

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.01.006

顾及频间偏差的 GNSS 多频非组合 PPP 变形监测

潘林¹, 李选平^{1,2}, 戴吾蛟¹, 余文坤¹

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
2. 长沙金维信息技术有限公司系统设计部, 长沙 410000)

摘要:精密单点定位(PPP)技术有望解决长距离、大范围等监测场景难以找到稳定基准点的难题。现代化的全球卫星导航系统(GNSS)卫星纷纷开始播发多频信号,多频观测值融合理论上可提升 PPP 变形监测性能。为了充分利用多频冗余观测数据,详细研究了每个频点的差分码偏差(DCB)和全球定位系统(GPS)存在的相位频率间卫星钟偏差(PIFCB)的改正方法,扩展了多频数据处理严密理论模型,能够灵活处理 GPS 三频、Galileo 五频和 BDS-3 五频观测数据。多频 PPP 振动监测实验结果表明,GPS 三频 PPP、BDS-3 五频 PPP、Galileo 五频 PPP 较各自双频 PPP 位移监测精度可分别提升 12%、13%和 14%,表明多频 PPP 技术有利于提升 PPP 位移监测精度与稳定性。

关键词:变形监测;精密单点定位;多频数据处理;全球卫星导航系统

中图分类号:P228 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-8110(2023)01-0065-09

Deformation Monitoring with GNSS Multi-Frequency Uncombined PPP Considering Inter-Frequency Biases

PAN Lin¹, LI Xuanping^{1,2}, DAI Wujiao¹, YU Wenkun¹

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
2. System Design Department, Changsha Jinwei Information Technology Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: Precise Point Positioning(PPP) technology is expected to solve the problem that it is difficult to find a stable reference point in long-distance and large-scale monitoring scenarios. With the development of Global Navigation Satellite System(GNSS), there is an emerging situation that the new-generation GNSS satellites are operating with multiple frequencies. Theoretically, the multi-frequency integration can improve the performance of deformation monitoring with PPP. In order to make full use of the multi-frequency redundant observation data, the correction method of the Differential Code Bias(DCB) of each frequency and the Phase Inter-Frequency Clock Bias(PIFCB) existing in GPS is studied in detail. The correction method extends the rigorous theoretical model of multi-frequency data processing, which can flexibly process GPS triple-frequency, Galileo five-frequency and BDS-3 five-frequency observation data. The results of the multi-frequency PPP vibration monitoring experiment show that the vibration displacement accuracy of GPS triple-frequency PPP, BDS-3 five-frequency PPP and Galileo five-frequency PPP can be improved by 12%, 13% and 14%, respectively, compared with their dual-frequency PPP. Thus, the multi-frequency integration is beneficial to improve the accuracy and stability of PPP displacement monitoring.

收稿日期:2022-11-28;**修订日期:**2023-01-05

基金项目:国家自然科学基金(41904030);湖南省自然科学基金(2020JJ5706)

作者简介:潘林(1989-),男,博士,副教授,主要从事 GNSS 精密定位及其地学应用、变形监测与变形分析方面的研究。

Key words: Deformation monitoring; Precise point positioning; Multi-frequency data processing; Global navigation satellite system

0 引言

变形是指结构体在受到自身或外界条件影响下,其大小、形状或空间位置在时空域发生变化。变形是自然界非常普遍的现象,从区域范围(如地球板块、城市地面、滑坡、边坡及矿区等)到精密工程建筑(如大坝、桥梁、高层建筑及隧道等),任何事物无时无刻不在发生形变,而当这些结构体形变量超过自身最大承受范围时,会发生严重的灾害事故,破坏人民生命财产安全和生存环境。变形监测技术即是通过特定仪器或方法对结构体进行持续性或周期性观测,并根据观测结果掌握结构体形变规律和形变规模,从而进行相应的预测、预报和预警工作,减少人员伤亡和经济损失。自20世纪90年代以来,全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)相对定位技术以其全天候、自动化、高精度等优点,广泛应用于火山、崩塌、滑坡、地面沉降、地裂缝、大坝、桥梁及高楼等结构体的形变监测中,并取得了丰硕的研究成果;但相对定位技术要求在基准点和监测点上进行同步观测,这样会增加作业成本,影响作业效率。同时,相对定位的精度也会随着监测点与基准点距离的增加而降低,这对超大范围监测服务功能提出了挑战。对于地震、地壳形变这种特大范围的监测,相对定位技术存在一些缺陷,例如双差构建基线进行网平差时矩阵维数庞大、运算效率低,使用GAMIT/GLOBK等高精度数据处理软件对专业知识要求较高。同时,受限于现实的地质条件、交通、电力和通信状况,监测区域内甚至可能难以布设稳定的、观测环境良好的基准点。

另外一种GNSS高精度定位方式,即精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)技术,是指利用国际GNSS服务(International GNSS Service, IGS)等组织发布的精密卫星轨道与钟差产品,依靠单台接收机即可实现大地测量高精度定位^[1]。PPP技术建立了全球全天候无缝的高精度定位、导航与授时(Positioning Navigation and Timing, PNT)服务,在GNSS精密定轨与定位、精密授时、地震预警、气象预测及精准农业等方面具有重要的应用价值。在GNSS变形监测领域,PPP技术无须依靠监测基准点即可获得长时间静态mm级、动态cm级

的高精度定位结果,相较于相对定位技术,具有单站作业成本低、方便高效、不依赖基准点、适合长距离和大范围监测的优势。因此,PPP技术在结构体变形监测领域具有广阔的应用前景。

近年来,国内外学者对GNSS PPP变形监测技术开展了研究。王利等^[2]利用PPP技术对滑坡从稳定、开始滑动直至产生破坏的全过程监测数据进行处理与分析,并与载波相位实时动态(Real-Time Kinematic, RTK)监测结果进行了对比。结果表明,经过0.5h初始化后,GPS PPP技术动态监测结果的内符合精度约为10mm,外符合精度约为40mm。匡翠林等^[3]提出了利用PPP技术监测高楼风振效应,在振动频率、位移和加速度信息上取得了与相对定位一致的结果,但是动态PPP精度仍受限,未能较好反映变形信息的伪静态部分。王炜栋等^[4]基于BDS PPP技术进行超高层建筑变形监测,研究表明,监测1h以上,水平方向定位精度可达1cm,垂直方向精度可达2cm。李黎等^[5]在对矿山变形监测分析中发现,2h以上的静态PPP定位可满足mm级精度,而动态PPP定位还只能获得cm级的定位精度。卞和方^[6]研究了区域增强PPP在矿区变形监测中的应用,结果表明,经过4h的连续观测,即可获得mm级的定位精度。吴萧楠等^[7]将动态PPP技术应用于塞文大桥变形监测上,对监测点PPP形变量和频谱进行分析,结果表明PPP技术可以应用于桥梁变形监测中,但精度和稳定性上较相对定位技术要差一些。张耕等^[8]通过整数钟模糊度固定法对某桥梁数据进行PPP固定解解算,研究表明PPP固定解优于PPP浮点解。Geng J. 等^[9]研究了GPS/GLONASS PPP固定解与地震仪融合在地震位移监测中的应用,发现PPP固定解技术能够将位移噪声降低约60%,更好地减弱噪声功率谱的不利影响。随后,Geng J. 等^[10]基于卫星轨道重复周期滤波消除多路径影响,位移噪声谱密度得到进一步减小。

近年来,全球卫星导航系统取得了迅速发展。美国的GPS从Block IIF卫星开始播发第3个频率L5信号。俄罗斯的GLONASS从K代卫星开始更改信号调制方案为码分多址结构,并播发第3个频率G3信号。我国自主研发的BDS目前可用信号包含B1I/B3I(BDS-2+BDS-3)、B2I(BDS-2)、B1C/

B2a/B2b/B2a+b(BDS-3)七频信号。截至目前,欧盟 Galileo 能够播发 5 个频率的信号观测值,包括 E1、E5a、E5b、E5a+b、E6。随着各卫星系统的蓬勃发展,各系统将提供三频甚至更多频率的观测信息,这为多频数据处理的研究创造了实际条件。多频观测值在周跳探测、高阶电离层延迟消除、加快 PPP 的收敛速度及提高模糊度固定率与可靠性等方面具有重要优势。与此同时,一些变形监测区域的观测环境并不是很好,例如山坡/滑坡、基坑和矿山,有很大区域的卫星信号被遮挡,导致可能出现卫星数不够的情况。此时,多频观测值的利用有利于增强复杂环境下的 GNSS 定位性能。

据此,本文对 GNSS 多频非组合 PPP 变形监测技术开展了深入研究,重点分析了融合使用多频数据时伪距频间偏差与相位频间偏差的影响,并给出了相应的改正方法,构建了严密的 GNSS 多频非组合 PPP 变形监测模型,最后利用多频 PPP 振动监测实验进行了验证。

1 GNSS 多频非组合 PPP 变形监测模型

1.1 多频非组合 PPP 数学模型

以往 IGS 等机构的数据处理及产品服务都是基于双频无电离层组合,即钟差产品基准定义为无电离层组合伪距偏差为零,这导致了国内外众多学者都以双频无电离层为主要研究思路。随着各卫星系统能够播发 3~6 频观测值,各种无电离层组合带来的效果也不尽相同,此时再进行多种无电离组合排列就比较复杂。而非组合模型以原始观测值为基本处理单元,能够最大限度保留观测信息,灵活兼容各类应用需求,是多频 PPP 最为简易、适用的数据处理模型。因此,本文从非组合模型出发开展多频 PPP 研究,扩展出一个完善的多频非组合 PPP 函数模型,灵活处理各个频率观测值,提高观测信息冗余。

在非组合模型中,每个频点伪距和载波观测方程如下

$$\begin{cases} P_{r,i}^s = \rho_r^s + c dt_r - c dt^s + T_r^s + \\ \quad \gamma_i I_r^s + b_{r,i} + b_i^s + \epsilon(P_{r,i}^s) \\ L_{r,i}^s = \rho_r^s + c dt_r - c dt^s + T_r^s - \gamma_i I_r^s + \\ \quad N_{r,i}^s + B_{r,i} + B_{c,i}^s + B_{v,i}^s + \epsilon(L_{r,i}^s) \end{cases} \quad (1)$$

式中, s,r,i 分别表示卫星、接收机和频率, P 、 L 分别为测码伪距与载波相位观测值; ρ 是接收机至卫星间的空间几何距离; $c dt_r$ 、 $c dt^s$ 分别为接收机钟偏差和卫星钟偏差; T 表示倾斜对流层延迟; γ_i

$= f_1^2/f_i^2$ 表示第 i 个频率电离层延迟系数, f 是载波频率; I 表示 L1/B1/E1 频率上的斜向电离层延迟; N 表示相位模糊度; b_r 、 b^s 分别为接收机端和卫星端伪距硬件延迟; B_r 为接收机端相位硬件延迟; B_c^s 、 B_v^s 分别为卫星端相位硬件延迟的稳定部分和时变部分; ϵ 是多路径误差和未被模型化的测量噪声。

由于 IGS 分析中心进行精密卫星钟差估计时采用无电离层(Ionospheric-Free, IF)组合伪距和相位观测值,以伪距观测值作为绝对卫星钟差基准,相位观测值决定了卫星钟差历元间相对精度。因此,估计出的卫星钟差产品中常常吸收了 IF 组合的卫星端伪距硬件延迟和卫星端相位硬件延迟时变部分(稳定部分仍被模糊度吸收,不可分离)。IGS 精密卫星钟差产品具体表达如下^[11]

$$c dt_{\text{IF},12}^s = c dt^s - (a_{12,1} b_1^s + a_{12,2} b_2^s) - (a_{12,1} B_{v,1}^s + a_{12,2} B_{v,2}^s) = c dt^s - b_{\text{IF},12}^s - B_{v,\text{IF},12}^s \quad (2)$$

式中, $a_{12,1} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}$, $a_{12,2} = -\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$ 为 IF

组合中 2 个频率观测值系数。

当使用 IGS 分析中心提供的精密轨道和钟差产品后,对卫星和接收机天线相位中心偏差及变化、卫星天线相位缠绕、萨奈克效应、相对论效应、地球潮汐、对流层干延迟等误差进行模型改正,可以将观测方程线性化为误差方程

$$\begin{cases} p_{r,i}^s = \boldsymbol{\mu}_r^s \mathbf{X}_r + c dt_r + m_r^s Z_r + \gamma_i I_r^s + b_{r,i} + \\ \quad b_i^s - b_{\text{IF},12}^s - B_{v,\text{IF},12}^s \\ l_{r,i}^s = \boldsymbol{\mu}_r^s \mathbf{X}_r + c dt_r + m_r^s Z_r - \gamma_i I_r^s + N_{r,i}^s + \\ \quad B_{r,i} + B_{c,i}^s + B_{v,i}^s - b_{\text{IF},12}^s - B_{v,\text{IF},12}^s \end{cases} \quad (3)$$

式中, p 和 l 分别是伪距和相位观测值减去计算值(Observed-Minus-Computed, OMC); $\boldsymbol{\mu}$ 是每个卫星与接收机的视线方向向量; \mathbf{X} 是接收机三维位置参数; m 是每颗卫星对流层湿延迟投影函数; Z 是接收机天顶方向对流层湿延迟参数。

值得注意的是,各频率上的伪距、相位硬件延迟绝对值不可量测,如果忽略这些硬件延迟的影响,会严重影响 PPP 定位性能表现。目前,GNSS 数据处理中常常通过频率间差分硬件延迟进行校正,包括常见的差分码偏差(Differential Code Bias, DCB)P1-C1、P2-C2 和 P1-P2。但这只是针对精密卫星钟差估计时使用的前 2 个频率观测值,对于第三频及以上频率的观测值,其硬件延迟需要进一步仔细考虑,其中主要包括频率间卫星钟偏差(Inter-Frequency Clock Bias, IFCB)和伪距频间偏差问题。

只有将这2个问题考虑完善后,才能真正体现多频冗余数据带来的定位性能增益。

1.2 多频伪距频间偏差改正

如式(2)所述,IGS分析中心进行精密卫星钟差估计时常常吸收了卫星端IF组合的伪距和相位硬件延迟,由于解算过程中接收机钟差参数与接收机硬件延迟的相关性,接收机钟差也会吸收接收机端IF组合的伪距硬件延迟,即

$$\begin{aligned} cd\bar{t}_r &= cd t_r + (a_{12,1}b_{r,1} + a_{12,2}b_{r,2}) \\ &= cd t_r + b_{r,IF,12} \end{aligned} \quad (4)$$

同时接收机端剩余的伪距硬件延迟(非IF组合部分)和卫星端时变相位硬件延迟会耦合至电离层

$$\alpha_{UC,i}^s = \begin{cases} a_{12,2} \cdot DCB^s(P_1, P_2) & i = 1 \\ -a_{12,1} \cdot DCB^s(P_1, P_2) & i = 2 \\ a_{12,2} \cdot DCB^s(P_1, P_2) - DCB^s(P_1, P_i) & i \geq 3 \end{cases} \quad (7)$$

$$\beta_{UC,i}^s = \begin{cases} 0 & i = 1 \\ 0 & i = 2 \\ -a_{12,1}(1 - \gamma_5/\gamma_2)B_{v,1}^s + a_{12,2}(\gamma_5 - 1)B_{v,2}^s + B_{v,i}^s & i \geq 3 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \bar{N}_{r,i}^s &= N_{r,i}^s + B_{r,i} + B_{c,i}^s - b_{r,IF,12} - \\ & b_{IF,12}^s + \gamma_i a_{12,2} \cdot DCB_r(P_1, P_2) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $\alpha_{UC,i}^s$ 是第 i 个频率上伪距观测值应进行的频间码偏差改正,即DCB改正; $\beta_{UC,i}^s$ 是第 i 个频率上相位观测值应进行的频间相位偏差改正,其成分更为复杂,具体改正方法见1.3节; $\bar{N}_{r,i}^s$ 是吸收了伪距与相位硬件延迟的浮点模糊度。目前,中国科学院(Chinese Academy of Sciences, CAS)测量与地球物理研究所和德国宇航中心(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR)每天提供特定版本的DCB产品^[12-13],其中CAS播发的DCB产品信号更全。

为了探究DCB对PPP解算结果的影响,对使用DCB产品改正和不使用DCB改正的GPS三频PPP、BDS-3五频PPP和Galileo五频PPP解算结果进行比较。图1绘制了DGAR测站2021年11月12日这两种情形下的PPP动态定位误差序列。DGAR测站为多GNSS实验(Multi-GNSS Experiment, MGEX)测站,支持跟踪GPS三频、BDS-3五频和Galileo五频信号。从图1可以看出,对于非组合多频解算,不改正DCB会影响前期收敛速度,因为伪距频间偏差被吸收到电离层延迟参数中,导致接收机钟差和电离层参数相关,影响定位收敛时间。但是由于伪距观测值权值较小,与相位观测值

延迟参数中,则第一频点上的电离层延迟被重参数化为

$$\begin{aligned} \bar{I}_r^s &= I_r^s - a_{12,2}(b_{r,2} - b_{r,1}) + \\ & a_{12,2}(B_{v,2}^s - B_{v,1}^s) \end{aligned} \quad (5)$$

联合式(4)和式(5),并忽略时变相位偏差对伪距观测值的影响,多频数据处理中式(3)可以简化为

$$\begin{cases} p_{r,i}^s = \mu_r^s \mathbf{X}_r + cd\bar{t}_r + m_r^s Z_r + \\ \quad \gamma_i \bar{I}_r^s + \alpha_{UC,i}^s \\ l_{r,i}^s = \mu_r^s \mathbf{X}_r + cd\bar{t}_r + m_r^s Z_r - \\ \quad \gamma_i \bar{I}_r^s + \bar{N}_{r,i}^s + \beta_{UC,i}^s \end{cases} \quad (6)$$

权比为100:1,因此伪距观测值存在的频间偏差不会影响最终的定位精度。其中,BDS-3的DCB数值最大,对PPP定位结果影响超过了GPS和Galileo。

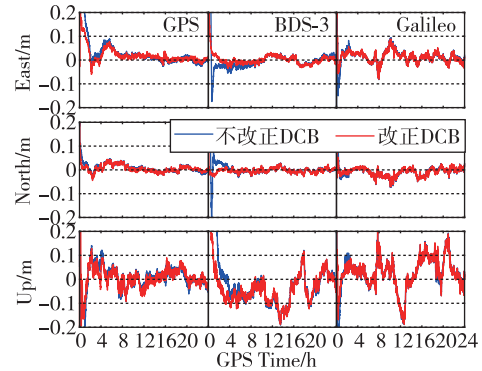


图1 DGAR测站改正DCB与不改正DCB的GPS三频PPP、BDS-3五频PPP和Galileo五频PPP定位误差序列
Fig. 1 Epoch-wise position errors of GPS triple-frequency PPP, BDS-3 five-frequency PPP and Galileo five-frequency PPP with and without DCB corrections at station DGAR

1.3 频率间卫星钟偏差改正

如式(2)所示,IGS分析中心进行精密卫星钟差估计时常常吸收了IF组合的伪距和相位硬件延迟。而当使用其他2个频率(如L1/L3)IF组合观测值进行精密卫星钟差估计时,则会吸收L1/L3上的相

应伪距和相位硬件延迟

$$c dt_{IF,13}^s = c dt^s - (a_{13,1} b_1^s + a_{13,2} b_3^s) - (a_{13,1} B_{v,1}^s + a_{13,2} B_{v,3}^s) \quad (10)$$

式中, $a_{13,1} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_3^2}$, $a_{13,2} = -\frac{f_3^2}{f_1^2 - f_3^2}$ 为 IF 组合中 2 个频率观测值系数。

这时,两种不同组合观测值估计的钟差之间由于各频点上的硬件延迟而存在差异。L1/L2 IF 组合计算的卫星钟差与由 L1/L3 IF 组合计算的卫星钟差差异值称为频率间卫星钟偏差,具体组成成分如下

$$\begin{aligned} \theta_{IFCB} &= c dt_{IF,13}^s - c dt_{IF,12}^s \\ &= (a_{12,1} b_1^s + a_{12,2} b_2^s) - (a_{13,1} b_1^s + a_{13,2} b_3^s) + \\ &\quad (a_{12,1} B_{v,1}^s + a_{12,2} B_{v,2}^s) - \\ &\quad (a_{13,1} B_{v,1}^s + a_{13,2} B_{v,3}^s) \\ &= \theta_{CIFCB} + \theta_{PIFCB} \end{aligned} \quad (11)$$

式中, θ_{CIFCB} 是伪距相关 IFCB (Code-specific IFCB, CIFCB); θ_{PIFCB} 是相位相关 IFCB (Phase-specific IFCB, PIFCB)。CIFCB 数值在 1 天内很稳定,在 1.2 节中已通过 DCB 考虑了其影响。有许多学者经过细致的研究发现, GPS 和 BDS-2 第三频率上存在明显的 PIFCB, 而 Galileo、BDS-3、QZSS 卫星上的 PIFCB 不显著^[14]。其中, GPS PIFCB 最大, 最大值可达 2dm 以上, 因此在使用 GPS 第三频率观测值解算时, 需要认真考虑频率间卫星钟偏差的影响。

在本文中, 采用三频无几何距离无电离层 (Geometry-Free and Ionospheric-Free, GFIF) 相位组合提取出高精度的 GPS PIFCB, 其原理为

$$\begin{aligned} GFIF &= (a_{12,1} L_1 + a_{12,2} L_2) - (a_{13,1} L_1 + a_{13,2} L_3) \\ &= (a_{12,1} B_{v,1}^s + a_{12,2} B_{v,2}^s) - (a_{13,1} B_{v,1}^s + \\ &\quad a_{13,2} B_{v,3}^s) + N_{r,GFIF}^s + B_{r,GFIF} + B_{c,GFIF}^s \\ &= \theta_{PIFCB} + N_{r,GFIF}^s + B_{r,GFIF} + B_{c,GFIF}^s \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $N_{r,GFIF}^s$ 、 $B_{r,GFIF}$ 、 $B_{c,GFIF}^s$ 分别为 GFIF 中的相位模糊度、接收机端相位硬件延迟和卫星端相位硬件延迟稳定部分。

在没有周跳的平滑弧段内, 对 GFIF 相位组合观测值采用历元间差分的策略, 消除 GFIF 模糊度、接收机端相位硬件延迟和卫星端相位硬件延迟稳定部分, 剩下的即是相位硬件延迟时变部分^[15], 但这同时也会引入一个秩亏问题。本文中, 将 1 天内第一个历元的 PIFCB 设置为 0, 通过累加方法依次估计出该天内剩余历元的 PIFCB 序列。值得注意

的是, 这样估计出的 PIFCB 会存在一个系统性偏差, 但该偏差在参数估计过程中可以被吸收到模糊度参数中, 不会影响 PPP 坐标参数的估计精度^[16]。

基于全球 280 个 MGEX 跟踪站数据估计出能够提供三频信号 GPS 卫星的 PIFCB。图 2 绘制了 2021 年 11 月 7 日 5 颗 GPS 卫星 (G01、G06、G09、G25、G27) 的 PIFCB 估值序列。从图 2 可以明显看出, GPS 卫星具有很强的 PIFCB, 最大值超过 1dm, 5 颗卫星的 PIFCB 均方根 (Root-Mean-Square, RMS) 统计值分别为 7.2cm、6.0cm、4.8cm、3.7cm、3.6cm。

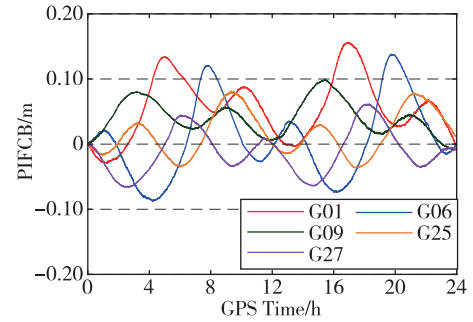


图 2 GPS 卫星 PIFCB 序列

Fig. 2 Time series of PIFCB estimates for GPS satellites

联合式(8)和式(11), 可以推导出如下公式

$$\beta_{UC,3}^s = -\theta_{PIFCB} / a_{13,2} \quad (13)$$

式中, $\beta_{UC,3}^s$ 为第 3 个频率 (GPS L5) 上相位观测值应进行的频间相位偏差改正; θ_{PIFCB} 为根据式(12)估计得到的 PIFCB。因此, 根据式(13), 就可以利用 2 个双频消电离层组合估计得到的 PIFCB, 对 GPS 三频非组合 PPP 进行 PIFCB 校正。需要注意的是, 尽管 PIFCB 估计使用 GFIF 三频相位组合观测值, 并且采用历元间差分策略, 但根据误差传播定律, 当地面跟踪站数量较多时, PIFCB 估值精度要优于相位观测值精度, 具体推导过程见 Pan L. 等^[17]。根据式(13), 进一步应用 PIFCB 序列改正非组合相位观测值时, 根据误差传播定律, 相应改正值精度进一步提升, 并不会放大非组合相位观测值的噪声。

为了探究 PIFCB 对 GPS 三频 PPP 定位结果的影响, 对使用 PIFCB 改正产品和不使用 PIFCB 改正产品的三频 PPP 解算结果进行比较分析。图 3 绘制了 DGAR 测站 2021 年 11 月 12 日这两种情形下的 GPS 三频 PPP 动态定位误差序列。从图 3 可以看出, 对于非组合三频解算, 改正 PIFCB 后东方向和高程方向定位精度有显著提升。

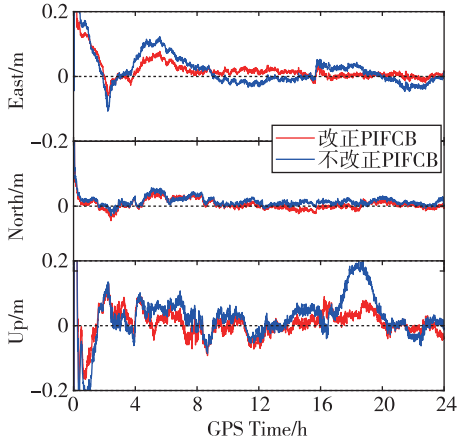


图3 DGAR 测站改正 PIFCB 与不改正 PIFCB 的 GPS 三频 PPP 定位误差序列

Fig. 3 Epoch-wise position errors of GPS triple-frequency PPP with and without PIFCB corrections at station DGAR

2 多频 PPP 变形监测性能评估

2.1 数据解算策略

为了分析多频 PPP 技术在实际振动监测中的性能表现,在中南大学地科楼楼顶和新校区操场搭建了 1 个基准站和 1 个流动站(天线安装在振动台上)进行振动实验。这 2 个站点周围环境开阔,相距不超过 500m。基准站搭配了北云接收机和北云 BY-500 天线,流动站搭建方式如图 4 所示,使用了 TRIMBLE ALLOY 接收机和北云 BY-400 天线,能够支持 GPS L1/L2/L5 三频、Galileo E1/E5A/E5B/E5(A+B)/E6 五频及 BDS-3 B1/B3/B1C/B2a/B2b 五频信号。



图 4 流动站示意图

Fig. 4 Experimental setup for rover station

数据采集时间为 2021 年 10 月 24 日,采样间隔 1s,数据时长大约 50min,前 35min 流动站天线处于静止状态,随后随振动台一起产生 3 次垂直方向振动。振动台每次振动前保持约 3min 的静止状态,随后每次振动持续约 90s。流动站观测到的 GPS (G)、BDS-3(C)、Galileo(E) 卫星数目及天空分布图

如图 5 和图 6 所示,平均观测到 8 颗 GPS 卫星,其中 G16、G22、G29、G31 卫星播发 L1/L2 双频信号, G03、G25、G26、G32 卫星播发 L1/L2/L5 三频信号,平均观测到 5 颗 Galileo 卫星和 11 颗 BDS-3 卫星,均能播发五频信号。为探究多频数据对位移监测精度的影响,按照前面介绍的方法进行频率间卫星钟偏差和多频伪距频间偏差校正,对振动数据分别进行非组合双频与多频 PPP 动态解算,包括 GPS、BDS-3、Galileo 双频解算和 GPS 三频、BDS-3 五频、Galileo 五频解算。在 PPP 动态解算时,模糊度参数作为浮点解估计,其中 GPS 收敛时间约为 31min, BDS-3 收敛时间约为 28min, Galileo 收敛时间约为 30min,振动情况下的 PPP 动态解是收敛后的定位结果。为了评估 PPP 结果的准确性,也进行 RTK 精密相对定位解算,作为参考真值。值得注意的是,由于观测时间较短,使用 PPP 静态技术估计国际地球参考框架(International Terrestrial Reference Frame, ITRF)下的基准站坐标精度不够,因此 RTK 技术解算 ITRF 框架下的流动站坐标与 PPP 解算的流动站坐标存在系统性偏差。为了更加清晰对比这两种技术在振动情况下的细微差异,将 RTK 与 PPP 解算

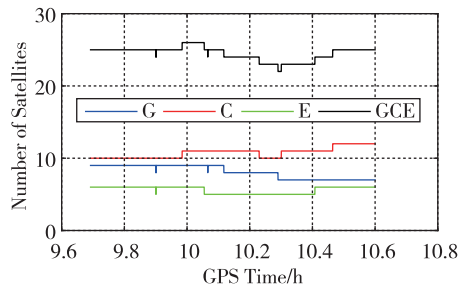


图 5 流动站可见卫星数目

Fig. 5 Number of visible satellites at rover station

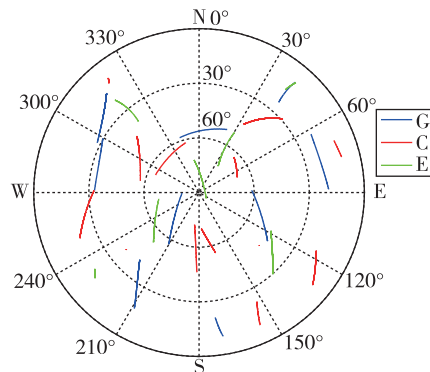


图 6 流动站卫星天空分布图

Fig. 6 Sky plot of satellites at rover station

的流动站定位结果序列去除各自的均值坐标(各振动时间段内),提取出振动位移序列。

2.2 振动状态下的多频 PPP 位移监测结果分析

图 7 展示了 3 次振动情况下 GPS 单系统双频和三频非组合 PPP 动态解算结果。值得注意的是,在这 50min 的短时间观测内,原始 PPP 动态坐标精度不会达到很高,但是从图 7 可以看出,PPP 技术与 RTK 技术一样,同样能够准确地识别出高频 cm 级振动位移。其原因可能是,在这 2min 短时间、cm 级小范围高频振动下,PPP 对流层参数、电离层参数、模糊度参数都是稳定的,变化量可以忽略,这时观测值的变化只能引起接收机坐标参数和接收机钟差参数的变化。因此,PPP 技术能够准确识别出振动情形下的位移变化,将 PPP 技术应用于高楼、桥梁等振动监测情形下是可行的,特别在大范围地震、高层建筑和跨海大桥等振动监测中,PPP 技术将更有优势。

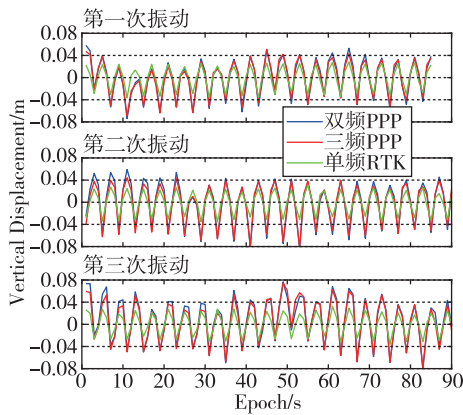


图 7 3 次垂直振动下 GPS 单系统双频和三频非组合 PPP 位移图

Fig. 7 Displacements derived by GPS dual-frequency and triple-frequency uncombined PPP for three vertical vibration tests

在第二次振动和第三次振动时,GPS 单系统三频 PPP 较双频 PPP 定位结果表现更优。以 RTK 定位结果作为真值,统计了 3 次振动下双频和三频 PPP 的位移监测精度。第一次振动时,GPS 双频 PPP 位移精度为 16.3mm,三频 PPP 位移精度为 14.4mm,相比较而言,三频 PPP 较双频 PPP 位移监测精度提升了 12%。第二次振动时,GPS 双频 PPP 和三频 PPP 位移精度分别为 20.2mm 和 17.5mm,三频相对双频位移监测精度提升了 13%。第三次振动时,GPS 双频 PPP 和三频 PPP 位移精度分别为 25.3mm 和

22.2mm,三频相对双频位移监测精度提升了 12%。综合 3 次振动表现来看,GPS 单系统非组合三频 PPP 较双频 PPP 在振动情形下位移监测精度平均能够提升 12%,多频观测值有利于提升 PPP 技术在振动监测领域内的监测精度与可靠性。

图 8 展示了 3 次振动情况下 BDS-3 单系统双频和五频非组合 PPP 动态解算结果。相较于 GPS PPP 定位表现而言,BDS-3 PPP 结果整体表现更优,与 RTK 结果差异更小,位移精度在 10mm 左右。第一次振动时,BDS-3 双频 PPP 位移精度为 10.5mm,五频 PPP 位移精度为 7.9mm,相比较而言,五频 PPP 较双频 PPP 位移精度提升了 25%。第二次振动时,BDS-3 双频 PPP 和五频 PPP 位移精度分别为 9.2mm 和 8.8mm,五频相对双频提升了 4%。第三次振动时,BDS-3 双频 PPP 和五频 PPP 位移精度分别为 9.8mm 和 8.8mm,五频相对双频位移精度提升了 10%。综合 3 次振动表现来看,BDS-3 单系统非组合五频 PPP 较双频 PPP 在振动情形下位移监测精度平均能够提升 13%。

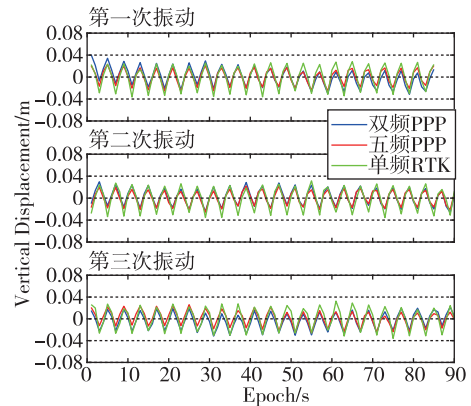


图 8 3 次垂直振动下 BDS-3 单系统双频和五频非组合 PPP 位移图

Fig. 8 Displacements derived by BDS-3 dual-frequency and five-frequency uncombined PPP for three vertical vibration tests

图 9 展示了 3 次振动情况下 Galileo 单系统双频和五频非组合 PPP 动态解算结果。可以看出,Galileo PPP 结果优于 GPS PPP 结果,次于 BDS-3 PPP 结果。在第二次振动时,Galileo PPP 定位结果产生了漂移,到第三次振动时,漂移效果更加严重。第一次振动时,Galileo 双频和五频 PPP 位移监测精度都为 9.1mm。而第二次振动时,Galileo 双频 PPP 和五频 PPP 位移精度分别为 14.0mm 和 10.8mm,五频相对双频位移精度提升了 23%。第三次振动时,Galileo 双频 PPP 和五频 PPP 位移监测精度分别达到 21.1mm

和 17.3mm,五频相对双频位移精度提升了 18%。综合 3 次振动表现来看,Galileo 单系统非组合五频 PPP 较双频 PPP 在振动情形下位移监测精度平均能够提升 14%,多频观测值引入有利于提升 PPP 位置解算稳定性,减弱位移监测结果漂移。

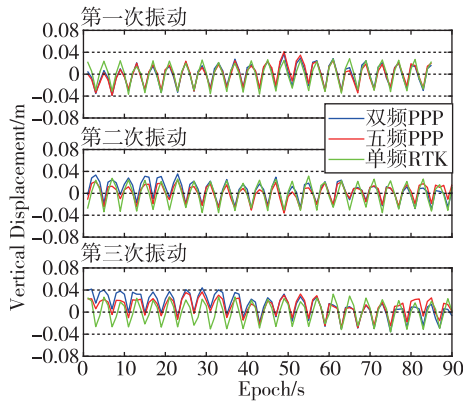


图 9 3 次垂直振动下 Galileo 单系统双频和五频非组合 PPP 位移图

Fig. 9 Displacements derived by Galileo dual-frequency and five-frequency uncombined PPP for three vertical vibration tests

2.3 静止状态下的多频 PPP 位移监测结果分析

选取 3 次振动前 170s 静止状态下的观测数据,对比分析了 GNSS 多频 PPP 和双频 PPP 在未发生振动阶段的位移监测精度。表 1 给出了 3 个静止时间段 GPS、BDS-3 与 Galileo 单系统双频和多频非组合 PPP 垂直方向位移序列 RMS 统计值。从表 1 结果可知,GPS 三频 PPP 较双频 PPP 在 3 次静止状态下的位移监测精度分别提高了 1.9mm、0.3mm 和 0.8mm,BDS-3 五频 PPP 较双频 PPP 在 3 次静止状态下的位移监测精度分别提高了 0.2mm、4.1mm

表 1 3 个静止时间段 GNSS 双频和多频非组合 PPP 垂直方向位移序列 RMS 统计值

Tab. 1 RMS statistics of vertical displacement time series derived by GNSS dual-frequency and multi-frequency uncombined PPP for three time spans without vibration

时间段	GPS		BDS-3		Galileo	
	双频	三频	双频	五频	双频	五频
第一次静止	22.1	20.2	10.6	10.4	16.3	15.6
第二次静止	15.8	15.5	18.2	14.1	25.0	20.5
第三次静止	18.4	17.6	6.4	5.7	15.0	10.0

和 0.7m,Galileo 五频 PPP 较双频 PPP 在 3 次静止状态下的位移监测精度分别提高了 0.7mm、4.5mm 和 5.0mm。综合来看,各系统多频 PPP 较双频 PPP 在静止状态下的位移监测精度均有所提升,表明多频观测值也有利于提高 PPP 技术在静态监测场景下的监测精度与可靠性。

3 结论

本文基于非组合模型扩展了多频 PPP 数据处理的严密理论模型,分析了每个频点 DCB 以及 GPS PIFCB 的影响和改正方法,研究表明,改正完 DCB、PIFCB 后,多频 PPP 定位性能得到显著改善。基于振动台装置模拟振动实验,结果表明,PPP 技术应用于高楼、桥梁等振动监测情形下是可行的,特别在大范围地震、高层建筑和跨海大桥等振动监测中,PPP 监测技术将更有优势。多频数据处理结果也表明,在振动监测场景下,GPS 单系统三频 PPP 较双频 PPP 位移监测精度能够提升 12%,BDS-3 单系统五频 PPP 较双频 PPP 位移监测精度能够提升 13%,Galileo 单系统五频 PPP 较双频 PPP 位移监测精度能够提升 14%。在静态监测场景下,各系统多频 PPP 较双频 PPP 位移监测精度也均有所提升。得益于更多的测量冗余,多频 PPP 技术有利于提升 PPP 位移监测精度与稳定性以及提高 PPP 技术应用在振动监测领域的可行性。

参考文献

- [1] Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1997, 102(B3): 5005-5017.
- [2] 王利, 张勤, 黄观文, 等. GPS PPP 技术用于滑坡监测的试验与结果分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 2118-2124.
Wang Li, Zhang Qin, Huang Guanwen, et al. Experiment results and analysis of landslide monitoring by using GPS PPP technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 2118-2124(in Chinese).
- [3] 匡翠林, 易重海, 戴吾蛟, 等. GPS 精密单点定位方法监测高层建筑风致响应[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(11): 4588-4596.
Kuang Cuilin, Yi Zhonghai, Dai Wujiao, et al. Measuring wind-induced response characteristics of tall building based on GPS PPP method[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),

- 2013, 44(11): 4588-4596(in Chinese).
- [4] 王炜栋, 王明孝. 基于 BDS PPP 技术的超高层建筑变形监测[J]. 全球定位系统, 2019, 44(6): 58-62.
Wang Weidong, Wang Mingxiao. Deformation monitoring of super high-rise buildings based on BDS PPP[J]. GNSS World of China, 2019, 44(6): 58-62(in Chinese).
- [5] 李黎, 龙四春, 王潜心, 等. 基于精密单点定位技术的矿山变形监测分析[J]. 测绘科学, 2014, 39(6): 70-73.
Li Li, Long Sichun, Wang Qianxin, et al. Analysis of mining deformation monitoring based on PPP technology [J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(6): 70-73(in Chinese).
- [6] 卞和方. 区域增强 PPP 技术及其在矿区变形监测应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
Bian Hefang. Regional augmentation-based precise point positioning and its application in mining monitoring deformation[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013(in Chinese).
- [7] 吴萧楠, 何秀凤, 何丽娜, 等. 精密单点定位技术的塞文大桥变形监测[J]. 测绘科学, 2020, 45(11): 41-47.
Wu Xiaonan, He Xiufeng, He Lina, et al. Deformation monitoring of Severn bridge based on precise point positioning technology[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(11): 41-47(in Chinese).
- [8] 张耕, 赵言, 黎慕韩, 等. 利用 PPP 固定解提取桥梁变形的可行性分析[J]. 测绘通报, 2015(6): 57-60.
Zhang Geng, Zhao Yan, Li Muhan, et al. Feasibility analysis of using PPP fixed solutions for extracting bridge deformation[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(6): 57-60(in Chinese).
- [9] Geng J, Jiang P, Liu J. Integrating GPS with GLO-NASS for high-rate seismogeodesy[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(7): 3139-3146.
- [10] Geng J, Pan Y, Li X, et al. Noise characteristics of high-rate multi-GNSS for subdaily crustal deformation monitoring[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, 123(2): 1987-2002.
- [11] Pan L, Zhang X, Li X, et al. GPS inter-frequency clock bias modeling and prediction for real-time precise point positioning[J]. GPS Solutions, 2018, 22(3): 1-15.
- [12] Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P. Differential code bias estimation using multi-GNSS observations and global ionosphere maps[J]. Navigation-US, 2014, 61(3): 191-201.
- [13] Wang N, Yuan Y, Li Z, et al. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations [J]. Journal of Geodesy, 2016, 90(3): 209-228.
- [14] Zhang F, Chai H, Wang M, et al. Considering inter-frequency clock bias for GLONASS FDMA+ CDMA precise point positioning[J]. GPS Solutions, 2023, 27(1): 1-11.
- [15] Li H, Zhou X, Wu B. Fast estimation and analysis of the inter-frequency clock bias for Block IIF satellites [J]. GPS Solutions, 2013, 17(3): 347-355.
- [16] Pan L, Zhang X, Li X, et al. Characteristics of inter-frequency clock bias for Block IIF satellites and its effect on triple-frequency GPS precise point positioning[J]. GPS Solutions, 2017, 21(2): 811-822.
- [17] Pan L, Zhang X, Guo F, et al. GPS inter-frequency clock bias estimation for both uncombined and ionospheric-free combined triple-frequency precise point positioning[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(4): 473-487.

(编辑:孟彬)