方向上存在显著梯度差异,而一般模型的解算精度有限。需

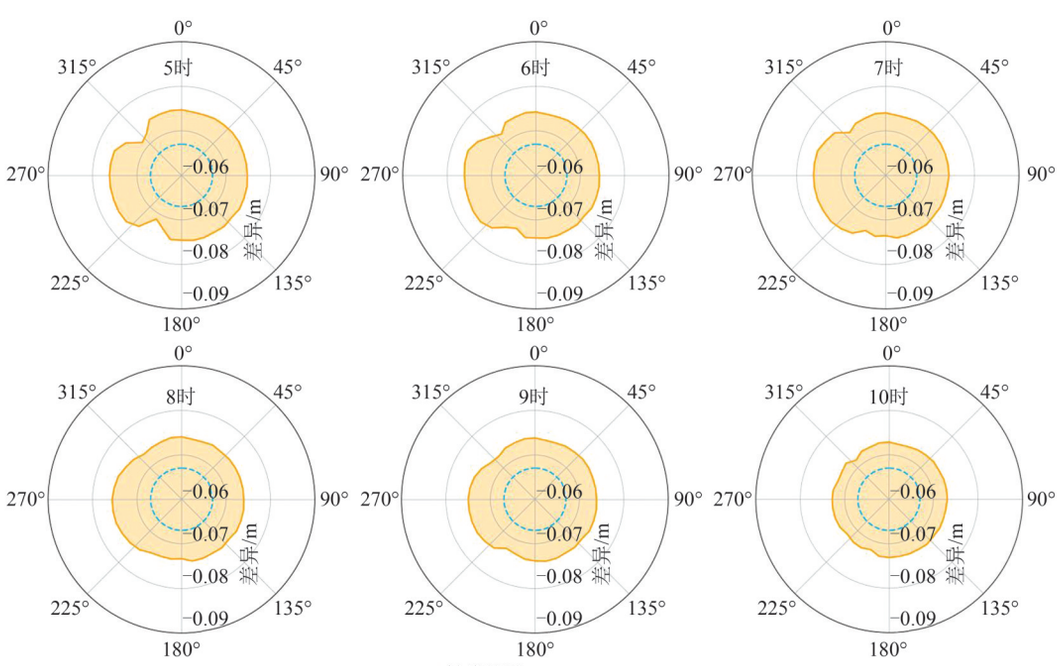


图7 10°高度角下的站间对流层延迟差异

Fig. 7 Inter-Station Tropospheric Delay Difference at the Elevation Angle of 10°

要指出的是,虽然FWC方法较GPT3模型的精度有所提升,但由于所用ERA5气象数据在时空分辨率上的限制,对于空间尺度仅数千米、持续时间仅数十分钟的局地强对流暴雨过程,该分辨率的气象数据难以完全准确描述水汽场的结构与瞬时突变梯度。因此,本文提出在FWE模型中引入相对梯度参数,以实时表征并补偿水平方向上的对流层延迟变化。

3.2　顾及相对梯度改正分析

图8展示了在BDS单系统模式下,使用GPT3模型、FWE方法和本文提出的FWE_G方法的时间序列对比结果。

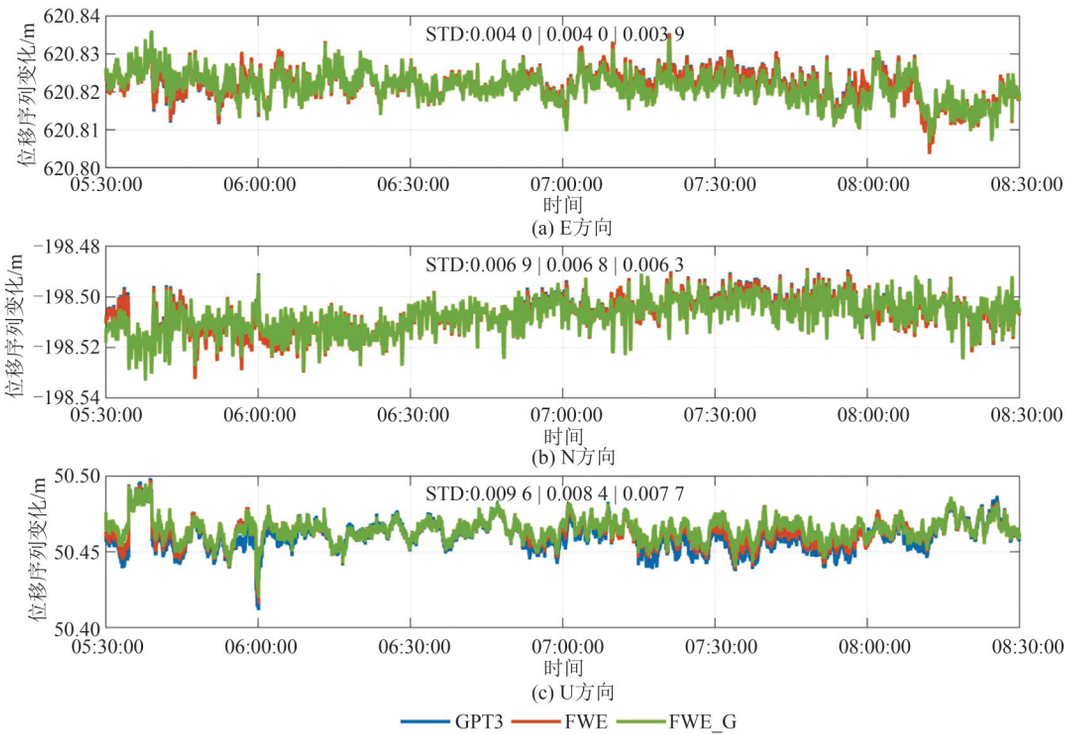


图8　BDS单系统模式下3种方法计算的位移时间序列对比结果

Fig. 8　Comparison of Displacement Time Series Calculated by Three Methods in Single BDS System Mode

由图8可知,相比于仅采用FWE方法约束ZTD的方案,FWE_G方法在暴雨时段的三维位移时间序列表现更优,尤其在N、U两个方向上精度提升显著。具体而言,在U方向上,FWE_G方法的STD精度较传统的GPT3模型和FWE方法分别提升了约19.8%和8.3%;而在N方向上,FWE_G方法的定位精度相较于GPT3模型和FWE方法分别提升了约8.7%、7.2%。这验证了FWE_G方法不仅能够有效补偿垂直方向上的对流层延迟差异,更表明其具备提升水平方向上精度的优势。整体来看,在暴雨影响的整个时段内,FWE_G方法均能取得更优的定位精度,有助于将真实的结构响应信号从复杂的大气扰动背景中更清晰地分离出来,从而验证了引入相对梯度对于增强RTK垂向稳定性的积极作用。

为进一步探究梯度约束方法对单系统及多系统融合解算的提升效果,本文分别统计了BDS单系统(C)、GPS单系统(G)以及GPS+BDS双系统(GC)组合3种模式下E、N、U 3个方向的STD定位误差,结果如图9所示。

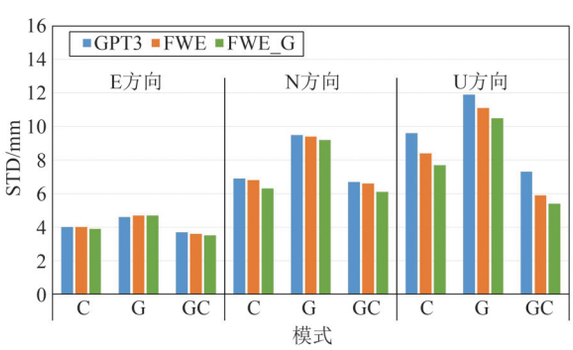


图9　BDS单系统、GPS单系统和BDS+GPS双系统组合在3个方向的误差统计

Fig. 9　Error Statistics in Three Directions for Single BDS, Single GPS and Combined BDS+GPS Dual-System Modes

由图9可知,在采用GPT3模型时,3种系统组合均呈现出垂向误差显著大于水平误差的特征,垂向误差最高可达水平误差的两倍。引入相对梯度参数后,3种模式在水平分量上的精度改善有限,相较于GPT3方法,E方向与N方向的平

均精度分别提升约1.6%和6.5%;而垂向分量精度提升明显,其平均精度提升约18.1%。相较于FWE方法,FWE_G在N、U方向上的平均精度进一步提升,分别提高5.3%和7.1%。这表明FWE方法估计ZTD时只能部分吸收大尺度的共同误差,而引入梯度项才能有效吸收方位向的非均匀残差。

从不同系统模式的定位精度对比来看,BDS单系统在E、N、U 3个方向上的精度均显著优于GPS单系统,分别高出约15.0%、28.9%和23.4%。经分析,其主要原因在于BDS在实验期间的有效观测卫星数量约为GPS的两倍,且卫星几何构型更为优越。相比之下,BDS+GPS双系统组合的精度表现最为稳定,各项误差指标均明显优于任一单一系统。此外,双系统组合对FWE_G方法的提升效果最为显著,表明在观测几何条件更优、观测冗余度更高的情形下,模型中新增的相对梯度参数能够被更稳定地估计,从而更有效地吸收和抑制方向性残差,最终实验得到3个方向的最优监测精度分别为3.1 mm、6.1 mm和5.4 mm。

为直观展示实验过程中相对对流层延迟与相对梯度的变化,3种模式解算的参考站与流动站之间的相对ZTD及相对水平梯度的时间序列如图10所示。由图10可知,不同GNSS系统解算得到的相对对流层延迟主要分布在±2.5 mm范围内,相对梯度值则主要分布于±1 mm区间。分析表明,在实验时段内,相对对流层延迟分量与相对梯度分量的时序波动具有明显的同步性。这一现象表明,RTA不仅表现为大气整体可降水量的显著增加,还伴随着水平方向水汽分布均匀性的破坏,即水平梯度的显著增强。与相对天顶延迟相比,解算获得的相对梯度曲线在实验阶段未出现剧烈发散,且南北与东西方向的相对梯度估值表现出较好的一致性。该结果表明,本文所采用的相对梯度估计策略能够在有效维持滤波稳定性的前提下,灵敏响应ZTD的异常变化,从而显著增强模型对RTA信号的捕捉与刻画能力。

3.3 残差指标分析

为了进一步验证FWE_G方法的有效性,本文结合双频残差分析和圆度指标法,在不同系统解算模式下进行各个卫星和全部卫星的残差圆度指标C统计,结果分别如图11、图12所示。

由图11可知,双系统解算模式的效果优于单系统模式,各卫星的残差圆度指标均得到有效提

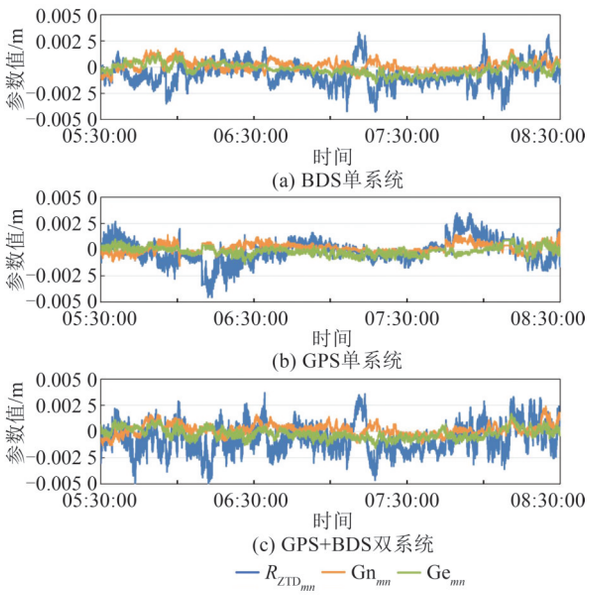


图10 3种系统模式解算的相对对流层延迟和相对梯度序列

Fig. 10 Relative Troposphere Delay and Relative Gradient Time Series Solved by Three System Modes

升。相对BDS单系统,GPS单系统的整体圆度值更接近1,表明其残差受本次对流层异常引起的方向性扰动相对较弱,这可能与GPS可视卫星数量较少且主要分布于较高高度角有关。在引入FWE方法后,多数卫星的圆度值明显提高,说明估计ZTD残差能够有效削弱大尺度的共同性对流层误差。进一步采用FWE_G方法后,卫星圆度的提升更为普遍且幅度更大,这意味着改进后的模型不仅吸收了天顶延迟残差,还更有效地建模并分离了方位向的非均匀性残差。需要指出的是,图11中仍有少数卫星的圆度值偏低,这通常与低高度角下的多路径效应、信号遮挡、观测噪声或周跳修复残差等非对流层因素有关。

由图12可知,在BDS单系统下,GPT3模型的总圆度仅为0.780,残差点云呈显著的椭圆拉伸形态;采用FWE方法后,总圆度提升至0.894,而FWE_G方法的总圆度进一步提升至0.951,相对GPT3和FWE分别提升约21.9%和6.4%。这表明,梯度约束显著削弱了异常时段对流层残差的方向性主导特征。对于GPS单系统,3种方法获得的总圆度均维持在较高水平,均大于0.940,说明本次实验时段内,GPS观测残差受对流层方向性扰动的影响相对有限,但FWE_G方法仍带来了可观的去方向性增益。对于BDS+GPS双系统组合,GPT3、FWE、FWE_G的总圆度分别为0.806、0.881和0.926,相较于GPT3和FWE,FWE_G分别提升约14.9%和5.1%,且残差点云

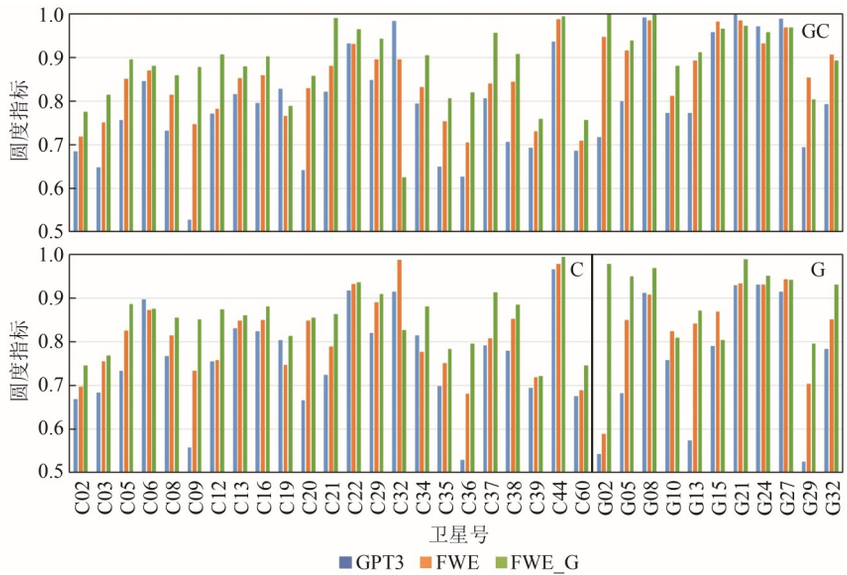


图 11　各个卫星圆度指标分类统计

Fig. 11　Classification Statistics of Circularity Index for Each Satellite

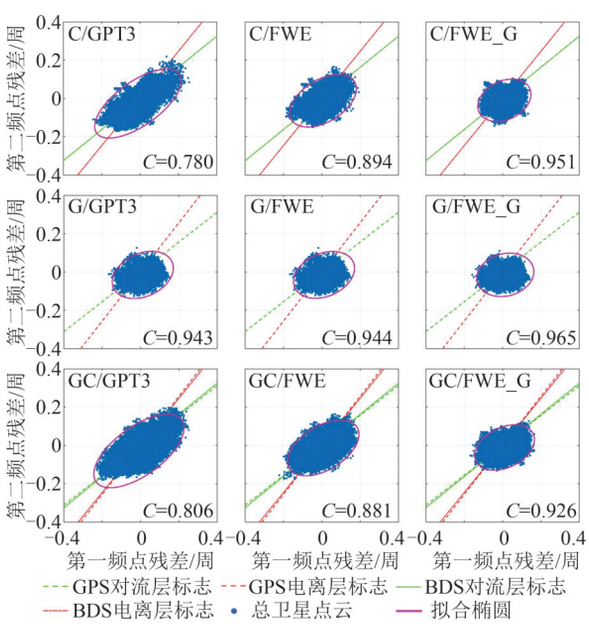


图 12　全部卫星总双频残差散点分布及总圆度指标

Fig. 12　Scatter Distribution of Total Dual-Frequency Residuals and Overall Circularity Indicators for All Satellites

分布更接近圆形。这反映出在观测几何构型更优、冗余度更高的组合系统中,梯度先验信息能够被更稳定地估计和吸收,从而更有效地抑制方位向残差。

4　结　语

本文针对RTA导致短基线RTK桥梁监测中垂向定位误差过大的工程难题,提出了一种顾及相对对流层延迟梯度的RTK监测方法,并建立了双差残差圆度指标,增强了对方向性延迟残差的抑制与解释能力。主要结论如下:

1)RTA环境下水平方向的对流层延迟差异不可忽视。通过对比射线追踪算法与GPT3/GMF模型计算的SPD结果发现,RTA环境下的SPD呈现典型的非各向同性空间分布特征。若在定位解算中未对其进行有效建模,将直接导致桥梁垂向位移监测序列出现系统性偏移与异常波动,将会严重影响监测数据的准确性与可靠性。

2)FWE_G方法能够提升RTA环境下的桥梁监测精度与稳定性。在暴雨场景下,相较于GPT3模型,BDS单系统采用FWE_G方法后垂向精度提升约19.8%,N向精度提升约8.7%。结果表明,相对梯度参数能够有效吸收方位向各向异性残差,进一步提升垂向与水平方向的监测稳定性。

3)FWE_G方法改善了RTA环境下的残差分布特性。采用FWE_G方法后,BDS单系统的圆度指标较GPT3模型提升约21.9%;BDS+GPS双系统的圆度指标相对提升约14.9%。该结果证实,顾及相对梯度的策略能够显著削弱异常时段残差的方向性主导特征。同时,所提圆度指标为后续构建复杂环境下的自适应监测模型提供了定量依据。

参考文献

[1]　MSAEWE H A, PSIMOULIS P A, HANCOCK C M, et al. Monitoring the Response of Severn Suspension Bridge in the United Kingdom Using Multi-

GNSS Measurements[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2021, 28(11): e2830.

[2] YU J Y, MENG X L, YAN B F, et al. Global Navigation Satellite System-Based Positioning Technology for Structural Health Monitoring: A Review [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2020, 27(1): e2467.

[3] 蔡子睿, 刘洋, 陈渠森, 等. 基于非差观测值的北斗短基线处理方法及其在变形监测中的精度验证[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2026. https://doi.org/10.13203/j.whugis20250310.
CAI Zirui, LIU Yang, CHEN Qusen, et al. Undifferenced Observation-Based Short-Baseline BDS Processing with Accuracy Assessment for Deformation Monitoring[J/OL]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2026. https://doi.org/10.13203/j.whugis20250310.

[4] QU X Y, DING X L, XU Y L. Simultaneous Monitoring of Displacement and Rotation of a Long-Span Bridge Based on Innovative Integration of GNSS and Accelerometer Measurements[J]. *Engineering Structures*, 2025, 338: 120518.

[5] XUE C Y, PSIMOULIS P, HORSFALL A, et al. Assessment of the Accuracy of Low-Cost Multi-GNSS Receivers in Monitoring Dynamic Response of Structures [J]. *Applied Geomatics*, 2023, 15(2): 315-326.

[6] YANG H, LI X, DU Y, et al. Accelerometer Static State Detection (SSD)-Assisted GNSS/Accelerometer Bridge Monitoring Algorithm [J]. *Measurement Science and Technology*, 2024, 35(10): 106309.

[7] 李亚飞, 姚宜斌, 祁敏敏, 等. 利用GNSS进行强涌潮河口大闸形变监测与潮汐响应分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2026, 51(1): 199-206.
LI Yafei, YAO Yibin, QI Minmin, et al. Deformation Monitoring and Tidal Response Analysis of Strong Surge Tide Estuary Sluice with GNSS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2026, 51(1): 199-206.

[8] JIANG Y Y, WANG J F. Extracting Relevant Patterns from GNSS Observations to Mitigate Multipath in RTK Deformation Monitoring[J]. *GPS Solutions*, 2024, 28(4): 200.

[9] JING C, BERTOLESI E, HUANG G W, et al. Predicting Accelerometer Baseline Correction and Nondivergent Deformation Velocity Based on Convolutional Neural Network (CNN) During GNSS Downgrade[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(7): 11982-11994.

[10] VAZQUEZ-ONTIVEROS J R, VAZQUEZ-BECERRA G E, QUINTANA J A, et al. Implementation of PPP-GNSS Measurement Technology in the Probabilistic SHM of Bridge Structures[J]. *Measurement*, 2021, 173: 108677.

[11] GAO R, LIU Z Z, ODOLINSKI R, et al. Hong Kong - Zhuhai - Macao Bridge Deformation Monitoring Using PPP-RTK with Multipath Correction Method[J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(4): 195.

[12] WANG X P, ZHAO Q Z, XI R J, et al. Review of Bridge Structural Health Monitoring Based on GNSS: From Displacement Monitoring to Dynamic Characteristic Identification [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 80043-80065.

[13] MENG X L, NGUYEN D T, XIE Y L, et al. Design and Implementation of a New System for Large Bridge Monitoring—GeoSHM[J]. *Sensors*, 2018, 18(3): 775.

[14] AHN Y W, KIM D, DARE P, et al. Local Tropospheric Anomaly Effects on GPS RTK Performance [C]//The 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Fort Worth, USA, 2006.

[15] LI X, HUANG G W, ZHANG Q, et al. A New GPS/BDS Tropospheric Delay Resolution Approach for Monitoring Deformation in Super High-Rise Buildings[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(3): 90.

[16] LIU G L, HUANG G W, LI X, et al. Fusion of Numerical Meteorological Data to Mitigate Residual Tropospheric Error in GNSS RTK for Large Bridge Monitoring in Mountainous Areas [J]. *Measurement*, 2025, 243: 116442.

[17] 姚宜斌, 张良, 张琦, 等. 面向大高差RTK的对流层延迟改正模型及实时差分服务构建[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1019-1028.
YAO Yibin, ZHANG Liang, ZHANG Qi, et al. Tropospheric Delay Model and Real-Time Differencial Service for Large Height Difference RTK[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1019-1028.

[18] SAASTAMOINEN J. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites[M]//The Use of Artificial Satellites for Geodesy. Washington D C: American Geophysical Union, 2013: 247-251.

[19] LANDSKRON D, BÖHM J. VMF3/GPT3: Refined Discrete and Empirical Troposphere Mapping Functions[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(4): 349-360.

[20] 高壮, 何秀凤, 常亮. GPT3模型在中国地区的精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46

(4): 538-545.
GAO Zhuang, HE Xiufeng, CHANG Liang. Accuracy Analysis of GPT3 Model in China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(4): 538-545.

[21] ZHANG L, ZHANG Q, YAO Y B, et al. Refining Empirical Tropospheric Model with Meteorological Stations for Large Height Difference RTK Positioning [J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(3): 138.

[22] XU Y, WU C, LI L, et al. GPS/BDS Medium/Long-Range RTK Constrained with Tropospheric Delay Parameters from NWP Model [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 1113.

[23] LIU Y, GAO Z Z, XU Q Z, et al. Assessing Partial Ambiguity Resolution and WZTD-Constraint Multi-frequency RTK in an Urban Environment Using New BDS Signals[J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(3): 88.

[24] 高兴旺, 李付岗, 张秋昭, 等. 大型桥梁桥塔监测的GNSS相对对流层延迟估计[J]. 测绘科学, 2021, 46(2): 42-47.
GAO Xingwang, LI Fugang, ZHANG Qiuzhao, et al. GNSS Relative Tropospheric Delay Estimation for Large Bridge Pylon Monitoring[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(2): 42-47.

[25] LAWRENCE D, LANGLEY R B, KIM D, et al. Decorrelation of Troposphere Across Short Baselines [C]//IEEE/ION Position, Location, and Navigation Symposium, Coronado, USA, 2006.

[26] KUBO Y, TANAKA H, OHASHI M, et al. Long Baseline GNSS Relative Positioning with Estimating Ionospheric and Tropospheric Delays and Their Gradients[J]. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2012, 8(3B): 2375-2388.

[27] HUANG L K, LIU F F, GUO L J, et al. An ERA5 Tropospheric Parameters-Augmented Approach for Improving GNSS Precise Point Positioning [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2023, 14(5): 467-476.

[28] 章迪. GNSS对流层天顶延迟模型及映射函数研究[J]. 测绘学报, 2022, 51(9): 1984.
ZHANG Di. The Study of the GNSS Tropospheric Zenith Delay Model and Mapping Function[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(9): 1984.

[29] HOFMEISTER A, BÖHM J. Application of Ray-Traced Tropospheric Slant Delays to Geodetic VLBI Analysis[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(8): 945-964.

[30] XU Y, YANG Z Z, ZHOU H Z, et al. An Initial Investigation of the Non-isotropic Feature of GNSS Tropospheric Delay [J]. *Satellite Navigation*, 2024, 5(1): 2.

[31] CHEN G, HERRING T A. Effects of Atmospheric Azimuthal Asymmetry on the Analysis of Space Geodetic Data [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B9): 20489-20502.

[32] TEUNISSEN P J G. The Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment: A Method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation[J]. *Journal of Geodesy*, 1995, 70(1): 65-82.

[33] AN X D, MENG X L, CHEN H, et al. Combined Precise Orbit Determination of GPS and GLONASS with Ambiguity Resolution[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(12): 2585-2603.

[34] BOEHM J, NIELL A, TREGONING P, et al. Global Mapping Function (GMF): A New Empirical Mapping Function Based on Numerical Weather Model Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(7): 2005GL025546.