

Galileo三频非组合PPP相位小数偏差估计与模糊度解算

熊博文, 潘林, 裴根, 刘宁, 章湘粤, 邓民

Fractional cycle bias estimation and ambiguity resolution for Galileo triple-frequency uncombined PPP

XIONG Bowen, PAN Lin, PEI Gen, LIU Ning, ZHANG Xiangyue, and DENG Min

引用本文:

熊博文, 潘林, 裴根, 等. Galileo三频非组合PPP相位小数偏差估计与模糊度解算[J]. 全球定位系统, 2024, 49(3): 51–56. DOI: [10.12265/j.gnss.2023157](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023157)

XIONG Bowen, PAN Lin, PEI Gen, et al. Fractional cycle bias estimation and ambiguity resolution for Galileo triple-frequency uncombined PPP[J]. *Gnss World of China*, 2024, 49(3): 51–56. DOI: [10.12265/j.gnss.2023157](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023157)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023157>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

BDS三频与双频模糊度解算性能分析

Performance Analysis of BDS Triple-frequency and Dual-frequency Ambiguity Resolution

全球定位系统. 2017, 42(4): 60–65

地基伪卫星单历元三频组合逐级模糊度解算方法

Single epoch three carrier ambiguity resolution for ground base positioning system

全球定位系统. 2020, 45(2): 44–48

非差FCB估计及其在PPP模糊度固定中的应用

Non-difference FCB estimation and the application in fixed fuzziness of PPP

全球定位系统. 2019, 44(3): 32–37

非组合模型下Galileo双频与三频短基线解算精度分析

Accuracy analysis of Galileo dual-frequency and triple-frequency short baseline solution under the condition of non-combined model

全球定位系统. 2021, 46(3): 99–103

Galileo双频/三频SPP定位精度分析

Galileo dual/triple frequency SPP positioning accuracy analysis

全球定位系统. 2020, 45(6): 69–73

一种单频单历元BDS / GPS组合整周模糊度解算方法

An Ambiguity Algorithm for Single Frequency and Single Epoch Combination of GPS and BDS

全球定位系统. 2018, 43(1): 75–80



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

Galileo 三频非组合 PPP 相位小数偏差估计与模糊度解算

熊博文, 潘林, 裴根, 刘宁, 章湘粤, 邓民

(中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘 要: 欧洲的 Galileo 目前已经有 28 颗在轨可用卫星, 具备全球精密定位能力, 并且所有卫星均能够播发多频信号, 多频信号融合有望进一步改善精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 模糊度固定解性能。本文研究了 Galileo 三频非组合 PPP 相位小数偏差 (fractional cycle bias, FCB) 估计与模糊度解算 (ambiguity resolution, AR) 方法, 并将其结果同双频非组合 PPP 模糊度固定解与浮点解结果进行了对比分析。结果表明: 利用 155 个全球分布的地面跟踪站数据进行 FCB 估计, 单个频率上的 FCB 估值序列标准差 (standard deviation, STD) 优于 0.04 周; 双频 PPP 浮点解在 E、N、U 方向收敛时间分别为 32.0 min、10.0 min、43.5 min, 双频 PPP 固定解收敛时间分别减少到 30.5 min、8.5 min、32.0 min, 三频 PPP 固定解收敛时间分别进一步缩短到 16.5 min、8.0 min、32.0 min。

关键词: 相位小数偏差 (FCB); 模糊度解算 (AR); 精密单点定位 (PPP); 三频信号; Galileo

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2024)03-0051-06

0 引 言

精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 是一种基于单台 GNSS 接收机的载波相位和伪距观测值, 采用卫星轨道、钟差等高精度产品, 通过观测值组合、模型改正、参数估计等方法削弱信号传播路径、卫星端、接收机端误差, 从而实现高精度定位的一种技术^[1-2]。PPP 无需架设地面基准站, 不受作业距离限制, 具有成本低、数据处理简单等优点, 并且可以直接获得同国际地球参考框架 (International Terrestrial Reference Frame, ITRF) 相一致的高精度测站坐标, 兼具标准单点定位和相对定位的优点, 因而 PPP 已成为卫星导航定位技术领域的热点研究方向之一。随着美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧洲的 Galileo 和中国北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 四大 GNSS 的蓬勃发展, 在轨的 GNSS 导航卫星数目越来越多, 播发的导航信号种类与频率也愈加丰富, 为 PPP 技术的研究与应用注入了新的活力。多星座观测条件下, 由于观测卫星数

目显著增加, 卫星几何构型增强, 观测冗余度更高, 能够提升 PPP 的可靠性, 而多频融合能够充分利用观测值, 增加观测冗余度, 多频多星座 GNSS 融合处理能够较大地改善定位精度和收敛速度, 推动 PPP 技术向更准确、更快速的方向发展。

目前 PPP 技术已经提出二十余年, 相关的 PPP 理论、方法、技术、应用都已经积累了相当多的经验, 取得了长足的进步, 正在逐步走向成熟。传统的 PPP 浮点解技术无法通过双差消除相位小数偏差 (fractional cycle bias, FCB), 因此模糊度表现为浮点值, 限制了 PPP 精度的进一步提升。高精度 FCB 估值可以恢复用户端模糊度的整数特性, 从而实现 PPP 模糊度固定解, 提高 PPP 的收敛速度和精度, 是目前 PPP 技术的重要发展方向。最早在 1999 年, Gabor 等^[3]尝试通过星间单差消除接收机端的 FCB, 虽然成功估计出卫星端宽巷 FCB, 但是受限于当时国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 产品的精度, 没能成功固定窄巷模糊度。Ge 等^[4]在 2008 年使用全球 100 个测站观测数据成功估计了星间单差 FCB,

收稿日期: 2023-07-26

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41904030)

通信作者: 潘林 E-mail: linpan@csu.edu.cn

并成功实现模糊度固定,发现模糊度固定可以有效改善小时解的定位精度,此方法被称为 FCB 分离法.法国国家太空研究中心的 Laurichesse 等^[5]通过固定宽巷和窄巷模糊度为整数,将卫星端的 FCB 和卫星钟差参数合并为一个参数进行估计,由此得到的卫星钟差称之为“整数钟”,用户端基于“整数钟”产品即可获得模糊度固定的位置解,此方法被称为整数钟法. Collins 等^[6]提出了钟差去耦模型,通过分别估计伪距和载波相位的卫星钟来恢复非差模糊度的整数特性,也成功固定了非差整周模糊度.

当前 Galileo 已经具备 28 颗在轨可用卫星,能够独立提供定位、导航和授时 (positioning, navigating, timing, PNT) 服务.所有 Galileo 卫星 (除 E20) 均能播发多频信号,这为多频模糊度固定研究打下了坚实的基础.相比于双频模糊度解算 (ambiguity resolution, AR),多频 AR 在模糊度固定成功率与可靠性方面有着显著的优势.为了利用多频观测值,研究人员提出了基于消电离层组合和非组合模型的多种三频 PPP 模型^[7-9]. Geng 等^[10]基于仿真数据提出了一种引入 L2/L5 超宽巷组合达成 GPS 三频模糊度固定的方法,实现了 PPP 的快速收敛,结果显示三频窄巷固定成功率在 65 s 内能够达到 99%,而在双频中 150 s 内固定率也只有 64%. Gu 等^[11]研究了仅固定超宽巷和宽巷模糊度的北斗二号 (BeiDou-2 Navigation Satellite System, BDS-2) 三频 PPP. Li 等^[12]在静态和动态模式下实现了单 BDS、单 Galileo、BDS+Galileo 双系统组合下的三频 PPP 模糊度固定,结果显示,三频 PPP AR 方案在首次固定时间和定位精度方面的性能均优于双频 PPP AR 方案,这些优势在单 Galileo 方案和 BDS+Galileo 方案中尤为明显.以往的研究已经证明多频 AR 有利于提高 PPP 收敛速度与定位精度,但当前关于多频 PPP AR 的研究仍然有限,多频融合对于提高 PPP 在实际应用中的可靠性与精度值得进一步探索.为此,本文研究了 Galileo 三频非组合 PPP FCB 精密估计与快速 AR 方法,并同双频非组合 PPP 模糊度固定解与浮点解结果进行了对比分析.

1 FCB 估计与 AR 方法

单个频率上的 Galileo 伪距和相位观测值可以表示为

$$\begin{cases} P_{r,n}^s = \rho_r^s + cdt_r - cdt^s + \gamma_n \cdot I_{r,1}^s + T_r^s \\ \quad + b_{r,n} + b_n^s + \varepsilon_{r,n}^s \\ L_{r,n}^s = \rho_r^s + cdt_r - cdt^s - \gamma_n \cdot I_{r,1}^s + T_r^s \\ \quad + \lambda_n \cdot (B_{r,n} + B_n^s) + \lambda_n \cdot N_{r,n}^s + \xi_{r,n}^s \end{cases} \quad (1)$$

式中: s 为 Galileo 卫星; r 为接收机; $n(n=1,2,3)$ 为一个频率; $P_{r,n}^s$ 和 $L_{r,n}^s$ 分别为伪距和载波相位观测值; ρ_r^s 为接收机同卫星之间的几何距离; cdt_r 和 cdt^s 分别为接收机钟差和卫星钟差; $I_{r,1}^s$ 为 E1 频率的斜路径电离层延迟; γ_n 为电离层延迟因子 ($\gamma_n = f_1^2 / f_n^2$); f_n 为载波频率; T_r^s 为斜路径对流层延迟; λ_n 为波长; $b_{r,n}$ 和 b_n^s 分别为接收机端和卫星端的伪距硬件延迟; $B_{r,n}$ 和 B_n^s 分别为载波相关的接收机端和卫星端硬件延迟; $N_{r,n}^s$ 为整周相位模糊度; $\varepsilon_{r,n}^s$ 和 $\xi_{r,n}^s$ 分别为包含多路径误差的伪距和相位测量噪声.

应用精密卫星轨道、精密卫星钟差、差分码偏差等产品,并采用先验模型改正对流层延迟干分量后, Galileo E1/E5a/E5b 三频非组合 PPP 线性化后的观测模型可以表示如下:

$$\begin{cases} p_{r,1}^s = \mathbf{g}_r^s \cdot \mathbf{x}_r + cdt_{r,IF12} + m_r^s \cdot Z_{w,r} \\ \quad + I_{r,UC123}^s + \varepsilon_{r,1}^s \\ p_{r,2}^s = \mathbf{g}_r^s \cdot \mathbf{x}_r + cdt_{r,IF12} + m_r^s \cdot Z_{w,r} \\ \quad + \gamma_2 \cdot I_{r,UC123}^s + \varepsilon_{r,2}^s \\ p_{r,3}^s = \mathbf{g}_r^s \cdot \mathbf{x}_r + cdt_{r,IF12} + m_r^s \cdot Z_{w,r} \\ \quad + \gamma_3 \cdot I_{r,UC123}^s + g_{UC3,r} + \varepsilon_{r,3}^s \\ l_{r,1}^s = \mathbf{g}_r^s \cdot \mathbf{x}_r + cdt_{r,IF12} + m_r^s \cdot Z_{w,r} \\ \quad - I_{r,UC123}^s + \lambda_1 \cdot \tilde{N}_{r,1}^s + \xi_{r,1}^s \\ l_{r,2}^s = \mathbf{g}_r^s \cdot \mathbf{x}_r + cdt_{r,IF12} + m_r^s \cdot Z_{w,r} \\ \quad - \gamma_2 \cdot I_{r,UC123}^s + \lambda_2 \cdot \tilde{N}_{r,2}^s + \xi_{r,2}^s \\ l_{r,3}^s = \mathbf{g}_r^s \cdot \mathbf{x}_r + cdt_{r,IF12} + m_r^s \cdot Z_{w,r} \\ \quad - \gamma_3 \cdot I_{r,UC123}^s + \lambda_3 \cdot \tilde{N}_{r,3}^s + \xi_{r,3}^s \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} cdt_{r,IF12} = cdt_r + a_{12,1} \cdot b_{r,1} + a_{12,2} \cdot b_{r,2} \\ I_{r,UC123}^s = I_{r,1}^s - a_{12,2} \cdot (b_{r,2} - b_{r,1}) \\ g_{UC3,r} = (-\gamma_3 \cdot a_{12,2} - a_{12,1}) \cdot b_{r,1} \\ \quad - a_{12,2} \cdot (1 - \gamma_3) \cdot b_{r,2} + b_{r,3} \\ \tilde{N}_{r,1}^s = N_{r,1}^s + B_{r,1} + B_1^s + [-b_1^s - (a_{12,1} \\ \quad - a_{12,2}) \cdot b_{r,1} - 2 \cdot a_{12,2} \cdot b_{r,2}] / \lambda_1 \\ \tilde{N}_{r,2}^s = N_{r,2}^s + B_{r,2} + B_2^s + [-b_2^s - (a_{12,1} \\ \quad - \gamma_2 \cdot a_{12,2}) \cdot b_{r,1} - a_{12,2} \cdot (1 + \gamma_2) \cdot b_{r,2}] / \lambda_2 \\ \tilde{N}_{r,3}^s = N_{r,3}^s + B_{r,3} + B_3^s + [-b_3^s - (a_{12,1} \\ \quad - \gamma_3 \cdot a_{12,2}) \cdot b_{r,1} - a_{12,2} \cdot (1 + \gamma_3) \cdot b_{r,2}] / \lambda_3 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} a_{12,1} = f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2) \\ a_{12,2} = -f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $p_{r,n}^s$ 和 $l_{r,n}^s$ 分别为伪距和载波相位观测值 (观测值减去计算值); $\mathbf{g}_r^s$ 为视线方向单位向量; $\mathbf{x}_r$ 为接收机三维坐标; $cdt_{r,IF12}$ 为吸收了接收机端无电离层组合伪距硬件延迟的接收机钟差估值; m_r^s 为湿对流层延迟的映射函数; $Z_{w,r}$ 为天顶对流层湿延迟; $I_{r,UC123}^s$ 为斜路径电离层延迟估值 (吸收了接收机端伪距硬件延迟); $g_{UC3,r}$ 为频间偏差 (inter-frequency bias, IFB) 参数 (由

于接收机钟差和电离层延迟参数在三频模式下不能完全吸收接收机端伪距硬件延迟); $\bar{N}_{r,n}^s$ 为三频非组合模型下的浮点模糊度估值 (吸收了接收机端和卫星端伪距与相位硬件延迟)。

单站 Galileo 三频非组合 PPP 浮点解对应的待估参数包括接收机三维坐标、接收机钟差、天顶对流层湿延迟、IFB、斜路径电离层延迟、三个频率浮点相位模糊度, 可以表示为

$$\mathbf{S} = [x_r, \text{cdt}_{r,\text{IFB}}, Z_{w,r}, g_{\text{UC3},r}, I_{r,\text{UC123}}, \bar{N}_{r,1}^s, \bar{N}_{r,2}^s, \bar{N}_{r,3}^s] \quad (5)$$

式中, $\mathbf{S}$ 表示估值向量。

在 Galileo 三频非组合 PPP 中, 三频相位模糊度间以及和电离层参数之间存在着高度相关性, 这会降低 FCB 估值的精度和可靠性。为削弱这些负面影响, 可以在三频原始模糊度间构造线性组合。一般来说, 组合后模糊度对应的相位观测值, 其波长相对较长, 并较少受到电离层延迟误差的影响。线性组合模糊度可以表示为

$$\begin{cases} \bar{N}_{r,\text{COM1}}^s = q_1 \cdot \bar{N}_{r,1}^s + y_1 \cdot \bar{N}_{r,2}^s + z_1 \cdot \bar{N}_{r,3}^s \\ \quad = N_{r,\text{COM1}}^s + R_{r,\text{COM1}}^s \\ \bar{N}_{r,\text{COM2}}^s = q_2 \cdot \bar{N}_{r,1}^s + y_2 \cdot \bar{N}_{r,2}^s + z_2 \cdot \bar{N}_{r,3}^s \\ \quad = N_{r,\text{COM2}}^s + R_{r,\text{COM2}}^s \\ \bar{N}_{r,\text{COM3}}^s = q_3 \cdot \bar{N}_{r,1}^s + y_3 \cdot \bar{N}_{r,2}^s + z_3 \cdot \bar{N}_{r,3}^s \\ \quad = N_{r,\text{COM3}}^s + R_{r,\text{COM3}}^s \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\bar{N}_{r,\text{COM}n}^s$ 为线性组合的浮点相位模糊度估值; $N_{r,\text{COM}n}^s$ 为整周部分; $R_{r,\text{COM}n}^s$ 为小数部分 (包含线性组合的接收机端和卫星端 FCB); q_n 、 y_n 、 z_n 为线性组合系数。

由于线性组合模糊度波长较长, 可以通过直接取整的方式分离得到 $R_{r,\text{COM}n}^s$, 之后可利用地面跟踪网多个测站 $R_{r,\text{COM}n}^s$ 估值, 通过最小二乘平差方法, 并引入某颗卫星线性组合 FCB 值为 0 这一基准, 估计得到所有卫星线性组合的 FCB。在得到三个线性组合所有卫星的 FCB 估值后, 通过如下线性变换得到所有卫星三个频率上的非组合 FCB 估值, 即

$$\begin{bmatrix} u_1^s \\ u_2^s \\ u_3^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 & y_1 & z_1 \\ q_2 & y_2 & z_2 \\ q_3 & y_3 & z_3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} u_{\text{COM1}}^s \\ u_{\text{COM2}}^s \\ u_{\text{COM3}}^s \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $u_{\text{COM}n}^s$ 为卫星端线性组合的 FCB 估值; u_n^s 为卫星端单个频率上非组合 FCB 估值。

在用户端 PPP AR 中, 为提高模糊度固定的成功率和可靠性, 首先利用三频原始模糊度估值构造超宽

巷模糊度估值, 利用非组合 FCB 估值获取超宽巷模糊度对应的 FCB 改正值, 恢复模糊度整数特性后采用直接取整的方法固定模糊度, 固定成功的超宽巷模糊度作为虚拟观测值引入到观测模型中辅助后续模糊度解算; 然后利用三频原始模糊度估值构造宽巷模糊度估值, 其模糊度解算流程和超宽巷模糊度类似; 最后, 尝试固定 E1 频率上的窄巷模糊度估值, 利用 FCB 估值恢复模糊度整数特性后, 由于其波长较短, 采用最小二乘模糊度降相关平差 (Least-squares Ambiguity decorrelation adjustment, LAMBDA) 方法进行窄巷 AR, 在全部模糊度固定不成功情况下, 采用部分模糊度固定方法^[13], 模糊度固定成功后同样作为虚拟观测值引入到观测模型中增强接收机位置解算。

传统多频 FCB 估计方法多基于消电离层组合, 估计得到的 FCB 产品应用时受到 PPP 数学模型限制, 多频 PPP AR 只能采用和多频 FCB 估计相一致的模型。相比之下, 本文三频非组合 FCB 估计方法具有很好的灵活性, 不仅能够适用于三频非组合 PPP AR, 还能够向下兼容任意双频非组合 PPP AR。此外, 三频非组合 PPP AR 还可以进一步引入先验电离层延迟增强信息。

2 结果与分析

为确保 FCB 估值的精度和可靠性, 选取全球分布的 155 个多 GNSS 实验 (Multi-GNSS Experiment, MGEX) 跟踪站 2021 年 11 月 8 日的数据进行 FCB 估计, 所有测站均支持 Galileo E1、E5a、E5b 三频信号, 观测值采样间隔为 30 s, 截止高度角设为 7.5°, 精密星历采用由欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 生成的产品。图 1 给出了 155 个 MGEX 测站的地理分布。

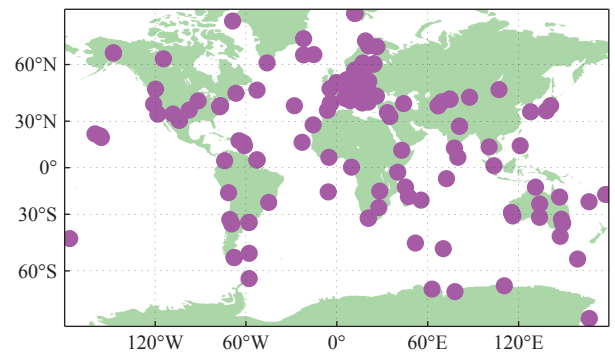


图 1 155 个 MGEX 站地理分布

图 2 展示了 2021 年 11 月 8 日一整天的 E5a-E5b 超宽巷、E1-E5a 宽巷、4×E1-3×E5a 窄巷 FCB 估值序列 (每 15 min 一组估值), 图中不同的颜色代表不

同的卫星. 由图 2 可知, 超宽巷、宽巷、窄巷组合 FCB 估值序列取值范围为 ± 0.5 周, 且单颗卫星 FCB 序列非常稳定, 一天内的标准差 (standard deviation, STD) 统计值均为 0.01 周. 根据式 (7), 将超宽巷、宽巷、窄巷组合 FCB 转换至原始频点的 FCB 序列, 结果如图 3 所示. 可见, 各颗 Galileo 卫星在 E1、E5a、E5b 频率对应的非组合 FCB 估值序列也比较稳定, 一天内的 STD 统计值分别为 0.03 周、0.04 周、0.04 周, 证明了本文 FCB 估计方法的可靠性和有效性.

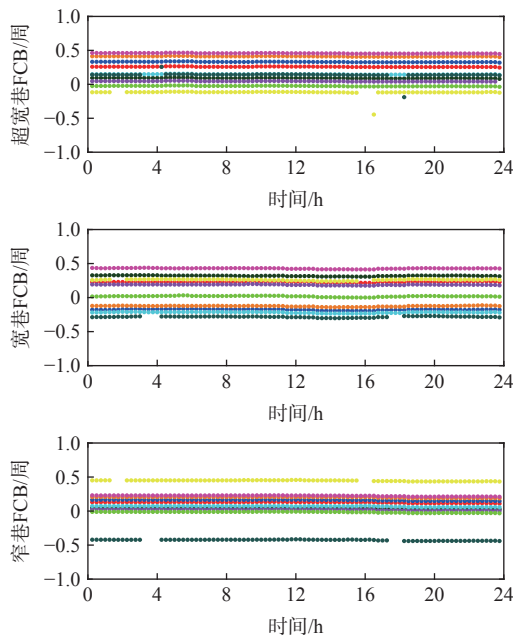


图 2 2021 年 11 月 8 日 E5a-E5b 超宽巷、E1-E5a 宽巷、 $4 \times E1-3 \times E5a$ 窄巷 FCB 估值序列

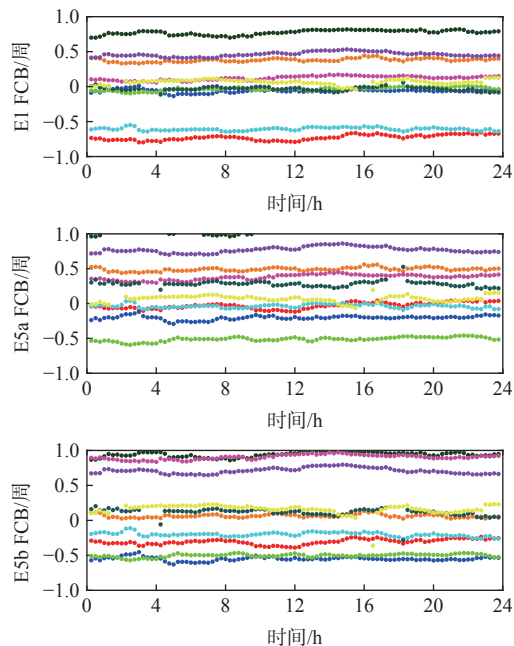


图 3 2021 年 11 月 8 日 E1、E5a、E5b 非组合 FCB 估值序列

为了评估用户端三频 PPP 模糊度固定解性能, 选取全球分布的 35 个 MGEX 站 2021 年 11 月 8 日观测数据进行用户端定位验证. 图 4 给出了 35 个 MGEX 站的地理分布.

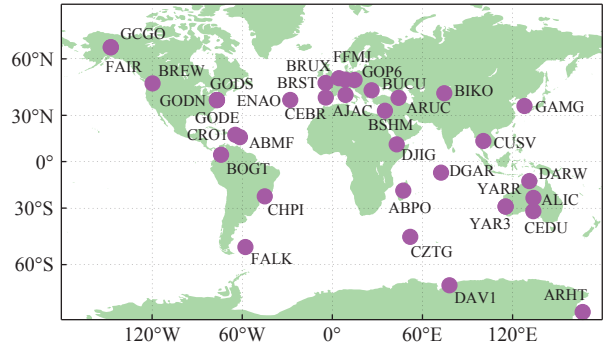


图 4 用于定位验证的 35 个 MGEX 站地理分布

为了进行对比分析, 图 5 同时给出了 ARHT 站双频 PPP 浮点解、双频 PPP 固定解、三频 PPP 固定解前 1 h 定位误差序列, 图 6 给出了 BRUX 站相应结果. 数据解算采用静态模式, 接收机位置估计为常数. 由图 5 和图 6 可知, 在双频处理中, 模糊度固定成功后, 位置解收敛速度大幅提高, 而引入三频数据后收敛时间进一步缩短.

图 7 进一步给出了三种 PPP 方案前 1 h 定位精度序列, 每个历元定位精度指的是所有测站相同历元定位误差的均方根 (root mean square, RMS) 统计值. 当定位精度优于 10 cm 时, 可认为位置解收敛. 双频 PPP 浮点解在 E、N、U 方向收敛时间分别为 32.0 min、10.0 min、43.5 min, 双频 PPP 固定解收敛时间分别减

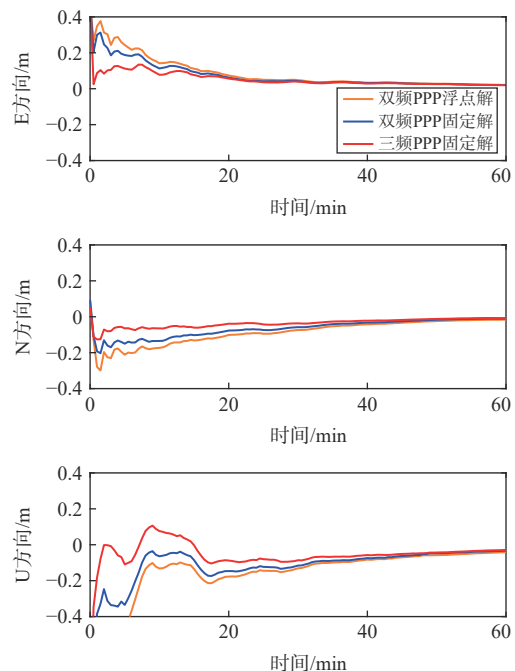


图 5 ARHT 站三种 PPP 方案前 1 h 定位误差

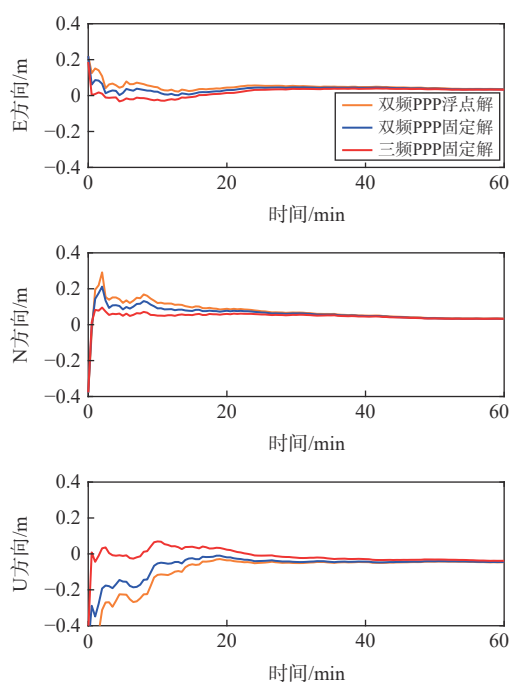


图6 BRUX站三种PPP方案前1h定位误差

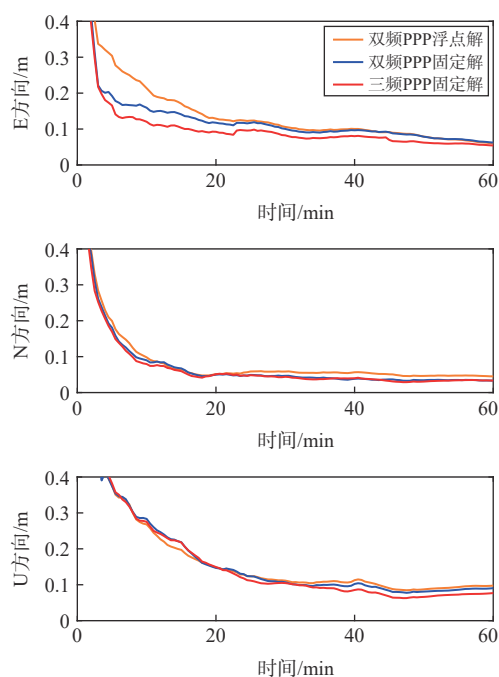


图7 三种PPP方案前1h定位精度(采样间隔30s)

少到 30.5 min、8.5 min、32.0 min, 三频 PPP 固定解收敛时间进一步缩短到 16.5 min、8.0 min、32.0 min。在 1 h 定位精度方面, 三频固定解最优, 双频固定解次之, 双频浮点解最差, 三频固定解在 E、N、U 三个方向定位精度分别为 5.4 cm、3.3 cm、7.7 cm, 相比于双频浮点解精度改善率为 9%、26%、21%, 相比于双频固定解精度改善率为 13%、0%、15%。在 24 h 定位精度方面, 三种方案在同一水平, 三个方向定位精度分别为 4 mm、3 mm、13 mm。

3 结束语

模糊度解算可以充分利用载波相位的整数特性, 提高短时间内 PPP 定位性能, 而多频融合可以构建更多具有优良性质的超宽巷、宽巷模糊度, 提高模糊度固定的成功率和可靠性。本文发展了 Galileo 三频非组合 PPP FCB 精密估计与快速 AR 方法, 其最大特点是直接利用各频率上原始浮点模糊度估值进行处理, 可以削弱伪距测量噪声和多路径误差的影响。实验结果表明, 利用全球分布的 155 个 MGEX 测站提供的 Galileo 观测数据进行 FCB 估计, E1、E5a、E5b 非组合 FCB 估值序列的 STD 统计值优于 0.04 周。三频 PPP 固定解在 E、N、U 方向收敛时间为 16.5 min、8.0 min、32.0 min, 1 h 定位精度三个方向分别为 5.4 cm、3.3 cm、7.7 cm, 显著优于双频浮点解与固定解, 但在 24 h 定位精度方面, 三种方案在同一水平, 三个方向定位精度分别为 4 mm、3 mm、13 mm。

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. DOI: 10.1029/96JB03860
- [2] HÉROUX P, KOUBA J. GPS precise point positioning using IGS orbit products[J]. *Physics and chemistry of the earth, part A: solid earth and geodesy*, 2001, 26(6-8): 573-578. DOI:10.1016/S1464-1895(01)00103-X
- [3] GABOR M J, NEREM R S. GPS carrier phase ambiguity resolution using satellite-satellite single differences[C]// The 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1999), 1999: 1569-1578.
- [4] 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. DOI: 10.1007/s00190-007-0187-4
- [5] LAURICHESSE D, MERCIER F, BERTHIAS J-P, et al. Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP[C]//The 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2007), 2007: 839-848. DOI: 10.1002/j.2161-4296.2009.tb01750.x
- [6] COLLINS P, BISNATH S, LAHAYE F, et al. Undifferenced GPS ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing[J]. *Navigation-journal of the*

- institute of navigation, 2010, 57(2): 123-135. DOI: [10.1002/j.2161-4296.2010.tb01772.x](https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.2010.tb01772.x)
- [7] HENKEL P, GUNTHER C. Precise point positioning with multiple Galileo frequencies[C]//2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, 2008. DOI: [10.1109/PLANS.2008.4570102](https://doi.org/10.1109/PLANS.2008.4570102)
- [8] DEO M, EL-MOWAFY A. Triple-frequency GNSS models for PPP with float ambiguity estimation: performance comparison using GPS[J]. *Survey review*, 2016, 50(360): 249-261. DOI: [10.1080/00396265.2016.1263179](https://doi.org/10.1080/00396265.2016.1263179)
- [9] GE Y L, CAO X Y, SHEN F, et al. BDS-3/Galileo time and frequency transfer with quad-frequency precise point positioning[J]. *Remote sensing*, 2021, 13(14): 2704. DOI: [10.3390/rs13142704](https://doi.org/10.3390/rs13142704)
- [10] GENG J, BOCK Y. Triple-frequency GPS precise point positioning with rapid ambiguity resolution[J]. *Journal of geodesy*, 2013, 87(5): 449-460. DOI: [10.1007/s00190-013-0619-2](https://doi.org/10.1007/s00190-013-0619-2)
- [11] GU S F, LOU Y D, SHI C, et al. BeiDou phase bias estimation and its application in precise point positioning with triple-frequency observable[J]. *Journal of geodesy*, 2015, 89(10): 979-992. DOI: [10.1007/s00190-015-0827-z](https://doi.org/10.1007/s00190-015-0827-z)
- [12] LI X X, LI X, LIU G G, et al. Triple-frequency PPP ambiguity resolution with multi-constellation GNSS: BDS and Galileo[J]. *Journal of geodesy*, 2019, 93(8): 1105-1122. DOI: [10.1007/s00190-019-01229-x](https://doi.org/10.1007/s00190-019-01229-x)
- [13] LI P, ZHANG X H. Precise point positioning with partial ambiguity fixing[J]. *Sensors*, 2015, 15(6): 13627-13643. DOI: [10.3390/s150613627](https://doi.org/10.3390/s150613627)

作者简介

熊博文 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为 GNSS 精密定位. E-mail: bowenxiong@csu.edu.cn

潘林 (1989—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为 GNSS 精密定位及其地学应用. E-mail: linpan@csu.edu.cn

裴根 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为 GNSS 数据处理. E-mail: genpei@csu.edu.cn

Fractional cycle bias estimation and ambiguity resolution for Galileo triple-frequency uncombined PPP

XIONG Bowen, PAN Lin, PEI Gen, LIU Ning, ZHANG Xiangyue, DENG Min

(School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Galileo already has 28 in-orbit satellites, with precise positioning capabilities on a global scale. All Galileo satellites are capable of broadcasting multi-frequency signals, and multi-frequency integration is expected to further improve the performance of precise point positioning (PPP) ambiguity-fixed solutions. In this paper, the fractional cycle bias (FCB) estimation method and ambiguity resolution (AR) method for Galileo triple-frequency uncombined (UC) PPP are developed, and the derived results are compared with those of dual-frequency UC PPP ambiguity-fixed and ambiguity-float solutions. The results indicate that the standard deviation (STD) of UC FCB series on a single frequency is better than 0.04 cycles using datasets from 155 globally distributed ground tracking stations. The convergence time of Galileo dual-frequency PPP float solutions in the east, north and up directions is 32.0 min, 10.0 min and 43.5 min, respectively, and the corresponding statistic of dual-frequency PPP fixed solutions is reduced to 30.5 min, 8.5 min and 32.0 min in the three directions, respectively. The convergence time of triple-frequency PPP fixed solutions is further shortened to 16.5 min, 8.0 min and 32.0 min in the three directions, respectively.

Keywords: fractional cycle bias (FCB); ambiguity resolution (AR); precise point positioning (PPP); triple-frequency signals; Galileo