



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Precise Positioning and Geoinformation Science—Article

GSeisRT — 应用于广域实时地震监测的北斗/GNSS精密单点定位引擎

耿江辉^{a,*}, 张昆仑^a, 辛绍铭^a, 郭将^a, David Mencin^b, 王坦^c, Sebastian Riquelme^d,
Elisabetta D'Anastasio^e, Muhammad Al Kautsar^f

^a GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

^b EarthScope Consortium, Washington, DC 20005, USA

^c China Earthquake Networks Center, China Earthquake Administration, Beijing 100045, China

^d Seismic Risk Program, National Seismological Center, University of Chile, Santiago 8370456, Chile

^e GNS Science Te Pu Ao, Avalon 5011, New Zealand

^f Geospatial Information Agency, Cibinong 16911, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 September 2023

Revised 23 February 2024

Accepted 14 March 2024

Available online 15 April 2024

关键词

实时

精密单点定位

多系统

地震监测

快速地震响应

摘要

在地震/海啸早期预警中,精确的同震位移对于实时描述地震特征至关重要,以支持决策者发布公共安全警报。实时全球卫星导航系统(GNSS)已成为监测地震运动的有力工具,支持无偏地获取地面永久位移。作为提供给地震社区的宝贵工具,武汉大学自主研发的GSeisRT软件平台能够实现多系统精密单点定位及模糊度固定(PPP-AR),并支持厘米级至亚厘米级的实时定位精度。尽管目前全球精密单点定位(PPP)服务的稳定维持仍然具有挑战性,但GSeisRT能够利用区域GNSS网络实时估计精密卫星钟差和相位偏差产品。这一能力使得GSeisRT特别适用于专有GNSS网络的处理,并能够获得尽可能高的定位精度和可靠性。美国NOTA网络的实时定位结果显示,24 h内动态PPP-AR在东、北和高程分量上的平均均方根(RMS)误差分别低至1.2 cm、1.3 cm和3.0 cm。而在典型地震事件持续的几分钟内,GSeisRT可实现小于4 mm的水平位移精度。GSeisRT区域PPP/PPP-AR的定位精度相比全球PPP/PPP-AR提升约30%~40%。自2019年以来,GSeisRT已成功实时记录了2020年墨西哥瓦哈卡7.4级地震、2020年美国加利福尼亚州孤松5.8级地震以及2021年中国青海7.3级地震的静态、动态和地面峰值位移,震级估计误差仅为0.1左右。GSeisRT软件向科学界开放使用,并已部署运行于中国地震台网中心、美国EarthScope联盟、智利国家地震中心、新西兰地质与核科学研究所以及印度尼西亚地理空间信息局。

© 2024 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. 引言

全球卫星导航系统(GNSS)精密单点定位(PPP)技术在地震监测中的应用日益增多[1–2]。利用高频GNSS可以直接计算同震位移,并用于快速准确地确定震级、计算矩张量以及进行有限断层建模,旨在实现地震/海啸早

期预警(EEW/TEW),尤其是针对大型地震事件[3–8]。PPP本质上是一种使用单台GNSS接收机的全球定位技术,非常适合地震监测。尽管单台GNSS定位精度可轻松达到毫米级,高频或动态定位可通过增加伽利略系统和北斗系统(BDS)进一步提升,从而在位移分辨率方面得到显著提高[9–11]。Xu等[12]报道,在典型地震事件持续的几分

* Corresponding author.

E-mail address: jgeng@whu.edu.cn (J. Geng).

2095-8099/© 2024 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2025, 47(4): 57–69

引用本文: Jianghui Geng, Kunlun Zhang, Shaoming Xin, Jiang Guo, David Mencin, Tan Wang, Sebastian Riquelme, Elisabetta D'Anastasio, Muhammad Al Kautsar. GSeisRT: A Continental BDS/GNSS Point Positioning Engine for Wide-Area Seismic Monitoring in Real Time. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.03.012>

钟内，高频全球定位系统（GPS）可达到毫米级精度[13]。与单GPS定位结果相比，多系统GNSS的精度通常高出30%~60%；更具体地说，即使在24 h时间跨度内，水平分量相对于真值的均方根（RMS）误差也可低至几毫米[14–16]。此外，整数模糊度固定可进一步提高振动检测中的定位精度，尤其是对于东向分量效果显著[17]。

然而，在现实世界中，对于高时效性的高精度地震监测，实时精密单点定位（PPP）仍然具有挑战性。从技术角度来看，实时全球导航卫星系统（GNSS）应具备识别大陆范围内广域毫米级变形的能力[18]。大地震事件往往沿长断层发生，并摧毁大片区域；例如，2002年的德纳里地震就伴随着约340 km的地表破裂[19]。然而，与事后处理产品相比，实时场景通常伴随着相对较差的卫星轨道和钟差产品质量[20–22]。更糟糕的是，与短基线场景相比，全球网络计算的卫星钟差和相位偏差产品需要应对更复杂的误差消除[23]。另一方面，从工程实践角度来看，实时GNSS通常采用服务器/客户端连接的结构，因此一旦服务器/客户端连接中断或宕机，系统就会暴露在风险之中。高精度GNSS定位需要服务端使用距离遥远的测站甚至全球参考网络计算校正流（即卫星轨道、钟差和偏差）。由于全球的实时连接跨越了不同的数据来源，校正流几乎不可避免地会受到任何明显的延迟或不连续性影响，从而降低了实时定位的时效性。

目前，大多数现有的实时精密单点定位（PPP）引擎被设计为接收外部甚至第三方的卫星产品，而这些产品通常依赖于全球网络流式传输的基准观测数据[24–25]。因此，在实际应用中可观察到高达数十秒的延迟，甚至卫星产品流的反复丢失。一种情况是服务端无法计算卫星钟差产品，这主要是由于其频繁与多个参考站断开连接。对于现有的公共/非商业实时全球卫星导航系统（GNSS）服务（如快速地质灾害响应）而言，这一问题可能相当普遍。另一种情况是，将全球数据流汇聚到服务端以进行卫星产品计算的过程相对较慢。数据提供商在互联网连接方面的基础设施各不相同，这使得实时数据收集更为复杂。

在本研究中，我们建立了一个更为自主的实时精密单点定位（PPP）引擎，命名为PRIDE GSeisRT，该引擎致力于地震监测应用。具体而言，GSeisRT通过处理大陆级网络观测数据来实时计算卫星钟差和相位偏差产品，然后将这些产品传送到本地站点，实现以毫米级位移分辨率捕捉地面运动。当应用于由官方机构运营和管理的洲级或国家级全球卫星导航系统（GNSS）网络时，GSeisRT尤其具有优势。这是因为计算卫星产品使用的参考网络和监测地震运动所使用的本地网络数据可以从同一来源接入，这

极大地简化了数据管理，并减少了数据连接的延迟和不连续性。通过这种方式，可以尽可能地满足快速地震响应的关键时效性要求。值得注意的是，GSeisRT并不估计卫星轨道，而是从第三方（如国际GNSS服务（IGS）[26]）获取轨道产品，因为区域网络无法用于估计可靠的轨道。幸运的是，IGS的预报卫星轨道产品覆盖了未来24 h的时间弧段，并且很少受到服务器端故障或产品传输的影响。当前的超快速轨道可以达到厘米级精度，可以满足GSeisRT服务端的精度要求[27]。

自2019年以来，GSeisRT已与美国EarthScope联盟[运营美国网络（NOTA，980个站点）]、中国地震台网中心[运营中国地壳运动观测网络（CMONOC，260个站点）]、智利国家地震中心（CSN，50个站点）、新西兰地质与核科学研究所（GNS，53个站点，其中37个代表新西兰国土信息局运营）以及印度尼西亚地理空间信息局（BIG，386个站点）合作，应用于多个地震多发地区。本文结构如下：第2节将介绍GSeisRT中的GNSS卫星产品估计、精密单点定位以及模糊度固定（PPP-AR）；第3、第4节详细描述实时数据和实验配置；第5~7节展示并分析上述所有网络的相关结果；第8节给出结论。

2. 方法

在频率 q 上，从卫星 j 到接收机 i 的GNSS观测方程可表示如下：

$$\begin{cases} \lambda_q \varphi_{i,q}^j = \rho_i^j + c(t_i - t^j) + m_i^j T_i - g_q^2 I_i^j + \lambda_q N_{i,q}^j \\ P_{i,q}^j = \rho_i^j + c(t_i - t^j) + m_i^j T_i + g_q^2 I_i^j \end{cases} \quad (1)$$

式中， $\varphi_{i,q}^j$ 和 $P_{i,q}^j$ 分别为频率 f_q 上的载波相位和伪距观测值； $\lambda_q (q=1,2,\dots)$ 为相应信号的波长； ρ_i^j 为从卫星 j 到接收机 i 的几何距离； c 为光在真空中的传播速度； t_i 和 t^j 分别为接收机端钟差和卫星端钟差； m_i^j 为将天顶对流层延迟 T_i 投影到视线方向的映射函数； $g_q = \frac{f_1}{f_q}$ 为电离层延迟 I_i^j 的缩放因子， f_1 和 f_q 为相应信号的频率； $N_{i,q}^j$ 为模糊度参数。需要注意的是，为简洁起见，此处忽略了硬件延迟、多路径效应和测量噪声。

GSeisRT中使用了双频无电离层线性组合：

$$\begin{cases} L_{i,0}^j = \frac{g_2^2}{g_2^2 - 1} \lambda_1 \varphi_{i,1}^j - \frac{1}{g_2^2 - 1} \lambda_2 \varphi_{i,2}^j \\ \quad = \rho_i^j + c(t_i - t^j) + m_i^j T_i + \lambda_1 N_{i,0}^j \\ P_{i,0}^j = \frac{g_2^2}{g_2^2 - 1} P_{i,1}^j - \frac{1}{g_2^2 - 1} P_{i,2}^j \\ \quad = \rho_i^j + c(t_i - t^j) + m_i^j T_i \end{cases} \quad (2)$$

式中，“0”表示无电离层组合，而“L”表示以米为单位的载波相位观测值。

2.1. 利用历元间差分载波相位确定卫星钟差

卫星钟差通常使用非差观测值进行估计。虽然这种策略在全球观测网络中效果良好，但在区域观测网络中，由于缺少对卫星的连续跟踪，卫星钟差估计值会反复经历持续数小时的重新初始化。初始化阶段的卫星钟差精度较低，无法确保毫米级的位移监测精度。更糟糕的是，一颗卫星最多只会经过区域观测网络几个小时，没有足够的时间让钟差估计值收敛到足够高的精度。此外，采用非差观测网络需要同时估计大量的模糊度参数，这是一项计算密集型任务[28]。因此，为减轻计算资源的压力，目前实时卫星钟差产品的采样率仅为5~10 s。

因此，GSeisRT采用了参考文献[28]中提出的方法，该方法除了使用未差伪距观测外，还使用消除模糊度参数的历元差分载波相位观测来估计高速率卫星钟差；即

$$\begin{cases} \Delta L_{i,0}^j(k) = c\Delta t_i(k) - c\Delta t^j(k) + \Delta m_i^j(k)T_i(k) \\ P_{i,0}^j(k) = \rho_i^j(k) + ct_i(k) - ct^j(k) + m_i^j(k)T_i(k) \\ t^j(k) = t^j(0) + \sum_{n=1}^k \Delta t^j(n) \end{cases} \quad (3)$$

式中， k 为历元索引； Δ 为历元间差分运算； $\Delta t^j(k)$ 为历元 k 相对于历元 $(k-1)$ 的卫星钟差变化； $t^j(0)$ 为历元“0”时的绝对钟差估计； n 为求和索引，范围从1到 k 。因此， k 历元的卫星钟差[即 $t^j(k)$]是通过将历元 $1-k$ 至 $t^j(0)$ 的钟差变化累加得到的。值得一提的是， $t^j(0)$ 的数值在式(3)中由伪距主导，因此可能在精度方面有所损失。幸运的是，对于区域观测网络而言，在卫星 j 升起后数十分钟内， $t^j(0)$ 的估值即可稳定（即达到收敛），然后卫星钟差的最终估计值 $t^j(k)$ 可立即用于精密单点定位（PPP）。在这种情况下，卫星钟差确定的典型初始化阶段可以从非差处理模式下的几个小时减少至历元差分模式下的数十分钟。此外，基于式(3)的卫星钟差估计速度远快于基于非差载波相位的卫星钟差估计，在这种情况下，我们能够估计出1 Hz的钟差产品[28]。

2.2. 卫星观测特定相位偏差的确定

相位偏差对于实现PPP-AR（精密单点定位与模糊度固定）是必要的。GSeisRT首先通过固定已知的卫星轨道和钟差，利用参考观测网络估计GPS、伽利略系统和北斗系统的宽巷和窄巷未校准相位延迟（UPD）[29]；然后将其转换为特定于观测值的相位偏差（相位OSB）。我们使用Melbourne-Wübbena组合[30-31]

$$\lambda_w N_{i,w}^j = \frac{g_2}{g_2-1} \lambda_1 \phi_{i,1}^j - \frac{1}{g_2-1} \lambda_2 \phi_{i,2}^j - \left(\frac{g_2}{g_2+1} P_{i,1}^j + \frac{1}{g_2+1} P_{i,2}^j \right) \quad (4)$$

计算宽巷模糊度 $N_{i,w}^j$ ，其中， λ_w 表示宽巷组合观测的波长；宽巷UPD（ $b_{i,w}^j$ ）可由以下公式推导得出：

$$b_{i,w}^j = \text{Frac}(N_{i,w}^j) \quad (5)$$

式中， $\text{Frac}(\cdot)$ 为一个用于提取模糊度估计小数部分的函数。需要注意的是，可以为参考站的UPD分配一个任意值（如0）来标识伪绝对的卫星UPD，如 b_w^j 所示。

借助 $b_{i,w}^j$ ，GSeisRT能够将 $N_{i,w}^j$ 固定为整数，表示为 $\hat{N}_{i,w}^j$ 。然后，可以使用以下公式计算相应的窄巷模糊度：

$$N_{i,n}^j = \frac{g_2+1}{g_2} N_{i,0}^j - \frac{1}{g_2-1} \hat{N}_{i,w}^j \quad (6)$$

与式(5)类似，窄巷UPD可按以下公式计算：

$$b_{i,n}^j = \text{Frac}(N_{i,n}^j) \quad (7)$$

而卫星窄巷UPD的值则是 b_n^j 。通常，需要多个参考站才能实现高精度的UPD估计；GSeisRT经验性地将这一数量设定为10。

一旦获得宽巷和窄巷的UPD，就可以使用以下公式[32]生成OSB形式的相位偏差产品：

$$\begin{bmatrix} b_1^j \\ b_2^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{cg_1} & \frac{g_1+1}{cg_1} \\ -\frac{g_1}{c} & \frac{g_1+1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_w b_w^j + \frac{g_1 d_1^j + d_2^j}{g_1+1} \\ \lambda_n b_n^j \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中，相位OSB b_1^j 和 b_2^j 遵循国际海事无线电技术委员会（RTCM）标准，单位为纳秒。假定伪距OSB d_1^j 和 d_2^j 的数值已知，因此可以直接从 $\lambda_w b_w^j$ 中进行校正。GSeisRT考虑到相位OSB在实时场景中的时间不稳定性，因此在每个历元重新计算相位OSB。值得特别注意的是，GSeisRT还能够解算多频模糊度；有关相位OSB的确定，感兴趣的读者可参阅参考文献[16]。

2.3. PPP-AR

OSB产品可以直接从原始伪距和载波相位观测值中校正，以恢复PPP中非差模糊度的整数特性。然而，在实际的实时操作中，由于参考站数量不足（即少于10个），某些卫星的相位OSB产品可能会间歇性缺失。其后果是，为了避免在原始观测值上校正OSB时出现不一致，必须丢弃这些时段，尽管在这些时段内仍可获得模糊度浮点解。因此，GSeisRT选择从OSB中重建UPD以进行替代，然后在不影响原始观测值处理的情况下，对PPP模糊度进行UPD校正。这样以来，即使某些时段相位OSB缺失，主滤波器中仍可保持模糊度浮点解。

与UPD估计相似，PPP-AR分为两个阶段：宽巷模糊

度固定和窄巷模糊度固定。首先，尝试使用 Melbourne-Wübbena 组合和宽巷 UPD 来解算宽巷模糊度。通常采取取整操作来确定整数候选值。一旦宽巷模糊度成功固定，即可使用式 (6) 恢复窄巷模糊度，并通过校正窄巷 UPD 来尝试固定整周模糊度[33]。

GSeisRT 采用两种策略来固定窄巷模糊度。一种策略是最小二乘模糊度降相关平差 (LAMBDA) 方法[34]。实数模糊度及其方差-协方差矩阵被输入 LAMBDA 中，以搜索最优整数备选解。另一种策略是最优整数等变估计 (BIE) 方法[35]，该方法在最小均方差方面最优[36]。一旦获得整数备选解，就可以通过以适当权重的伪观测值添加整数约束来计算模糊度固定解。

3. GSeisRT 的结构

GSeisRT 有两个版本，即 GSeisRT-Lite 和 GSeisRT-Pro，以满足不同用户的需求 (图 1)。GSeisRT-Lite 实际上仅作为客户端，用于执行实时 PPP 处理。它面向那些因测

站网络规模限制而无法支持卫星钟差和相位偏差估计的用户 (如地震多发区域内的所有站点)。与之对应的，GSeisRT-Pro 是 GSeisRT 的完整版；它能够估计卫星钟差和相位偏差，并将其播发给客户端以执行实时 PPP。GSeisRT-Pro 适用于具有足够大测站网络范围以支持卫星钟差确定的用户。关于此类区域网络所需的规模，在我们的实验中，跨越数千公里的 NOTA 网络和 CMONOC 网络均支持部署 GSeisRT 服务端处理。尽管理论上任何规模的区域网络都能保证 GSeisRT 服务端处理，但应在地震多发区域外设置参考站。

图 1 显示，GSeisRT 由服务端和客户端组成。需要通过 Ntrip Caster 来管理通过互联网协议的网络化实时通信管理 (NTRIP) 的实时数据流[37]。服务端包括实时精密卫星钟差和相位偏差的确定。卫星钟差促成了卫星相位偏差的估计。这些卫星产品以及 IGS 预测的卫星轨道，随后将以实时通信管理状态空间表示 (SSR) 格式编码，并发送给 Ntrip Caster。

GSeisRT 客户端承担实时 PPP 的角色。它从 GSeisRT 服务端建立的 Caster 或第三方 (如 IGS) 获取 SSR 流，

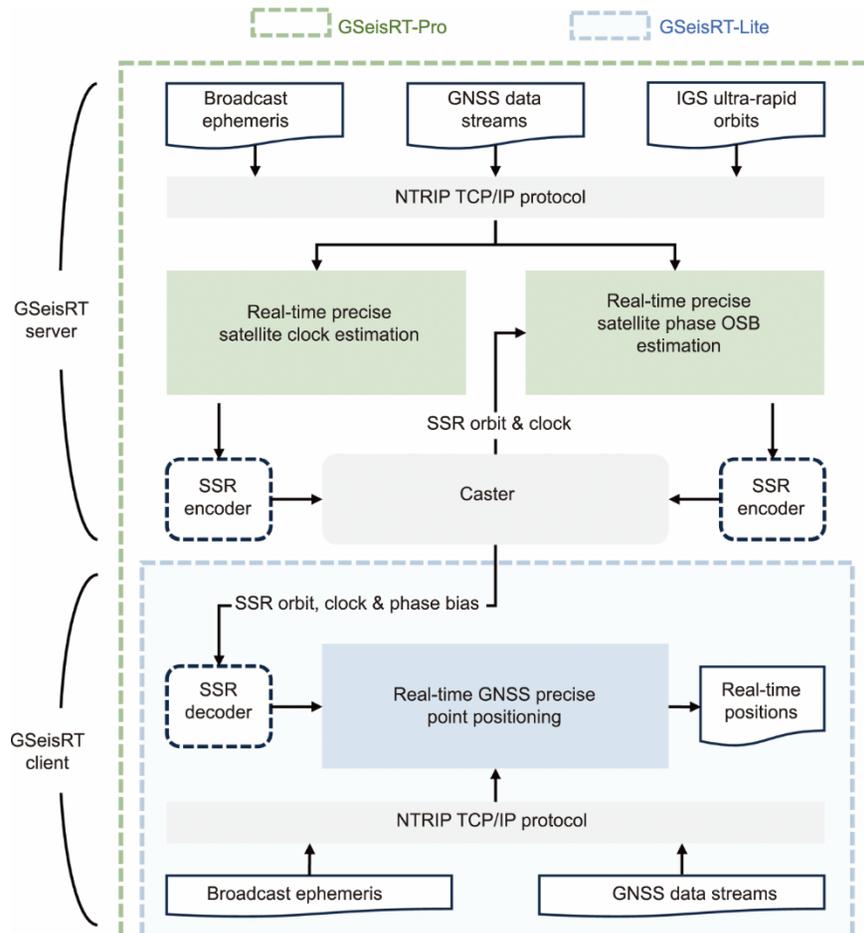


图 1. GSeisRT 的结构。NTRIP: 基于互联网协议的 RTCM 网络传输; SSR: 状态空间表示; TCP/IP: 传输控制协议/互联网协议。

然后将其解码为卫星轨道、钟差和相位偏差。用户应为每个站点运行一个客户端，并且所有客户端都是相互独立的。

4. 实时数据配置

GSeisRT已应用于NOTA、CMONOC、CSN、GNS和BIG观测网络。为简洁起见，我们主要关注2023年4月30日至5月9日期间使用GSeisRT-Pro进行的实时PPP/PPP-AR实验，该实验基于NOTA的600个代表性站点，另外也会简要展示来自其他网络的汇总结果。由于部分站点故障且计算资源有限，我们并未处理全部的980个站点。图2显示了GSeisRT服务端接收的90个站点（蓝色实心三角形）以及客户端接收的另外603个站点（红色实心圆）。服务端使用的站点应远离地震多发区。数据处理策略的详细信息见表1 [38–40]。部分站点（约10%）仅具有GPS数据，而非多系统数据。需要注意的是，由于偶尔的网络故障，我们实验期间部分站点的实时数据可能缺失。因此，我们仅收集了具有完整实时GNSS数据站点的结果。

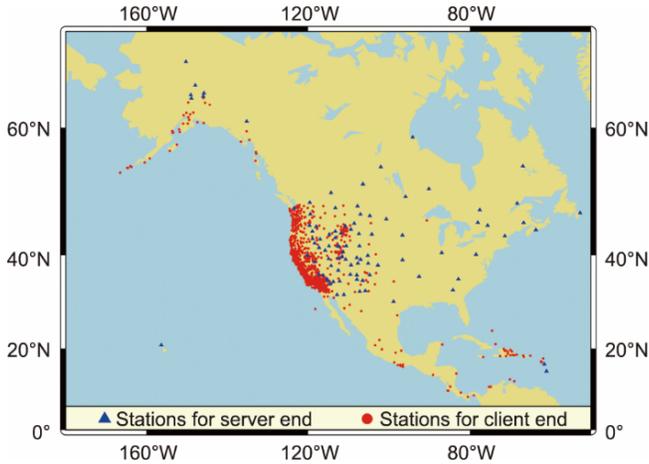


图2. 实时NOTA站点分布。

表1 通过GSeisRT进行数据处理

Items	Descriptions
Observations	Dual-frequency pseudorange and carrier phase
GNSS	GPS/BDS/GLONASS/Galileo
Sampling rate	1 s
Cut-off angle	10°
Code OSBs	Chinese Academy of Sciences (China)
Antenna phase center	igs20.atx
Tidal displacements	Solid earth tides, pole tides, and ocean tidal loading [38]
Troposphere delays	Saastamoinen for a Priori delays and global mapping function [39–40]
Satellite orbits	Ultra-rapid products of Wuhan University (China)
Ambiguity resolution	BIE

5. 实验结果

5.1. 不同SSR流的延迟

我们比较了IGS SSR和GSeisRT SSR在正常计算和网络环境下的延迟，详细信息如表2所示。这些延迟主要由网络传输延迟引起。GSeisRT SSR的运行配置列于表3。图3以2023年12月3—10日期间三种产品的SSR延迟为例进行了说明。浅绿色、浅蓝色和深蓝色分别表示GSeisRT、武汉大学（WHU）和法国国家空间研究中心（CNES）SSR的延迟。可以看出，客户端接收SSR的延迟在一周内基本稳定。对于GSeisRT SSR，平均延迟约为6.36 s，这主要得益于北美地区EarthScope数据流管理的“本地”配置。有一些异常点位于10 s以上，这是由于在某些历元中偶尔出现的网络故障。此外，在日界处还有一些零星的点，这是由于GSeisRT SSR服务器上设置的定时任务导致计算负载的周期性波动。对于IGS SSR产品而言，WHU和CNES的平均延迟分别高达20.20 s和19.89 s，是GSeisRT延迟的三倍。这可以归因于IGS面向全球用户服务的数据流配置。更长的延迟时间意味着SSR用户必须预测卫星钟差和相位偏差，以匹配待处理观测值的历元。这将降低定位精度，因为SSR产品和GNSS观测值之间的一致性受到损害。延迟时间越长，定位精度越差。从这个意义上说，GSeisRT的数据流“本地”设置对于高时效要求的地震监测更为有利。

然而，在本文后续的实时定位实验中，我们无需预测卫星钟差或相位偏差，而是准确匹配卫星SSR产品和用户观测数据的时间戳。通过这种方式，我们可以评估不同SSR产品的真实精度，以便进行公平对比。

5.2. 实时多系统卫星钟差和相位偏差

图4展示了2023年4月30日GSeisRT GPS/BDS/GLONASS/Galileo卫星钟差的标准差。采用二次差分法来

表2 IGS与GSeisRT SSR之间的比较

SSR	Institution	Caster	Mount point	Service area	Clock/bias interval (s)
IGS-CNES	Centre National d'Études Spatiales (France)	ntrip.data.gnss.ga.gov.au	SSRC00CNE0 (orbit, clock & bias)	Global	5
IGS-WHU	Wuhan University (China)	ntrip.data.gnss.ga.gov.au	SSRC00WHU0 (orbit & clock), OSBC00WHU1 (bias)	Global	5
GSeisRT	PRIDE Group (China)	Local caster	Self-defined	North America	1

表3 EarthScope中GSeisRT的计算与网络环境

Items	Descriptions
Computer type	Amazon Cloud Server
Operating system	CentOS Linux 7 (core)
Processor (Central Processing Unit (CPU))	Intel® Xeon® Platinum 8275CL CPU @ 3.00 GHz
Memory (Random-access memory (RAM))	30 GB
Storage devices	537 GB solid-state drive (SSD)
Network connection	Wired Ethernet Interface
Network bandwidth	1000 million bits per second
Network protocol	IPv4

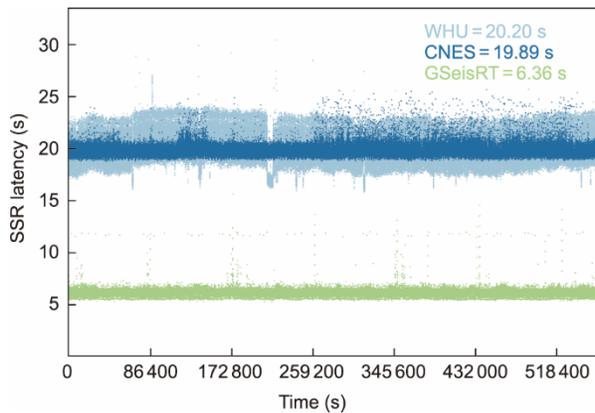


图3. 2023年12月3日至10日, IGS和GSeisRT SSR数据流在NOTA的延迟情况。平均延迟数值绘制在右上角。WHU: 武汉大学; CNES: 法国国家空间研究中心。

评估卫星钟差产品的精度[41]。以武汉大学MGEX(WUM)的最终卫星钟差产品作为参考。可以看出, 几乎所有卫星的钟差标准差都小于0.20 ns, 平均值都在0.10 ns左右, 这两者均与实时IGS钟差产品的典型统计精度相当[20]。在整个实验期间(2023年4月30日至5月9日), GPS、GLONASS、Galileo和BDS卫星钟差相比WUM最终产品的标准差分别为0.09 ns、0.08 ns、0.10 ns和0.10 ns。值得一提的是, 卫星相对于区域观测网络的升降会导致低仰角下的钟差估计精度下降。具体而言, 当卫星的仰角较低(如小于 10°)时, 能够观测到该卫星的站点会很少; 此外, 由于多路径效应和大气延迟更为显著, 其观测质量不如高仰角下卫星的观测质量。因此, 在初始阶段, 式(3)中的卫星钟差估计值 $t'(0)$ 可能存在高达

几纳秒的偏差。幸运的是, 这种时钟偏差可以被吸收至PPP中的载波相位模糊度, 而不会影响定位精度。

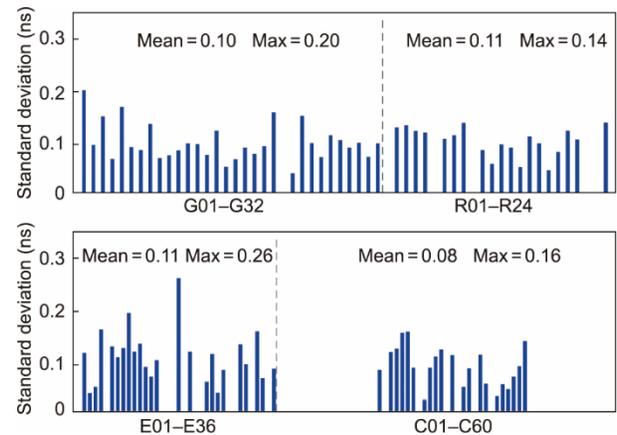


图4. 2023年4月30日, GSeisRT GPS/BDS/GLONASS/Galileo实时卫星钟差相对于WUM最终产品的标准差。所有数据均使用NOTA网络的数据计算。每个子图中均绘制了均值和最大标准差。在此期间, 并非所有BDS卫星都被NOTA观测到。G01-G32: GPS卫星PRN; R01-R24: GLONASS卫星PRN; E01-E36: Galileo卫星PRN; C01-C60: BDS卫星PRN; Max: 最大值。

图5展示了2023年4月30日GPS/Galileo/BDS系统的宽巷和窄带巷位偏差/UPD。每个子图内绘制了所有卫星相位偏差变化的最大和最小标准差。由于独特的信号调制[频分多址(FDMA)]和存在频间相位偏差(IFPB)[42], 因此, GSeisRT并未估计GLONASS卫星的相位偏差。对于宽巷相位偏差, 最大标准差不超过0.10周。所有GNSS卫星的平均标准差均小于0.03周, 表现出良好的时间稳定性。相比之下, 窄巷相位偏差的最大标准差可达0.134周,

所有GNSS卫星的平均标准差达到0.06周，这表明与宽巷相位偏差相比，其表现出更大的时间不稳定性。实时窄巷相位偏差通常会经历一个收敛阶段，这是由于卫星相对于区域网络会逐渐升起[43]。在此期间，卫星高度角较低，其观测值被降权处理，以减少影响相位偏差估计的精度。此外，由于可观测BDS数据的NOTA站点较少，因此BDS的相位偏差估计精度弱于GPS和Galileo系统。

5.3. 实时PPP和PPP-AR

为了量化评估GSeisRT动态定位的精度，我们计算了所收集结果与EarthScope提供的精确参考坐标之间的均方根误差。对于同样使用GSeisRT-Pro处理的CMONOC和CSN网络，我们使用了Nevada大地测量实验室提供的坐标或计算出的单天静态位置作为真值。为确保完整性，用于卫星钟差和相位偏差计算的CMONOC站点分别来自中国的东北部、东南部和西北部，而CSN的站点则来自阿根廷国家GNSS网络[44]。

图6展示了2023年4月30日两个典型站点P358和P049的GSeisRT定位结果。P358采用多系统（GPS/BDS/GLONASS/Galileo）观测数据，而P049仅使用GPS观测数据。在实时PPP解算（红色曲线）的情况下，两个站点的水平分量均方根误差均小于2 cm，并且P358的水平RMS甚至低于1 cm，这从P358与P049相比更精细的时间序列中可以看出。从全天来看，红色曲线中存在明显的趋势，尤其是对于仅使用GPS的站点P049。相比之下，在

模糊度固定之后（蓝色曲线），定位误差的时间序列更加稳定，这在站点P049中更为明显。与模糊度浮点解相比，两个站点的水平分量RMS误差均下降了30%~70%，且P358的噪声仍然低于P049。图6中的底部图像显示，P358站点在每个历元平均可观测到超过25颗卫星，而P049站点仅可观测到8.7颗，这表明了多GNSS系统在定位精度方面的优势[23]。

尽管图6中的统计数据与公开文献中的既定结果一致，但仍需谨慎：多系统与单GPS系统可能并非唯一解释P358站噪声低于P049站的因素，因为这两个站的观测环境和仪器不同。如文献[9]所述，更严格的实验方法是在P358站进行两次单独的PPP计算，其中一次采用多系统数据，另一次仅采用单GPS数据。然而，在NOTA网络600个站点的实时处理中，很难考虑这样的实验设计。尽管存在这一问题，但我们相信，从大量站点汇总统计数据将比图6更具说服力。

此外，我们通过在实时实验中将数据划分为每小时一段，研究了GSeisRT PPP的收敛时间以及PPP-AR的首次固定时间（TTFF）。值得注意的是，在本研究中，只有当水平和垂直分量分别在10 min内保持在10 cm和15 cm的误差以内时，才认为实现了完全收敛或成功定位。图7展示了三个典型站点的收敛性能。这三个站点分别来自不同的区域GNSS网络——CMONOC、NOTA和CSN。可以看出，在定位的初始阶段，使用更多卫星可以带来更高的定位精度，因此收敛速度更快。P622站的PPP在大约10 min内

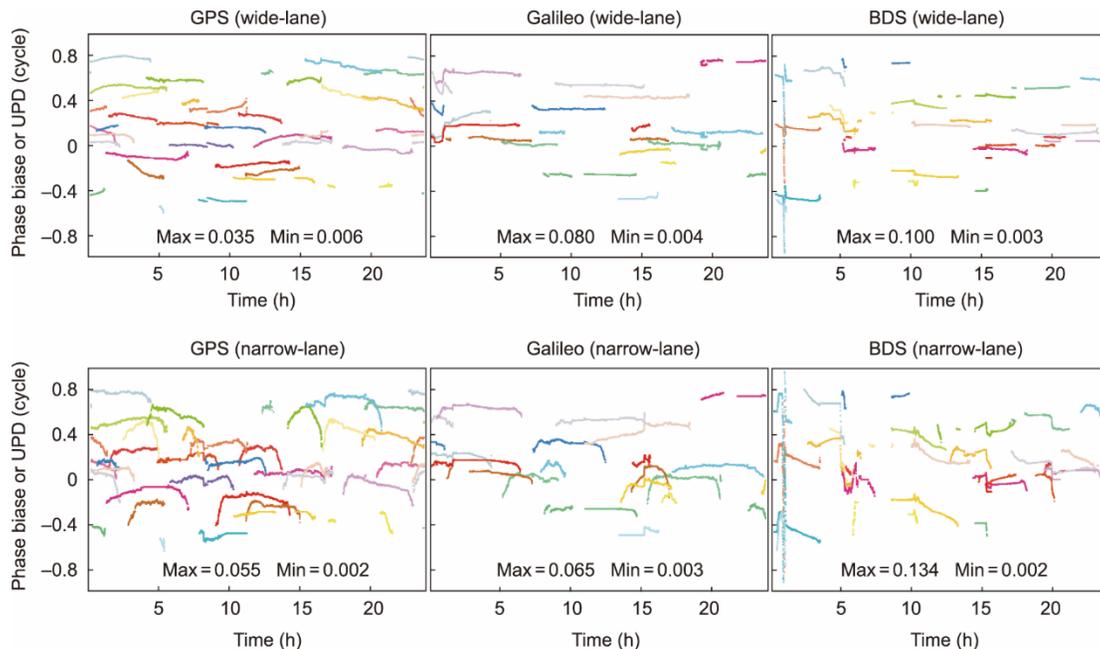


图5. 2023年4月30日，不同卫星的GPS/Galileo/BDS系统实时宽巷/窄巷相位偏差/UPD序列。所有数据均使用NOTA网络的观测数据计算得出。每个子图内均绘制了相位偏差变化的最大和最小标准差。请注意，相位偏差已被垂直移动以避免符号重叠。Min：最小值。

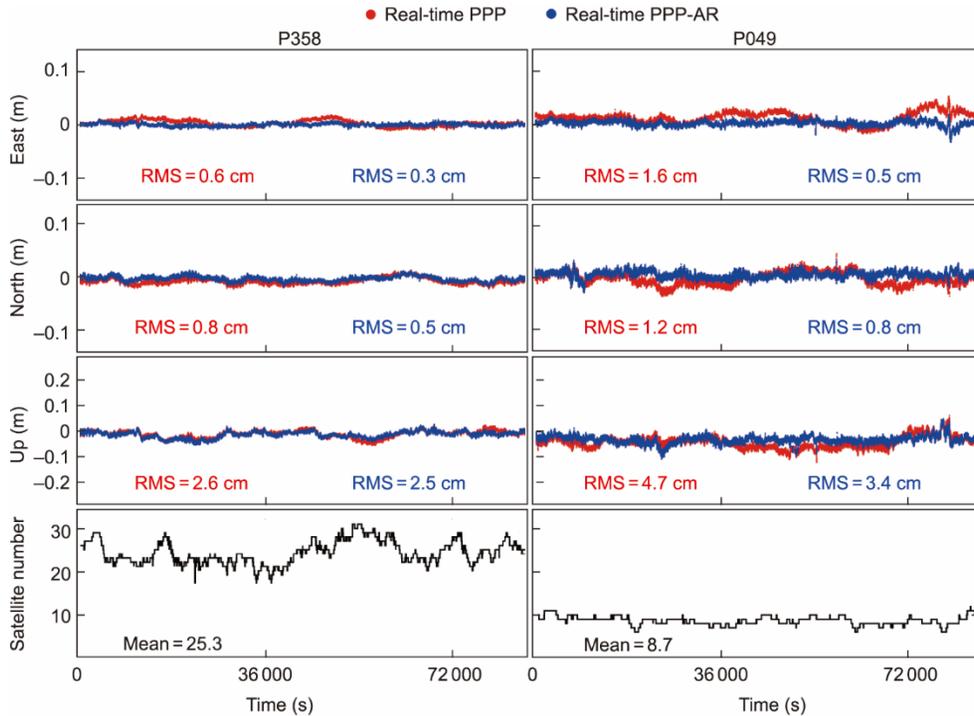


图6. 2023年4月30日, 在NOTA的P358和P049站, 实时PPP和PPP-AR的GSeisRT定位误差及卫星数目。

实现收敛, 而PPP-AR的解算仅需约5 min即可成功固定。AHAQ站和CURR站的PPP-AR可在不到20 min内成功固定。此外, 模糊度固定后, 东向分量的定位精度有显著改善。然而, 由于收敛阶段的模糊度固定错误, 因此存在一些异常历元。与PPP-AR相比, 未进行模糊度固定的PPP通常能提供连续平滑的时间序列, 尤其是在模糊度固定错误的情况下。表4展示了PPP的平均收敛时间和PPP-AR的TTFF与卫星数量的关系。可以看出, 引入模糊度固定和更多可观测卫星可显著加快收敛速度。PPP的平均收敛时间和实时PPP-AR的TTFF分别为16.4 min和11.1 min。

表5显示了NOTA的82个单GPS站点和521个多系统(即GPS/BDS/GLONASS/Galileo中的任意两个或更多)站点所有天中的东向、北向和垂直分量的RMS误差均值, 图8显示了NOTA所有站点的RMS误差分布。总体而言, 无论卫星数量如何, PPP-AR均表现出较小的RMS误差。平均而言, 所有站点的东向、北向和垂直分量的RMS误差均值分别从2.2 cm、1.7 cm和3.4 cm减小到1.2 cm、1.3 cm和3.0 cm, 精度分别提高了45%、24%和12%。仅使用GPS站点的PPP-AR在三个坐标分量上的RMS误差均值分别为1.4 cm、1.4 cm和3.2 cm。对于多系统站点, PPP-AR的RMS误差均值达到1.2 cm、1.3 cm和2.9 cm, 与仅使用GPS站点相比, 精度分别显著提高了14%、7%和9%。这些统计数据进一步证实了卫星数量增加会改善卫星几何分布以及带来更丰富的冗余观测。

除了RMS误差外, 绝对点位精度也是一个重要指标, 因为它反映了定位的可靠性。表6中列出了NOTA网络中82个单GPS站点和521个多系统站点东向、北向和垂直分量的50%和95%百分位的平均点位误差, 这些数据涵盖了所有天。结果表明, 在50%百分位时, 多系统GNSS在PPP方面优于仅使用GPS, 东向和垂直分量的改进分别达到27%和14%。然而, 对于PPP-AR来说, 两者差异不大。在95%百分位时, 无论是否进行模糊度固定, 多系统GNSS总是表现出比仅使用GPS有显著的增强, 定位更加稳定可靠。总体而言, 在模糊度固定的情况下, GSeisRT能够提供可靠的定位服务, 所有站点的三维(3D)绝对误差在95%的置信水平下分别小于2.2 cm、2.4 cm和5.5 cm。

图9展示了PPP和PPP-AR的东向、北向和高度分量所有站点的均方根误差分布。同时, 还绘制了CMONOC和CSN的统计数据以供对比。对于NOTA的模糊度浮点解(红色空心条), 约50%的水平RMS误差小于2 cm, 而40%的垂直方向误差小于3 cm。一旦启用模糊度固定(蓝色实心条), 这两个比率分别提高到80%和60%。显然, 与PPP解相比, PPP-AR解的直方图在接近零的位置明显更突出, 尤其是在水平分量上。在CMONOC观测网络中也可实现相当的性能, 其中, PPP-AR解的水平RMS误差低于2 cm的比例为80%, 垂直方向低于3 cm的比例为45%。与NOTA和CMONOC观测网络相比, CSN观测网络的性能似乎较差, 这主要受限于其实时数据质

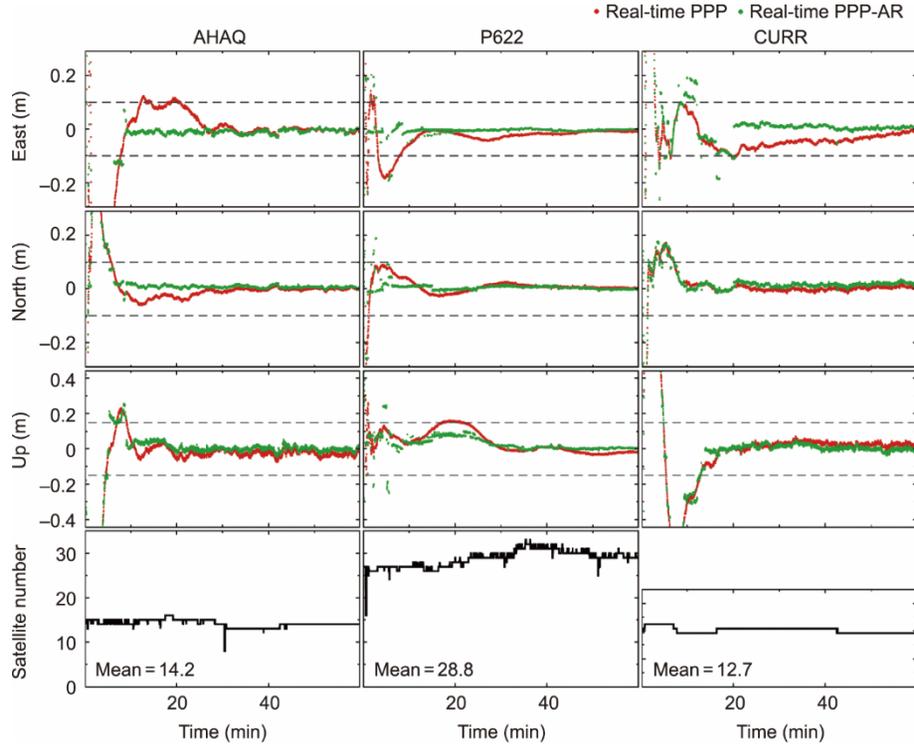


图7. 收敛期内, 来自三个区域GNSS网络的实时PPP和PPP-AR解在AHAQ、P622和CURR站点的定位误差和卫星数量。

表4 在三个区域性GNSS网络站点上, 实时PPP的平均收敛时间以及实时PPP-AR的首次固定时间(TTFF)相对于不同卫星数量的变化情况

Satellite number	PPP (min)	TTFF of real-time PPP-AR (min)
8-9	28.1	19.4
10-14	19.1	13.9
15-19	14.8	10.6
≥ 20	12.0	8.1
Mean	16.4	11.1

表5 在NOTA中所有单GPS站点和多系统站点的所有天中, 实时PPP和PPP-AR的东向、北向和垂直分量的平均RMS误差。三个分量(东向、北向、垂直)的RMS误差在最后两列中用斜杠分隔

Satellite system	Station number	Satellite number	PPP (cm)	PPP-AR (cm)
GPS-only	82	8	3.1/1.8/4.2	1.4/1.4/3.2
Multi-GNSS	521	21	2.1/1.6/3.3	1.2/1.3/2.9
Mean	—	19	2.2/1.7/3.4	1.2/1.3/3.0

量, 但通过模糊度固定仍可实现轻微改善。总体而言, 在大陆网络范围内启用模糊度固定可使定位精度显著提高, 最高可达45%。

为了对不同时段下实时GNSS的位移噪声进行全面评估, 我们计算了位移“漂移”, 即任意两个以特定时间间隔分隔的历元位置之间位移的RMS值[45]。这是量化不同时段噪声水平的另一种方法。更具体地说, 时间间隔 τ 对应的漂移 $D(\tau)$ 计算如下:

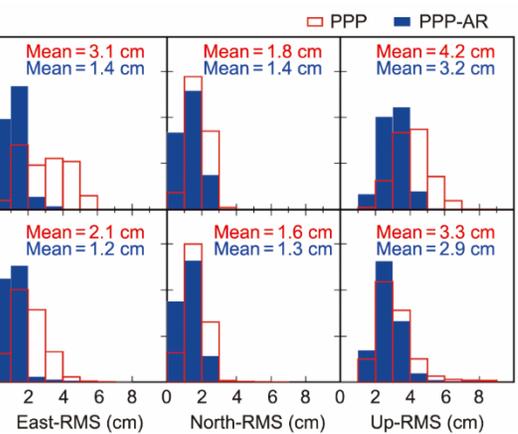


图8. 在NOTA区域所有单GPS站点和多系统(即GPS/BDS/GLONASS/Galileo中的任意两种或更多)站点上, 实时PPP和PPP-AR的东向、北向和垂直分量的定位RMS误差分布。

表6 在NOTA中, 所有仅使用GPS和多系统GNSS站点上, 实时PPP和PPP-AR的东向、北向和垂直分量的50%和95%百分位绝对点位误差。最后两列中, 三个分量的误差用斜杠分隔

Satellite system	PPP (50%) (cm)	PPP-AR (50%) (cm)	PPP (95%) (cm)	PPP-AR (95%) (cm)
GPS-only	2.2/1.3/2.8	0.9/1.1/2.2	5.6/3.4/7.2	2.7/2.6/5.8
Multi-GNSS	1.6/1.3/2.4	0.9/1.1/2.2	3.9/3.0/6.0	2.1/2.4/5.4
Mean	1.7/1.3/2.5	0.9/1.1/2.2	4.1/3.0/6.2	2.2/2.4/5.5

$$D(\tau) = \sqrt{\frac{\sum_{n(\tau)} (x(k+\tau) - x(k))^2}{n(\tau)}} \quad (9)$$

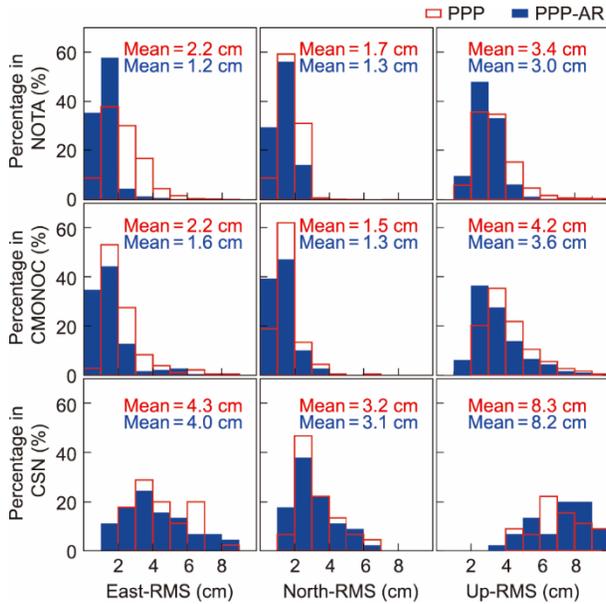


图9. NOTA、CMONOC和CSN观测站点在所有天数内实时PPP和PPP-AR的定位RMS误差分布。每个子图内均绘制了平均RMS误差。

式中， $n(\tau)$ 为具有时间间隔 τ 的数据对数量； $x(k)$ 为第 k 个历元的位置。

因此，图10展示了在所有仅使用GPS和多系统GNSS站点上，NOTA观测网络所有天内的平均位移“漂移”。由于大地震引起的地面运动可持续长达数分钟，因此我们计算了1 s~1 h时间间隔内的位移“漂移”。从图10的两个子图可以看出，无论是否启用模糊度固定，在1 s~1 h的所有时段内，多系统GNSS解的水平分量漂移总是比仅使用GPS解小1~3 mm，垂直分量漂移小3~5 mm，这与Geng等[9]的结果一致。更具体地说，在短于100 s的时段内，无论是否启用模糊度固定，所有坐标分量的位移“漂移”相当：仅使用GPS解的水平分量漂移约为5~6 mm，垂直分量漂移为12 mm，而多GNSS解的水平分量漂移约为3~4 mm，垂直分量漂移为8 mm。这一发现意味着，在短时间间隔内，模糊度固定实际上并不能显著提高位移精

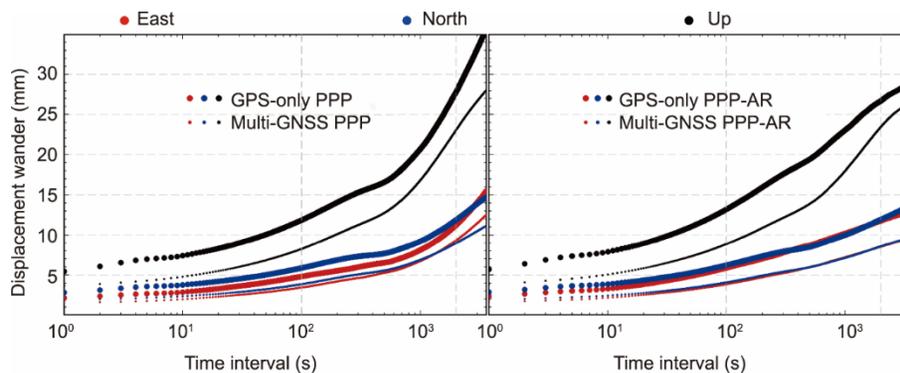


图10. 实时PPP和PPP-AR在所有仅使用GPS站点（大点）和多GNSS站点（小点）上，1 s~1 h的时间间隔内的位移“漂移”。

度。而在长于2000 s的时段内，PPP-AR解的位移“漂移”小于其PPP解。在仅使用GPS的情况下，3600 s时段内的改善高达7 mm，但使用多系统GNSS观测时，改善降至3 mm。然而，模糊度固定在长时段内对提高位移分辨率的贡献仍然显著，因而一些缓慢的地面运动，如极早期的震后变形和风暴潮事件，可能更容易被实时识别[46-47]。

5.4. GSeisRT在使用IGS与GSeisRT SSR方面的比较

我们使用了全球实时产品IGS-CNES SSR来运行六个GSeisRT客户端（即P030、P118、P122、P358、P682和P707），并与使用GSeisRT SSR产品的情况进行了比较。图11展示了2023年4月30日NOTA区域代表性站点P030的定位结果，其中绘制了PPP（红色曲线）和PPP-AR（蓝色曲线）解算结果。底部子图显示，两种SSR产品平均都能接收约22颗卫星。然而，使用GSeisRT SSR产品的定位精度高于IGS SSR：对于模糊度浮点解，水平定位均方根误差降低了约50%，对于模糊度固定解，最高可降低70%。尽管这一优势可能部分归因于GSeisRT服务端和客户端之间的软件自治性，不过我们认为，更高的采样率（即1 s相比5 s）、更稳定的服务端/客户端通信以及GSeisRT SSR产品适用于区域的特点也在解释GSeisRT结果更好方面发挥了重要作用。此外，两种SSR产品都能支持实现模糊度固定。GSeisRT SSR在向东、北向和高程分量上的RMS误差分别降低了约62%、11%和25%，但基于CNES SSR的PPP-AR似乎不稳定，尽管可以观察到微小的精度提升。这一结果揭示了目前全球范围的卫星相位偏差难以实时稳定地实现高精度和可靠性。

表7进一步展示了基于IGS-CNES SSR和GSeisRT SSR产品在六个站点所有天数的平均定位均方根误差。总体而言，相较于GSeisRT提供的区域SSR产品，由IGS-CNES代表的全球SSR产品能够使更多的卫星为定位做出贡献。这是因为GSeisRT去除了相对于NOTA观测网络的低高度角卫星。然而，无论模糊度是否固定为整数，

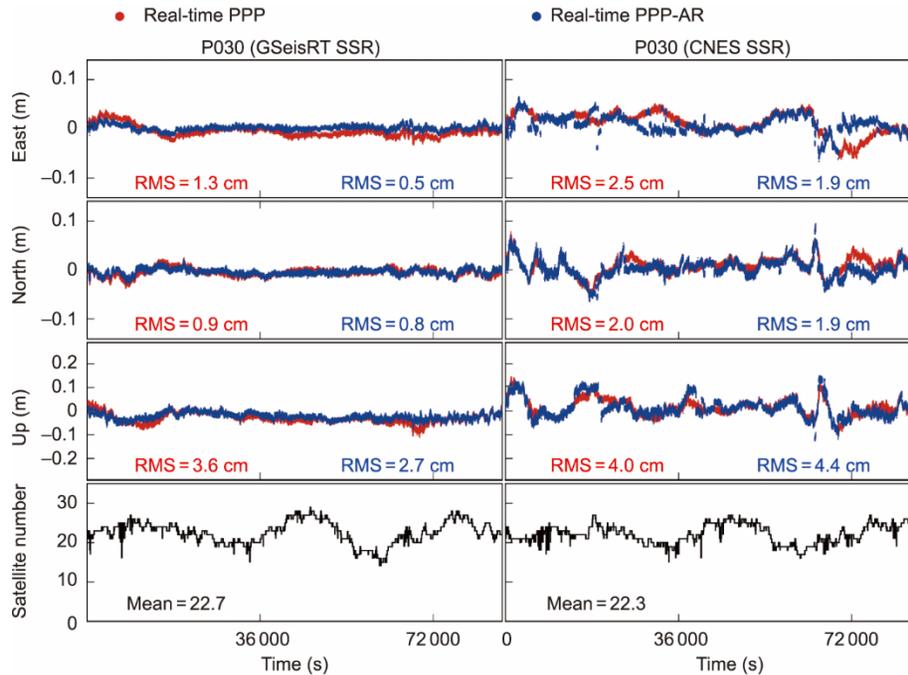


图 11. 2023 年 4 月 30 日，基于 IGS 和 GSeisRT SSR 的实时 PPP 和 PPP-AR 在 NOTA 网络 P030 站点的 GSeisRT 定位误差和卫星数量。

GSeisRT SSR 在水平和垂直分量上产生的 RMS 误差总是比 IGS-CNES SSR 分别小 30%~45% 和超过 40%。尽管 IGS-CNES SSR 的这种劣势主要与其面向全球服务所带来的数据传输不稳定有关，但我们应该强调，对于地震监测等高时效性要求的应用，区域自治的实时高精度 GNSS 服务更为可取。

表 7 基于 IGS-CNES SSR 和 GSeisRT SSR 的实时 PPP 和 PPP-AR 在 NOTA 六个测试站所有天内的东向、北向和垂直分量的平均 RMS 误差。最后两列中，三个坐标分量的 RMS 误差用斜杠分隔

SSR	Satellite number	PPP (cm)	PPP-AR (cm)
IGS-CNES	23	2.1/2.0/4.6	2.0/1.9/4.9
GSeisRT	21	1.4/1.1/2.7	1.2/1.1/2.6

6. GSeisRT 实时捕获的地震事件

自 2019 年在 NOTA 和 CMONOC 观测网络投入实时运行以来，GSeisRT 已成功实时捕获到多次地震事件，包括 2020 年 6 月 23 日墨西哥瓦哈卡发生的 7.4 级地震；2020 年 6 月 24 日美国加利福尼亚州隆派恩发生的 5.8 级地震；以及 2021 年 5 月 21 日中国青海省玛多发生的 7.3 级地震。首个记录这些地震所产生的地面运动的 GNSS 站点分别为 NOTA 的 OXUM 站、NOTA 的 P466 站和 CMONOC 的 QHMD 站。我们使用美国地质调查局 (USGS) 发布的震中位置，计算出这些地震事件的震中距离分别为 58 km、17 km 和 40 km。根据 Melgar 等[48]的方法，我们进一步

从这三个站的位移记录中提取出峰值地面位移 (PGD)，并使用震级缩放定律 (scaling law) [4] 计算地震震级。

图 12 左侧子图中显示了三个 GNSS 站点东向、北向和垂向的同震位移，右侧子图显示了地震发生后随时间变化的峰值地面位移 (PGD) 量值。左侧子图中的垂直虚线表示地震发生时间，右侧子图中的垂直虚线表示获得最终 PGD 的时刻。如预期所示，GSeisRT 能够测量地面永久位移，这是其相对于惯性地震传感器最突出的优势。从右侧子图可以看出，在三次事件发生后分别获得了 17 s、9 s 和 32 s 处的 PGD，地震震级分别收敛为 7.31、5.73 和 7.17，这些值与美国地质调查局 (USGS) 的标准 zhen ji3 估计非常接近，误差仅约为 0.1。

7. 讨论

上述所有结果均基于 GSeisRT-Pro 版本，该版本建立了服务端以计算区域卫星钟差和相位偏差。此版本要求用户拥有足够大的区域 GNSS 网络，且网络覆盖的地理范围超出地震多发区，以确保地震事件期间参考站的稳定。显然，并非所有用户都能满足这一先决条件，如 GNS 和 BIG 的 GNSS 观测网络。因此，GSeisRT 提供了一个轻量版本，即 GSeisRT-Lite，作为客户端以方便用户使用 IGS SSR 产品实现实时 PPP-AR。目前，仅 IGS-CNES 和 IGS-WHU 分析中心提供实时相位偏差产品 (表 3) [49-50]。

我们将这两种 SSR 产品应用于 GNS 和 BIG 站点，收

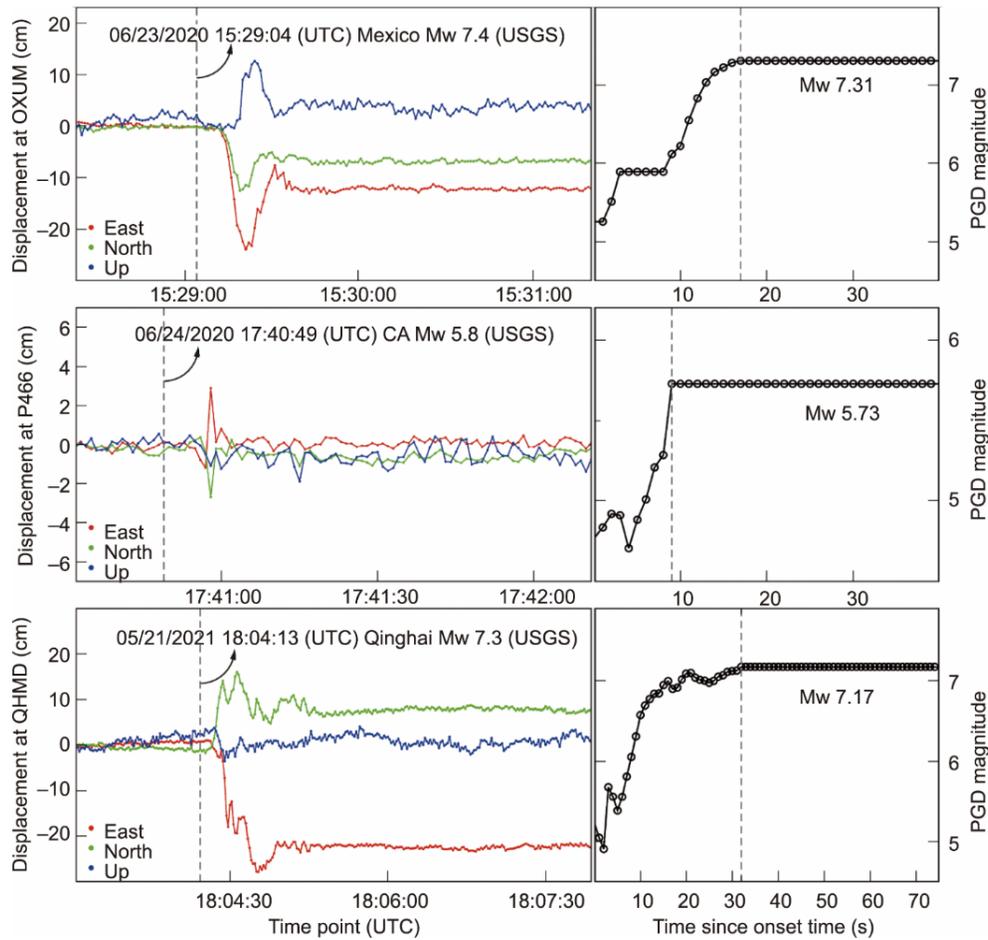


图12. GSeisRT实时捕捉到的站点位移以及由此计算的峰值地面位移 (PGD) 震级。UTC: 协调世界时间; CA: 加利福尼亚州。

集了实时定位结果，并计算了类似于图9所示的单天RMS误差。图13显示了PPP-AR中所有站三个坐标分量上的定位RMS误差分布。总体而言，WHU SSR产生的RMS误差小于CNES SSR。更具体来说，基于WHU SSR在GNS网络的RMS误差分别比基于CNES SSR的RMS误差小约50%、57%和33%，而对于BIG网络，这些百分比分别为23%、18%和12%。此外，基于WHU SSR在GNS网络中的水平RMS误差小于2 cm的比例约为80%。相比之下，在使用CNES SSR的情况下，这一比例下降到不足10%。同样，我们认为WHU SSR表现更优的部分原因在于WHU所开发的GNSS软件具有更高的兼容性。

此外，GSeisRT能够实现并置GNSS/加速度计数据的实时融合。我们已将此功能嵌入至名为SMAG2000的仪器中[51-52]。与高频GNSS相比，加速度计数据具有更高的采样率（如大于100 Hz）和更低的噪声。GNSS/加速度计数据融合能够在更宽的频率范围内实现更高的位移精度[53]。

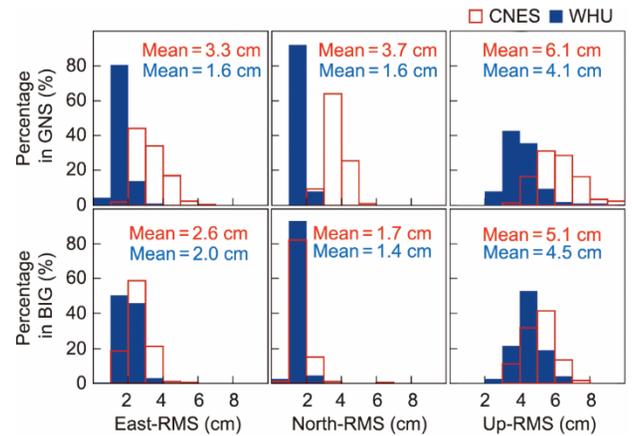


图13. 使用IGS-CNES和IGS-WHU SSR产品进行实时PPP-AR时，GNS和BIG网络中所有参与站点的定位RMS误差分布图。每个子图内均绘制了平均RMS误差。

8. 结论与展望

本研究介绍了一种应用于广域实时地震监测的GNSS精密单点定位引擎GSeisRT。GSeisRT由服务端和客户端组成。服务端能够利用区域GNSS网络生成卫星钟差和相位

偏差数据流，而客户端则通过多系统 GNSS PPP/PPP-AR 实时描绘地面位移，精度可达厘米级至亚厘米级。

基于 603 个 NOTA 站点的连续实时实验表明，GSeisRT SSR 的时间延迟比 IGS SSR 缩短 2~3 倍，从而更好地满足地震监测的高时效性要求。在 24 h 内，PPP-AR 的平均定位精度在东向、北向和高程分量分别可达 1.2 cm、1.3 cm 和 3.0 cm。对于持续约 100 s 的典型地震事件，当应用多系统 GNSS 观测时，水平分量和垂直分量的位移精度分别可达约 4 mm 和 8 mm。此外，基于 GSeisRT 区域 SSR 产品的定位精度相比基于 IGS 全球 SSR 产品的定位精度高出 30%~40%。

自 2019 年以来，部署于 NOTA 和 CMONOC 观测网络的 GSeisRT 已成功实时捕捉多次地震事件的完整位移波形。在获取 PGD 之后我们可以迅速计算得到地震震级，对于 Mw 5.8~7.4 级的地震事件，震级估计误差仅约为 0.1。GSeisRT 软件向科学社区免费开放。

CRediT authorship contribution statement

Jianghui Geng: Conceptualization, Project administration, Methodology, and Software; **Kunlun Zhang** and **Shaoming Xin:** Writing original draft, Data curation, Investigation, and Validation; **Jiang Guo:** Resources; **David Mencin**, **Tan Wang**, **Sebastian Riquelme**, **Elisabetta D' Anastasio**, and **Muhammad Al Kautsar:** Writing review and editing.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

致谢

本工作由国家杰出青年科学基金(42025401)和国家重点研发计划(2022YFB3903800)资助。感谢 CMONOC、NOTA 和智利 GNSS 网络所提供的实时数据。感谢中国地震局、EarthScope、CSN、GNS 和 BIG 的合作。感谢国际 GNSS 服务(IGS)所提供的高质量卫星产品和数据播发平台。感谢新西兰 GeoNet 计划及其赞助方地震委员会(EQC)、GNS 科学、新西兰土地信息局(LINZ)、国家应急管理局(NEMA)以及商业、创新和就业部(MBIE)为本研究提供的数据。

References

- [1] Zumberge JF, Heflin MB, Jefferson DC, Watkins MM, Webb FH. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J Geophys Res Solid Earth* 1997;102(B3):5005–17.
- [2] Larson KM, Bodin P, Gombert J. Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the Denali fault earthquake. *Science* 2003;300(5624):1421–4.
- [3] Blewitt G, Kreemer C, Hammond WC, Plag HP, Stein S, Okal E. Rapid determination of earthquake magnitude using GPS for tsunami warning systems. *Geophys Res Lett* 2006;33(11):L11309.
- [4] Crowell BW, Melgar D, Bock Y, Haase JS, Geng J. Earthquake magnitude scaling using seismogeodetic data. *Geophys Res Lett* 2013;40(23):6089–94.
- [5] Ruhl CJ, Melgar D, Chung AI, Grapenthin R, Allen RM. Quantifying the value of real-time geodetic constraints for earthquake early warning using a global seismic and geodetic data set. *J Geophys Res Solid Earth* 2019;124(4):3819–37.
- [6] Colosimo G, Crespi M, Mazzoni A. Real-time GPS seismology with a standalone receiver: a preliminary feasibility demonstration. *J Geophys Res Solid Earth* 2011;116(B11):302.
- [7] Riquelme S, Bravo F, Melgar D, Benavente R, Geng J, Barrientos S, et al. W phase source inversion using high-rate regional GPS data for large earthquakes. *Geophys Res Lett* 2016;43(7):3178–85.
- [8] Goldberg DE, Koch P, Melgar D, Riquelme S, Yeck WL. Beyond the teleseism: introducing regional seismic and geodetic data into routine usgs finite-fault modeling. *Seismol Res Lett* 2022;93(6):3308–23.
- [9] Geng J, Jiang P, Liu J. Integrating GPS with GLONASS for high-rate seismogeodesy. *Geophys Res Lett* 2017;44(7):3139–46.
- [10] Paziewski J, Kurpinski G, Wielgosz P, Stolecki L, Sieradzki R, Seta M, et al. Towards Galileo + GPS seismology: validation of high-rate GNSS-based system for seismic events characterisation. *Measurement* 2020;166:108236.
- [11] Zheng K, Liu K, Zhang X, Wen G, Chen M, Zeng X, et al. First results using high-rate BDS-3 observations: retrospective real-time analysis of 2021 Mw 7.4 Madoi (Xizang) earthquake. *J Geod* 2022;96(8):51.
- [12] Xu P, Shi C, Fang R, Liu J, Niu X, Zhang Q, et al. High-rate precise point positioning (PPP) to measure seismic wave motions: an experimental comparison of GPS PPP with inertial measurement units. *J Geod* 2013;87(4):361–72.
- [13] Hohensinn R, Häberling S, Geiger A. Dynamic displacements from high-rate GNSS: error modeling and vibration detection. *Measurement* 2020;157:107655.
- [14] Geng J, Xin S, Williams SDP, Wei N. Detecting millimeter-level subdaily loading deformation using multi-GNSS data and advanced IGS products: a case study for the December 5, 2013 storm surge event around the southern North Sea. In: *Proceedings of the Abstracts of the 51st American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2018; 2018 Dec 10–14; Washington, DC, USA. Washington, DC: American Geophysical Union; 2018.*
- [15] Geng J, Wen Q, Zhang Q, Li G, Zhang K. GNSS observable-specific phase biases for all-frequency PPP ambiguity resolution. *J Geod* 2022;96(2):11.
- [16] Geng J, Zhang Q, Li G, Liu J, Liu D. Observable-specific phase biases of Wuhan multi-GNSS experiment analysis center's rapid satellite products. *Satell Navig* 2022;3(1):23.
- [17] Yigit CO, El-Mowafy A, Anil Dindar A, Bezcioglu M, Tiryakioglu I. Investigating performance of high-rate GNSS-PPP and PPP-AR for structural health monitoring: dynamic tests on shake table. *J Surv Eng* 2021;147(1):05020011.
- [18] Michel C, Kelevitz K, Houlié N, Edwards B, Psimoulis P, Su Z, et al. The potential of high-rate GPS for strong ground motion assessment. *Bull Seismol Soc Am* 2017;107(4):1849–59.
- [19] Eberhart-Phillips D, Haeussler PJ, Freymueller JT, Frankel AD, Rubin CM, Craw P, et al. The 2002 Denali fault earthquake, Alaska: a large magnitude, slip-partitioned event. *Science* 2003;300(5622):1113–8.
- [20] Li B, Ge H, Bu Y, Zheng Y, Yuan L. Comprehensive assessment of real-time precise products from IGS analysis centers. *Sat Nav* 2022;3(1):12.
- [21] Melgar D, Crowell BW, Melbourne TI, Szeliga W, Santillan M, Scrivner C. Noise characteristics of operational real-time high-rate GNSS positions in a large aperture Network. *J Geophys Res Solid Earth* 2020;125(7):e2019JB019197.
- [22] Zhang Q, Zeng R, Xin S, Zhou X. Analysis of real-time multi-GNSS satellite products of Wuhan University for rapid response of precise positioning. *J Glob Position Syst* 2021;17(2):189–207.
- [23] Geng J, Pan Y, Li X, Guo J, Liu J, Chen X, et al. Noise characteristics of high-rate multi-GNSS for subdaily crustal deformation monitoring. *J Geophys Res Solid Earth* 2018;123(2):1987–2002.

- [24] Weber G, Mervart L, Stuerze A, Rülke A, Stöcker D. BKG Ntrip Client (BNC) Version 2.12. Frankfurt am Main: Federal Agency for Cartography and Geodesy; 2016.
- [25] Bertiger W, Bar-Sever Y, Dorsey A, Haines B, Harvey N, Hemberger D, et al. GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research. *Adv Space Res* 2020;66(3):469–89.
- [26] Johnston G, Riddell A, Hausler G. The international GNSS service. In: Teunissen PJG, Montenbruck O, editors. *Springer handbook of global navigation satellite systems*. Cham: Springer International Publishing; 2017. p. 967–82.
- [27] Lutz S, Beutler G, Schaer S, Dach R, Jäggi A. CODE's new ultra-rapid orbit and ERP products for the IGS. *GPS Solut* 2016;20(2):239–50.
- [28] Ge M, Chen J, Douša J, Gendt G, Wickert J. A computationally efficient approach for estimating high-rate satellite clock corrections in realtime. *GPS Solut* 2012;16(1):9–17.
- [29] Geng J, Chen X, Pan Y, Zhao Q. A modified phase clock/bias model to improve PPP ambiguity resolution at Wuhan University. *J Geod* 2019;93 (10):2053–67.
- [30] Melbourne WG. The case for ranging in GPS-based geodetic systems. In: *Proceedings of the 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System*; 1985 Apr 15–19; Rockville, MD, USA. Washington, DC: US Department of Commerce; 1985. p. 373–86.
- [31] Wubben G. Software developments for geodetic positioning with GPS using TI 4100 code and carrier measurements. In: *Proceedings of the 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System*; 1985 Apr 15–19; Rockville, MD, USA. Washington, DC: US Department of Commerce; 1985. p. 403–12.
- [32] Schaer S, Villiger A, Arnold D, Dach R, Prange L, Jäggi A. The CODE ambiguity-fixed clock and phase bias analysis products: generation, properties, and performance. *J Geod* 2021;95(7):81.
- [33] Ge M, Gendt G, Rothacher M, Shi C, Liu J. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. *J Geod* 2008;82(7):389–99.
- [34] Teunissen PJG, de Jonge PJ, Tiberius CCJM. The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: its performance on short GPS baselines and short observation spans. *J Geod* 1997;71(10):589–602.
- [35] Teunissen PJG. Theory of integer equivariant estimation with application to GNSS. *J Geod* 2003;77(7):402–10.
- [36] Odolinski R, Teunissen PJG. Best integer equivariant estimation: performance analysis using real data collected by low-cost, single- and dual-frequency, multi-GNSS receivers for short- to long-baseline RTK positioning. *J Geod* 2020;94(9):91.
- [37] Weber G, Dettmering D, Gebhard H. Networked transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip). Washington, DC: RTCM-Radio Technical Commission for Maritime Services; 2005. p. 60–4.
- [38] Luzum B, Petit G. The IERS Conventions (2010): reference systems and new models. *Proc Int Astron Union* 2012;10(H16):227–8.
- [39] Saastamoinen J. Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bull Géodésique (1946-1975)* 1972;105(1):279–98.
- [40] Boehm J, Niell A, Tregoning P, Schuh H. Global Mapping Function (GMF): a new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophys Res Lett* 2006;33(7):L07304.
- [41] Lou Y, Shi C, Zhou X, Ye S. Realization and analysis of GPS precise clock products. *Geomat Inf Sci Wuhan Univ* 2009;34(1):88–91. Chinese.
- [42] Geng J, Zhao Q, Shi C, Liu J. A review on the inter-frequency biases of GLONASS carrier-phase data. *J Geod* 2017;91(3):329–40.
- [43] Geng J, Teferle FN, Meng X, Dodson AH. Towards PPP-RTK: ambiguity resolution in real-time precise point positioning. *Adv Space Res* 2011;47(10):1664–73.
- [44] Piñón DA, Gómez DD, Smalley Jr R, Cimbaro SR, Lauría EA, Bevis MG. The history, state, and future of the argentine continuous satellite monitoring network and its contributions to geodesy in Latin America. *Seismol Res Lett* 2018;89(2A):475–82.
- [45] Langbein J. Computer algorithm for analyzing and processing borehole strainmeter data. *Comput Geosci* 2010;36(5):611–9.
- [46] Geng J, Xin S, Williams SD, Jiang W. Comparing non-tidal ocean loading around the southern North Sea with subdaily GPS/GLONASS data. *J Geophys Res Solid Earth* 2021;126(3):e2020JB020685.
- [47] Liu K, Geng J, Wen Y, Ortega-Culaciati F, Comte D. Very early postseismic deformation following the 2015 Mw 8.3 Illapel Earthquake, Chile Revealed from Kinematic GPS. *Geophys Res Lett* 2022;49(11):e2022GL098526.
- [48] Melgar D, Crowell BW, Geng J, Allen RM, Bock Y, Riquelme S, et al. Earthquake magnitude calculation without saturation from the scaling of peak ground displacement. *Geophys Res Lett* 2015;42(13):5197–205.
- [49] Guo J, Geng J, Zeng J, Song X, Defraigne P. All-frequency GPS/Galileo/BDS phase bias stream for real-time PPP ambiguity resolution at Wuhan IGS analysis center. *GPS Solut* 2024;28(2):67.
- [50] Laurichesse D, Privat A. An open-source PPP client implementation for the CNES PPP-WIZARD demonstrator. *ION GNSS+ 2015*. Tampa: the Institute of Navigation; 2015. p. 2780–9.
- [51] Geng J, Bock Y, Melgar D, Crowell BW, Haase JS. A new seismogeodetic approach applied to GPS and accelerometer observations of the 2012 Brawley seismic swarm: implications for earthquake early warning. *Geochem Geophys Geosystems* 2013;14(7):2124–42.
- [52] Xin S, Geng J, Zeng R, Zhang Q, Ortega-Culaciati F, Wang T. *In-situ* real-time seismogeodesy by integrating multi-GNSS and accelerometers. *Measurement* 2021;179:109453.
- [53] Bock Y, Melgar D, Crowell BW. Real-time strong-motion broadband displacements from collocated GPS and accelerometers. *Bull Seismol Soc Am* 2011;101(6):2904–25.