引文格式:章繁,柴洪洲,王敏,等.BDS-3三频非差非组合PPP模糊度快速固定[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(4):656-665.DOI:10.13203/j.whugis20220753

Citation:ZHANG Fan,CHAI Hongzhou,WANG Min,et al.BDS-3 Triple-Frequency Undifferenced and Uncombined PPP Ambiguity Resolution[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(4): 656-665. DOI: 10.13203/j.whugis20220753

BDS-3三频非差非组合PPP模糊度快速固定

章 繁[1] 柴洪洲[2] 王 敏[2] 肖国锐[2]

1 陆军工程大学,江苏 南京,210000

2 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

摘 要:2020年7月底,北斗三号卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system 3,BDS-3)已正式面向全球用户开通高精度位置服务。为充分发挥BDS-3系统的多频服务能力,联合B1I、B3I传统信号和B2a新信号实现了BDS-3三频精密单点定位(precise point positioning,PPP)模糊度固定(ambiguity resolution,AR)。首先利用原始浮点模糊度估计超宽巷、宽巷和窄巷非差未校正相位延迟(uncalibrated phase delay,UPD),然后基于服务端的高精度UPD产品采用超宽巷-宽巷-窄巷模糊度顺序固定的方法实现BDS-3三频PPP模糊度快速固定。重点论证了基于不同尺度UPD产品的BDS-3三频非差非组合PPP AR的性能差异。设置两组实验验证算法性能,实验Ⅰ:先采用2021年年积日第310—324天的多模GNSS实验跟踪网(multi-GNSS experiment,MGEX)全球分布的160个测站估计卫星UPD产品,再利用其他12个测站进行PPP AR计算;实验Ⅱ:首先利用欧洲永久参考站网络(EUREF permanent network,EPN)芬兰境内的15个测站估计UPD,然后采用另5个测站验证PPP AR算法。结果表明,BDS-3超宽巷、宽巷和窄巷UPD产品具有较高的稳定性,标准差均值均优于0.04周,EPN区域UPD产品精度和稳定性高于MGEX全球UPD产品。MGEX全球测站实验中BDS-3三频PPP AR收敛时间最短(25.4 min),相较于双频浮点解的40.1 min和双频PPP AR的36.3 min,减少幅度分别达到36.7%和30.0%;EPN区域测站实验中,三频PPP AR则将收敛时间从双频浮点解的39.7 min和双频PPP AR的30.8 min缩短至25.1 min,减少幅度分别达到36.8%和18.5%。基于MGEX和EPN网络公共测站讨论了使用两种不同尺度的UPD产品实行BDS-3三频PPP AR的性能差异,结果表明,采用EPN区域UPD产品的BDS-3三频PPP AR明显收敛更快、定位精度更高。原因可能有:(1)基于全球参考站网络估计的UPD产品在测站非密集区存在一定程度的精度损失;(2)UPD估计可能与接收机类型存在一定相关性,MGEX全球测站网接收机类型复杂,因此可能会对UPD估计精度造成一定影响。

关键词:BDS-3;不同尺度UPD;B2a信号;三频;PPP模糊度固定

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-02-06

DOI:10.13203/j.whugis20220753 **文章编号**:1671-8860(2025)04-0656-10

BDS-3 Triple-Frequency Undifferenced and Uncombined PPP Ambiguity Resolution

ZHANG Fan[1] *CHAI Hongzhou*[2] *WANG Min*[2] *XIAO Guorui*[2]

1 Army Engineering University, Nanjing 210000, China

2 Institute of Geospatial Information, University of Information Engineering, Zhengzhou 450001, China

Abstract: **Objectives**: China's BeiDou satellite navigation system 3 (BDS-3) is capable of providing high-accuracy positioning services for global clients at the end of July 2020. **Methods**: To fully exploit BDS-3 multi-frequency positioning ability, BDS-3 traditional B1I, B3I and new B2a signals are integrated to employ triple-frequency PPP ambiguity resolution (AR). First, BDS-3 raw float ambiguities are utilized to calculate extra-wide lane (EWL), wide lane (WL) and narrow lane (NL) undifferenced uncalibrated phase delay (UPD). Subsequently, based on the high-accuracy UPD products, the EXL-WL-NL ambiguity se-

基金项目:陆军工程大学青年自主创新基金(KYTYHKQTZQ23010);国家自然科学基金(42074014)。

第一作者:章繁,博士,讲师,研究方向为组合导航、GNSS精密定位。zfan_geodesy@163.com

通信作者:柴洪洲,教授。chaihz1969@163.com

quential fixing at the user side is employed to perform BDS-3 triple-frequency PPP AR. Especially, the performance difference of BDS-3 triple-frequency undifferenced and uncombined PPP AR with different scale UPD products are evaluated. Then two experiments are designed to validate PPP AR. Experiment I: Data from the day of year 310 to 324 in 2021, of 160 MGEX stations are utilized to perform UPD determination and another 12 MGEX stations are used as users for the PPP ambiguity fixing with UPD products. Experiment II: Data from the day of year 310 to 324 on 2021, of 15 EUREF permanent network (EPN) stations are utilized to generate UPD products and another 5 MGEX stations are regarded as clients to validate PPP AR algorithm. **Results:** Experimental results demonstrate that BDS-3 EWL, WL and NL UPDs exhibit high stability with average standard derivations better than 0.04 cycles. The stability and accuracy of UPD products from the EPN regional network are ahead of that of the MGEX global network. In the MGEX experiments, BDS-3 triple-frequency PPP AR achieves the best convergence performance (25.1 min), which is much shorter than dual-frequency float solutions (39.7 min) and dual-frequency PPP AR (36.3 min), with an improvement of about 36.7% and 30.0%. In the EPN experiments, BDS-3 triple-frequency PPP AR reduced the convergence time from 39.7 min of the dual-frequency float solutions and 30.8 min of the dual-frequency PPP AR to 25.1 min, with a decrease of about 36.8% and 18.5%. Finally, the common stations of the MGEX and EPN networks are utilized to validate the performance of BDS-3 triple-frequency PPP AR based on the two different UPD products. **Conclusions:** BDS-3 triple-frequency PPP AR using the EPN regional UPD products exhibits a significantly better positioning performance than MGEX UPDs. The possible reasons can be owned to following two aspects. One is that the UPD products from MGEX global stations shall cause a precision loss in some areas with sparse stations. The other is that the precision of the UPD determination may be dependent on receiver types. MGEX global stations are equipped with complex receivers, and hence the UPD estimation may be contaminated.

Key words: BDS-3; UPD of different scales; B2a signals; triple-frequency; PPP AR

北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system,BDS)由中国政府独立出资建造,旨在为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位,导航和授时服务。截至2020年7月,北斗三号(BDS-3)定位系统已正式建成并开通全球服务,该系统设计采用3颗地球同步轨道(geostationary orbit,GEO)+24颗中地球轨道(medium Earth orbit,MEO)+3颗倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit,IGSO)的卫星星座构成,在BDS-2区域卫星导航系统已播发的B1I(1 561.090 MHz)和B3I(1 268.520 MHz)信号之外,还额外提供B1C(1 575.420 MHz)、B2a(1 176.450 MHz)、B2b(1 207.140 MHz)和B2a+b(1 191.795 MHz)4个公开服务信号,这些新信号与传统信号不同,引入了如BPSK、QPSK、ACE-BOC、QMBOC等新的信号调制方式如表1所示,显著提升了信号性能[1-3]。

目前众多学者已针对北斗二号(BDS-2)区域卫星导航系统展开了深入研究,并取得了丰富的研究成果[4-6],BDS-2已具备亚太地区厘米级的精密单点定位(precise point positioning,PPP)服务能力[6]。然而,传统PPP浮点解仍然受到收敛时间的制约,严重限制了其进一步应用。为解决这一难题,文献[7]率先提出基于未校正相位延迟(uncalibrated phase delay,UPD)产品实现模糊度固定(ambiguity resolution,AR)的相关概念。文献[8]在此基础上,假设接收机和卫星UPD具有较强的稳定性,利用服务端估计的UPD产品来恢复模糊度的整周特性,实验结果表明固定解相较传统PPP浮点解能够提高30%的定位精度。文献[9]首次实现了BDS-2三频PPP AR,结果表明,当成功固定超宽巷(extra-wide lane, EWL)和宽巷(wide lane, WL)模糊度后,PPP定位精度平均提升幅度达20.6%。文献[10]进一步利用亚太地区12个测站实现了BDS-2三频PPP AR,实验结果表明,BDS-2三频PPP AR定位性能优于双频固定解,但仍需要47.4 min才能完成收敛。

随着BDS-3系统的建成使用,众多学者在BDS-3研究方面形成了丰富成果[11-14]。文献[15]研究了BDS-3双频PPP AR定位性能,结果表明固定解在东(east, E)、北(north, N)、天(up, U)3个方向的定位均方根(root mean square,RMS)分别为0.94、0.73和1.39 cm,相较浮点解提升显著。此外,已有研究表明BDS-3系统的频率间钟偏差

表1 BDS-3卫星信号调制方式

Table 1 Signal Modulation Method of BDS-3 Satellites

系统	信号	频率/MHz	调制方式
BDS-3	B1I	1 561.090	BPSK
	B3I	1 268.520	BPSK
	B1C	1 575.420	QMBOC
	B2a	1 176.450	QPSK
	B2b	1 207.140	QPSK
	B2a+b	1 191.795	ACE-BOC

(inter-frequency clock bias,IFCB)量级较小,可忽略其对BDS-3三频PPP影响[16-17]。文献[18]则实现了BDS+GPS+Galileo+QZSS系统三频非差非组合PPP模糊度瞬时固定,文中使用了BDS-3系统B1I/B3I/B2a频率观测值,但主要还是以BDS-2三频模糊度固定为主。总的来看,目前针对BDS-3系统的多频PPP非差模糊度快速固定的研究仍然较少。由于BDS-3系统与GPS、Galileo和GLONASS系统一样,均旨在为全球用户提供高精度位置服务。因此,有必要研究基于全球参考站网和基于区域参考站网的BDS-3系统高精度位置服务能力及其差异,为BDS-3系统的更新发展和全球用户使用提供依据。

为充分发挥BDS-3系统多频服务能力,本文联合B1I、B3I传统信号和B2a新信号实现了BDS-3三频PPP模糊度快速固定。首先利用原始浮点模糊度估计EWL、WL和窄巷(narrow lane,NL)非差UPD,然后基于服务端高精度的UPD产品采用EWL、WL、NL模糊度顺序固定的方法实现三频PPP AR。本文重点讨论基于不同尺度UPD产品的BDS-3三频非差非组合PPP AR性能差异,首先给出BDS-3三频非差非组合PPP模型,然后介绍基于非差非组合PPP模型的EWL、WL和NL UPD估计方法,接着引入用户端三频PPP AR算法进行实验分析。

1 模型原理

目前BDS-3精密卫星钟差基于B1I和B3I消电离层组合计算,因此,在本文的BDS-3三频非差PPP模糊度快速固定研究中,也将B1I和B3I作为基准频率,再选一新频率作为第3个频率观测信号。由于目前MGEX测站网中支持B2a的测站数量远多于其他信号,并且B2a与GPS的L5、Galileo的E5a频率大小相同,3种信号间已达成兼容互操作协议,因此,将B2a频率作为BDS-3三频PPP AR研究的第3个组合频率在一定程度上是最优选择[18]。

1.1 BDS-3三频非差非组合PPP模型

基于载波相位和伪距原始观测值,直接给出BDS-3三频非差非组合PPP观测模型为:

$$\begin{cases}\Delta P_{r,1}^{j}=-\boldsymbol{\gamma}_r^j\boldsymbol{x}_r+c\mathrm{d}\tilde{t}_r^j+\tilde{I}_{r,1}^j+m_r^j z_r\\ \Delta P_{r,2}^{j}=-\boldsymbol{\gamma}_r^j\boldsymbol{x}_r+c\mathrm{d}\tilde{t}_r^j+\mu_2\tilde{I}_{r,1}^j+m_r^j z_r\\ \Delta P_{r,3}^{j}=-\boldsymbol{\gamma}_r^j\boldsymbol{x}_r+c\mathrm{d}\tilde{t}_r^j+\mu_3\tilde{I}_{r,1}^j+m_r^j z_r+\zeta_r^j\\ \Delta L_{r,1}^{j}=-\boldsymbol{\gamma}_r^j\boldsymbol{x}_r+c\mathrm{d}\tilde{t}_r^j-\tilde{I}_{r,1}^j+m_r^j z_r+\lambda_1\overline{N}_{r,1}^{j}\\ \Delta L_{r,2}^{j}=-\boldsymbol{\gamma}_r^j\boldsymbol{x}_r+c\mathrm{d}\tilde{t}_r^j-\mu_2\tilde{I}_{r,1}^j+m_r^j z_r+\lambda_2\overline{N}_{r,2}^{j}\\ \Delta L_{r,3}^{j}=-\boldsymbol{\gamma}_r^j\boldsymbol{x}_r+c\mathrm{d}\tilde{t}_r^j-\mu_3\tilde{I}_{r,1}^j+m_r^j z_r+\lambda_3\overline{N}_{r,3}^{j}\end{cases}\tag{1}$$

式中,$\Delta P_{r,i}^{j}$和$\Delta L_{r,i}^{j}$($i=1,2,3$)分别表示经过模型改正和精密卫星产品改正后的BDS-3伪距和相位观测值减去计算值;j和r分别表示卫星号和测站;$\boldsymbol{\gamma}_r^j$为站星方向向量;$\boldsymbol{x}_r$为三维坐标向量;c代表真空中光速;$\mathrm{d}\tilde{t}_r^j=\mathrm{d}t_r^j+\frac{1}{c}d_{r,\mathrm{IF}}^{j}$表示重新参数化后的接收机钟差,其中$\mathrm{d}t_r^j$表示接收机钟差,$d_{r,\mathrm{IF}}^{j}=\alpha_{12}d_{r,1}^{j}+\beta_{12}d_{r,2}^{j}$表示接收机硬件延迟偏差的消电离层组合,$\alpha_{12}=\frac{f_1^2}{f_1^2-f_2^2}$和$\beta_{12}=-\frac{f_2^2}{f_i^2-f_2^2}$表示组合系数,$d_{r,1}^{j}$和$d_{r,2}^{j}$表示第一和第二频点的接收机硬件延迟;$\tilde{I}_{r,1}^{j}=I_{r,1}^{j}+\beta_{12}(D_{r,12}+D_{12}^{j})$表示重新参数化后的第一频点电离层,其中$I_{r,1}^{j}$表示站星斜向电离层延迟,$D_{r,12}$表示接收机硬件延迟偏差,$D_{12}^{j}$表示卫星硬件延迟偏差;$\mu_i=\left(f_1/f_i\right)^2$表示电离层系数;$z_r$和$m_r^j$分别表示对流层湿分量及其投影函数;$\overline{N}_{r,i}^{j}$表示吸收了硬件延迟的相位模糊度参数;$\lambda_i$代表波长。由于第3个频率伪距观测值使用了与前两个频率相同的接收机钟差参数,因此必须引入一个第三频率的伪距偏差ζ_r^j以吸收该部分硬件延迟。此外,研究表明,BDS-3系统卫星无需考虑频率间钟偏差问题[17]。

1.2 EWL/WL/NL UPD估计

由于原始载波相位模糊度波长较短,容易受到观测噪声和多路径效应等因素影响,无法提取

精确的相位小数偏差产品。因此,采用构造EWL、WL和NL浮点模糊度的方式计算其UPD。首先给出EWL模糊度$\overline{\overline{N}}^{j}_{r,\mathrm{EWL}}$、WL模糊度$\overline{\overline{N}}^{j}_{r,\mathrm{WL}}$和消电离层组合模糊度$\overline{\overline{N}}^{j}_{r,\mathrm{IF}}$为:

$$\begin{cases}\overline{\overline{N}}^{j}_{r,\mathrm{EWL}}=\overline{N}^{j}_{r,2}-\overline{N}^{j}_{r,3}=N^{j}_{r,\mathrm{EWL}}+d_{r,\mathrm{EWL}}-d^{j}_{\mathrm{EWL}}\\ \overline{\overline{N}}^{j}_{r,\mathrm{WL}}=\overline{N}^{j}_{r,1}-\overline{N}^{j}_{r,2}=N^{j}_{r,\mathrm{WL}}+d_{r,\mathrm{WL}}-d^{j}_{\mathrm{WL}}\\ \overline{\overline{N}}^{j}_{r,\mathrm{IF}}=\alpha_{12}\overline{N}^{j}_{r,1}+\beta_{12}\overline{N}^{j}_{r,2}\end{cases}\tag{2}$$

式中,$\overline{N}^{j}_{r,1}$、$\overline{N}^{j}_{r,2}$和$\overline{N}^{j}_{r,3}$表示PPP各历元模糊度实数估值;$d_{r,\mathrm{EWL}}$和$d_{r,\mathrm{WL}}$分别表示EWL和WL接收机UPD;d^{j}_{EWL}和d^{j}_{WL}分别表示EWL和WL卫星UPD。一旦完成WL UPD估计,则将其用于恢复出WL整周模糊度,接着将WL整周模糊度$N^{j}_{r,\mathrm{WL}}$用于构造NL模糊度$\overline{\overline{N}}^{j}_{r,\mathrm{NL}}$如下:

$$\overline{\overline{N}}^{j}_{r,\mathrm{NL}}=\frac{f_1+f_2}{f_1}\overline{\overline{N}}^{j}_{r,\mathrm{IF}}-\frac{f_2}{f_1-f_2}N^{j}_{r,\mathrm{WL}}=N^{j}_{r,\mathrm{NL}}+d_{r,\mathrm{NL}}-d^{j}_{\mathrm{NL}}\tag{3}$$

式中,$d_{r,\mathrm{NL}}$表示接收机端NL UPD;d^{j}_{NL}表示卫星端NL UPD。已有研究表明,当采用相同的数据处理策略,通过非差非组合PPP方法构造的EWL、WL和NL浮点模糊度与消电离层组合PPP方法得到的浮点模糊度具有一致性。但由于消电离层组合方法获取EWL和WL浮点模糊度是基于HMW组合,易受伪距噪声的影响,而非差非组合PPP方法则充分考虑了各参数间的线性相关性,且大幅降低了伪距噪声影响。因此采用非差非组合PPP方法一般可以获得更快收敛且更高精度的模糊度产品。

根据以上构造的BDS-3 EWL、WL和NL浮点模糊度,则可通过非差模型估计接收机和卫星端UPD。假设某一追踪网内有n个测站,每个测站观测有m颗卫星,则EWL、WL和NL UPD可以通过最小二乘的方法估计,计算公式为:

$$\begin{bmatrix}\hat{N}^{1}_{1}-N^{1}_{1}\\ \vdots\\ \hat{N}^{m}_{1}-N^{m}_{1}\\ \hat{N}^{1}_{2}-N^{1}_{2}\\ \vdots\\ \hat{N}^{m}_{2}-N^{m}_{2}\\ \hat{N}^{1}_{n}-N^{1}_{n}\\ \vdots\\ \hat{N}^{m}_{n}-N^{m}_{n}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_1 & \boldsymbol{S}_1\\ \boldsymbol{R}_2 & \boldsymbol{S}_2\\ \vdots & \vdots\\ \boldsymbol{R}_n & \boldsymbol{S}_n\end{bmatrix}\begin{bmatrix}d_{r,\mathrm{mode}}\\ \tilde{d}^{j}_{\mathrm{mode}}\end{bmatrix}\tag{4}$$

式中,$\boldsymbol{R}_i=\left[\underbrace{0\ \cdots\ 0}_{i}\ \ 1\ \ \cdots\ \ 0\right]^{\mathrm{T}}$和$\boldsymbol{S}_i=-\boldsymbol{R}_i=\left[\underbrace{0\ \cdots\ 0}_{i}\ \ -1\ \ \cdots\ \ 0\right]^{\mathrm{T}}$分别表示某一系统接收机和卫星UPD系数;$d_{r,\mathrm{mode}}$和$\overline{d}^{j}_{\mathrm{mode}}$则分别代表接收机和卫星UPD。为消除该方程秩亏,一般可选择一个测站或某一卫星的UPD为0,本文中选择拥有最多观测测站数量的卫星为基准并将其UPD设为0。具体的UPD估计策略为:

1)计算相位小数偏差UPD初值,假设所选的参考卫星UPD为0,然后将该站星模糊度取整为最近的整数值,余下的小数部分即为该接收机的相位小数偏差。

2)对于具有公共测站的下一颗卫星,经过上一步骤中提取的接收机相位小数偏差改正,该颗卫星与该接收机组成的站星模糊度的小数部分即为该颗卫星的UPD。首先通过校正该颗卫星UPD,可获得其他接收机的相位小数偏差,重复上述过程,直至获得所有接收机和卫星的相位小数偏差。然后可将获得的各颗卫星UPD取平均作为其UPD估值以提高可靠性和精度。

3)将上述步骤获得的卫星和接收机UPD设为初值进行下一次迭代。采用最小二乘估计方法估计所有测站和卫星UPD值,通过模糊度残差是否优于±0.25周来判断模糊度是否固定成功。若迭代次数大于10次或者可被固定的模糊度数量减少,即停止迭代。

需要注意的是,本文基于非差模式播发卫星UPD产品,与传统星间单差方式相比,提供的UPD改正数量更少,可以有效降低服务端的数据传输压力。在用户端使用的时候,可先对模糊度参数采用星间单差的方式消除接收机UPD影响,然后再利用星间单差卫星UPD进行AR。

1.3　BDS-3三频非差PPP AR方法

用户实现AR步骤如下:首先将非差模糊度参数在卫星j和k间作星间单差以消除接收机UPD影响,然后构造卫星EWL、WL和NL星间单差UPD$\tilde{d}^{j,k}_{\mathrm{EWL}}$、$\tilde{d}^{j,k}_{\mathrm{WL}}$和$\tilde{d}^{j,k}_{\mathrm{NL}}$,通过星间单差UPD则可将星间单差模糊度$\overline{N}^{j,k}_{r,1}$、$\overline{N}^{j,k}_{r,2}$和$\overline{N}^{j,k}_{r,3}$转换为EWL、WL和NL星间单差模糊度$\overline{\overline{N}}^{j,k}_{r,\mathrm{EWL}}$、$\overline{\overline{N}}^{j,k}_{r,\mathrm{WL}}$和$\overline{\overline{N}}^{j,k}_{r,\mathrm{NL}}$,其中$\overline{\overline{N}}^{j,k}_{r,\mathrm{EWL}}$和$\overline{\overline{N}}^{j,k}_{r,\mathrm{WL}}$为:

$$\begin{bmatrix} \overline{\overline{N}}_{r,\mathrm{EWL}}^{j,k} \\ \overline{\overline{N}}_{r,\mathrm{WL}}^{j,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{N}_{r,1}^{j,k} \\ \overline{N}_{r,2}^{j,k} \\ \overline{N}_{r,3}^{j,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{d}_{\mathrm{EWL}}^{j,k} \\ \tilde{d}_{\mathrm{WL}}^{j,k} \end{bmatrix} \tag{5}$$

首先进行EWL AR。为提升AR的可靠性,对于EWL模糊度依然采用最小二乘模糊度降相关平差(least-squares ambiguity decorrelation adjustment,LAMBDA)算法固定整周模糊度。一旦EWL AR成功,即通过模糊度增量更新电离层、接收机位置坐标等参数信息。然后,以同样的AR和参数更新策略处理WL模糊度。接着将固定的WL模糊度用于固定NL模糊度$\overline{\overline{N}}_{r,\mathrm{NL}}^{j,k}$:

$$\overline{\overline{N}}_{r,\mathrm{NL}}^{j,k} = \begin{bmatrix} \dfrac{f_1^2}{f_1^2-f_2^2} & \dfrac{-f_2^2}{f_1^2-f_2^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{N}_{r,1}^{j,k} \\ \overline{N}_{r,2}^{j,k} \end{bmatrix} + f_2 \frac{\overline{\overline{N}}_{r,\mathrm{WL}}^{j,k} - \hat{d}_{\mathrm{WL}}^{j,k}}{f_2-f_1} + \tilde{d}_{\mathrm{NL}}^{j,k} \tag{6}$$

一旦NL模糊度成功固定,再次更新接收机坐标等参数,输出AR解。本文采用部分AR策略,基于卫星高度角信息和浮点模糊度方差等有效信息筛选模糊度子集,当剩余模糊度参数个数小于4时输出浮点解,LAMBDA搜索ratio检验值设为2[19]。

2 PPP AR实验分析

为评估BDS-3 PPP AR性能,设置两组实验,一组实验使用2021年年积日第310—324天的多模GNSS实验跟踪网(multi-GNSS experiment,MGEX)全球均匀分布的160个测站估计卫星UPD产品,再利用其他12个测站评估BDS-3 PPP AR性能,这些测站均能观测到BDS-3 B1I、B3I和B2a信号。另一组实验则利用欧洲区域永久参考站网(EUREF permanent network, EPN)的芬兰境内CORS网20个测站进行实验,这些测站装备同种JAVAD类型接收机(版本号:4.0.02-210208),能够接收到BDS-3所有频点的信号,包含B2a、B2b、B1C和B2a+b 4个新信号。将其中15个测站用于估计UPD,另外5个测站(HETT站、MET3站、JOE2站、KEV2站和SAVU站)用于验证PPP AR性能。本节的UPD估值质量评估基于UPD时间序列稳定性和模糊度残差分布两方面进行,二者相互补充验证以有效评估UPD估值的准确性。本文的数据处理策略如表2所示。

表2 PPP AR实验数据处理策略

Table 2 Data Processing Strategy of PPP AR

项目	处理策略
采样间隔/s	30
观测值	BDS-3系统B1I、B3I、B2a
参数估计方法	前向卡尔曼滤波
截止高度角/(°)	10
观测值权值分配	高度角模型
潮汐	(海潮、固体潮、极潮)模型改正
卫星天线相位中心	B1I和B3I采用igs14天线文件推荐值,B2a采用B3I的推荐值
接收机天线相位中心改正	B1I和B3I采用igs14天线文件中GPS L1和L2频率推荐改正值,B2a采用GPS L2的推荐值
卫星星历和钟差	采用WHU提供的精密星历和精密钟差
对流层延迟	先验模型改正+随机游走建模,功率谱密度1.7×10^{-7} m^2/s
电离层延迟	随机游走,功率谱密度1.7×10^{-5} m^2/s
模糊度	无周跳发生的连续观测弧段,常数估计
接收机钟差	白噪声估计,初始值由SPP给出,初始方差(60 m)^2
AR方法	部分AR

2.1 实验1:MGEX全球测站网实验

高精度的UPD产品是恢复模糊度整周特性的前提。首先基于MGEX测站估计BDS-3系统卫星UPD。图1给出了2021年年积日第310—324天的EWL和WL UPD序列以及年积日为310天的NL UPD序列,不同颜色表示不同BDS-3卫星的UPD序列(C19~C46号卫星)。结果表明,BDS-3系统卫星的EWL、WL和NL UPD标准差均值分别为0.023、0.038和0.039周,EWL UPD稳定性最优。

利用BDS-3卫星UPD校正后的EWL、WL和NL模糊度残差分布状况来进一步评估UPD

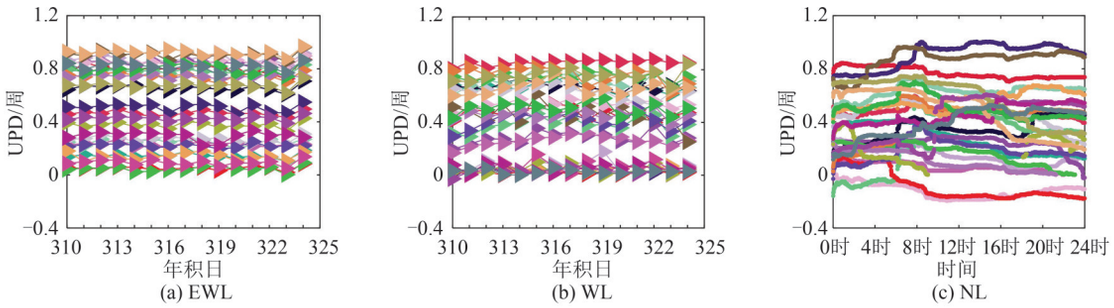


图1　2021年年积日第310—324天的BDS-3 EWL、WL、NL UPD序列(实验1)

Fig. 1　BDS-3 EWL, WL and NL Satellite UPD Series on the Day of Year 310 to 324 in 2021 (Experimrnt 1)

产品估值准确性。由图2可知,3组模糊度残差均呈现近似正态分布,无明显系统偏差。几乎100%的EWL模糊度残差落在±0.15周内,表明BDS-3系统EWL UPD的估值精度较高。WL模糊度残差绝对值小于0.15周和0.25周的比例分别为93.64%和97.80%。NL模糊度残差分布表现最差,仅有88.19%的残差绝对值优于0.15周,但几乎100%的残差落入±0.25周内。以上结果表明基于MGEX全球网站估计的BDS-3 UPD产品具有较高的精度,其中EWL UPD最优,WL次之,NL最差。但受测站数量相对较少、精密产品精度和诸如天线相位中心改正模型等误差模型不完善等影响,BDS-3系统UPD估值精度有望在未来得到进一步提升[15-16]。

用户端基于高精度的UPD产品开展PPP AR实验。图3(a)给出了12个用户站在所选的时间跨度内各历元E、N、U方向定位偏差RMS时间序列,其中C2Float、C2Fixed、C3Fixed分别表示BDS-3双频PPP浮点解、双频PPP AR、三频PPP AR。结果表明,BDS-3三频PPP AR收敛最快,约为25.4 min,相较于浮点解的40.1 min和双频PPP AR的36.3 min,分别缩短了36.7%和30.0%。

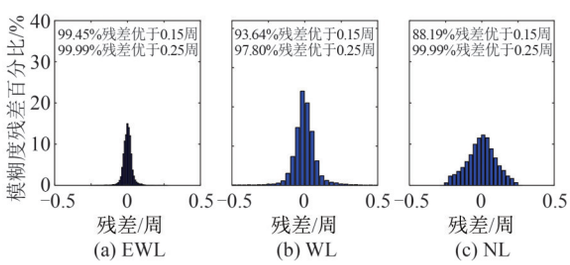


图2　采用卫星UPD校正后的BDS-3 WL、NL和EWL模糊度残差分布(实验1)

Fig. 2　Residuals Distribution of BDS-3 WL, NL and EWL Ambiguities (Experimrnt 1)

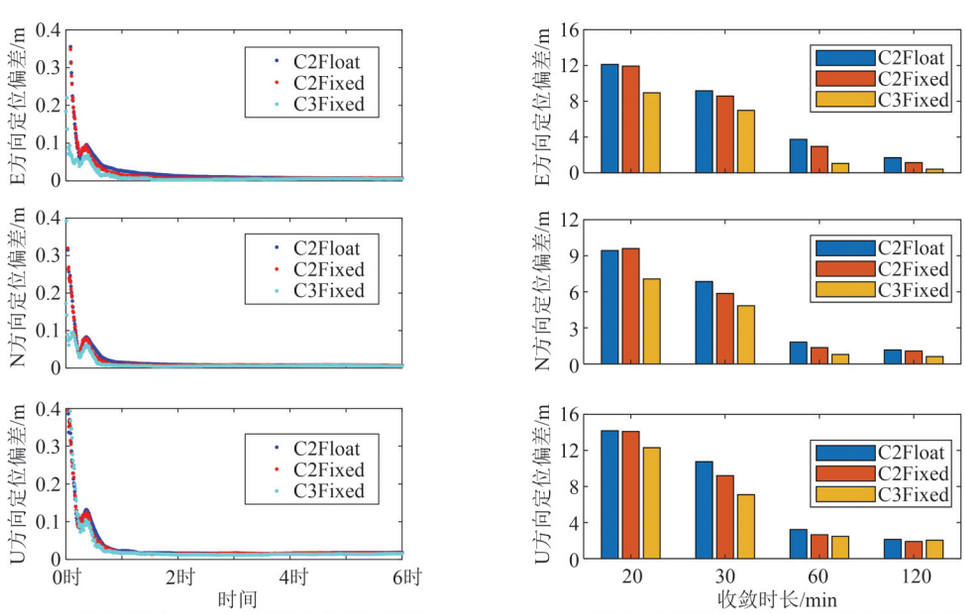


图3　基于MGEX全球尺度测站网的PPP AR结果

Fig. 3　PPP AR Positioning Results Based on MGEX Global Scale Station Network

此外,研究了不同收敛时长下对应的PPP定位精度差异。图3(b)给出了3组实验方案在收敛时长分别为20 min、30 min、60 min和120 min时E、N、U方向上的定位精度。结果表明,当收敛时长为30 min时,BDS-3三频PPP AR在E、N、U 3个方向的定位精度分别为7.0、4.8、7.1 cm,大幅优于双频浮点解的9.2、6.9、10.8 cm和双频PPP AR的8.6、5.9、9.2 cm。随着收敛时长的增加,各组实验方案的精度均有所提升。当收敛时长达到120 min时,双频浮点解、双频固定解和三频固定解在E、N、U 3个方向上的定位偏差分别为1.7、1.2、2.1 cm和1.1、1.1、1.9 cm以及0.4、0.6、2.0 cm,三频固定解方案定位精度依然保持一定优势。

2.2 EPN区域测站网实验

利用EPN区域参考站估计区域UPD产品。图4给出了EPN测站2021年年积日第310至324天的EWL和WL非差UPD序列以及年积日第310天的NL UPD序列。结果表明,BDS-3系统卫星EWL和NL非差UPD的稳定性明显优于基于MGEX测站估计的UPD产品,其中,NL UPD标准差均值由前者的0.039周降至0.025周。

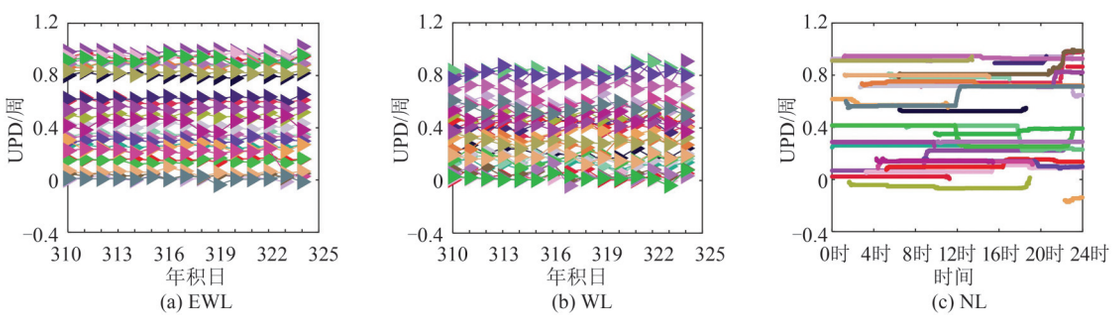


图4 2021年年积日第310—324天的BDS-3 EWL、WL 、NL UPD序列(实验2)

Fig. 4 BDS-3 EWL, WL and NL Satellite UPD Series on the Day of Year from 310 to 324 in 2021 (Experiment 2)

此外,利用BDS-3卫星UPD校正后的EWL、WL和NL模糊度残差分布状况评估UPD产品精度。图5给出了采用卫星UPD校正后的BDS-3 EWL、WL和NL模糊度残差分布,3组模糊度残差均呈现近似的正态分布,无明显系统偏差。注意到几乎100%的EWL、WL和NL UPD模糊度残差优于±0.15周,UPD估值精度显著优于基于MGEX测站估计的UPD产品。综合以上实验结果可知,通过EPN区域参考站估计的UPD产品相较于基于MGEX全球参考站估计的UPD产品精度更高、稳定性更好。

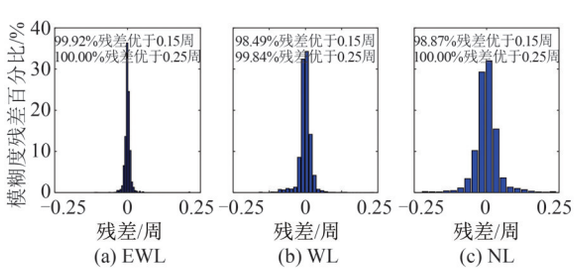


图5 采用卫星UPD校正后的BDS-3 EWL、WL和NL模糊度残差分布(实验2)

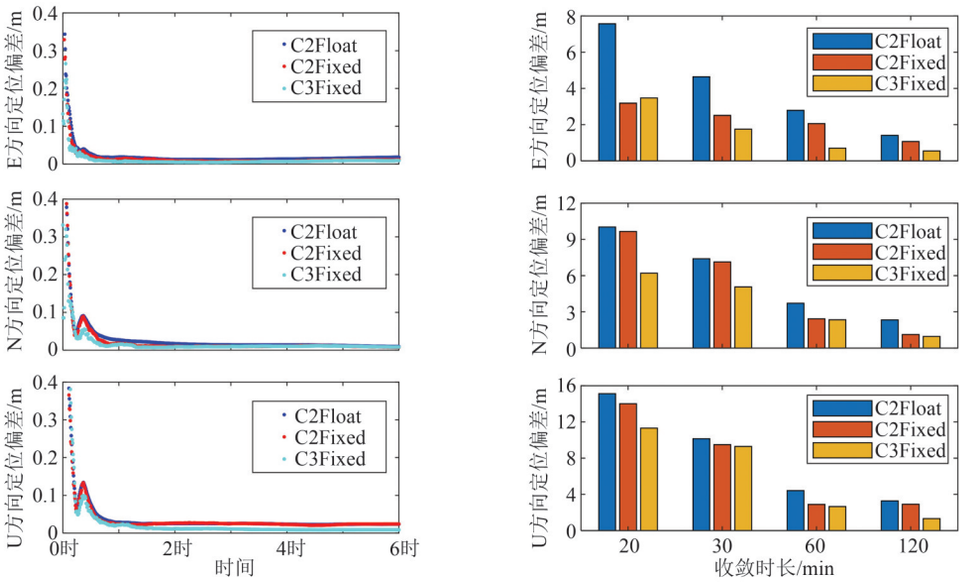
Fig. 5 Residuals Distribution of BDS-3 WL, NL and EWL Ambiguities (Experiment 2)

用户端利用高精度的UPD产品开展PPP AR实验。给出所选的时间跨度内6个测站在各个方向上各个历元的定位偏差RMS如图6(a)所示。结果表明,三频PPP AR收敛时间最短,仅为25.1 min,相较于双频PPP AR的30.8 min和双频PPP浮点解的39.7 min分别减少18.5%和36.8%。

图6(b)给出了3组实验方案在收敛时长分别为20 min、30 min、60 min和120 min时E、N、U方向上的定位精度。结果表明,BDS-3三频PPP AR在不同收敛时长的定位精度表现均优于其他两组方案。当收敛时长为20 min时,BDS-3三频PPP AR在E、N、U 3个方向的定位精度分别为3.5、6.2、11.3 cm,优于双频PPP AR的3.2、9.7、14.0 cm和双频浮点解的7.6、10.0、15.1 cm。随着收敛时长增加,3组方案的定位精度之间的差异也逐渐变小。当收敛时长增加至120 min时,双频浮点解、双频固定解和三频固定解在E、N、U 3个方向上的定位偏差分别为1.4、2.3、3.3 cm和1.1、1.1、2.9 cm以及0.5、1.0、1.3 cm。

2.3 基于不同尺度UPD的BDS3 PPP AR

基于MGEX全球测站估计的UPD优势在于能够全球覆盖,而对于小区域内的用户站,该UPD产品可能会损失精度。相反,基于区域参考站网估计的UPD产品对于该区域内的用户站具有非常好的适用性,精度更高,易于估计和维护,



(a) 不同方案在E、N、U方向定位偏差序列　　(b)不同方案对应不同收敛时长的定位偏差

图 6　基于EPN区域测站网的PPP AR结果

Fig. 6　PPP AR Positioning Results Based on EPN Regional Scale Station Network

但不适宜提供给本区域外距离较远的测站使用。本节进一步评估了基于不同区域尺度UPD产品的BDS-3多频PPP AR性能差异。按照实验设计,MET3站既属于EPN区域参考站网,又属于MGEX全球参考站网,借助该测站的定位结果来初步评估两套UPD产品的定位效果。

首先给出了2021年年积日第310至324天的3组方案在MET3站各方向各历元处的定位偏差RMS值,如图7(a)所示。为方便表示,图7中C3Fixed-EPN表示使用EPN网络估计的UPD产品实施的BDS-3三频PPP AR,C3Fixed-MGEX表示利用MGEX全球网络估计的UPD产品,C2Float表示BDS-3双频PPP浮点解。结果表明,C3Fixed-EPN方案收敛最快,定位精度最高,两组固定解方案定位效果均优于浮点解。

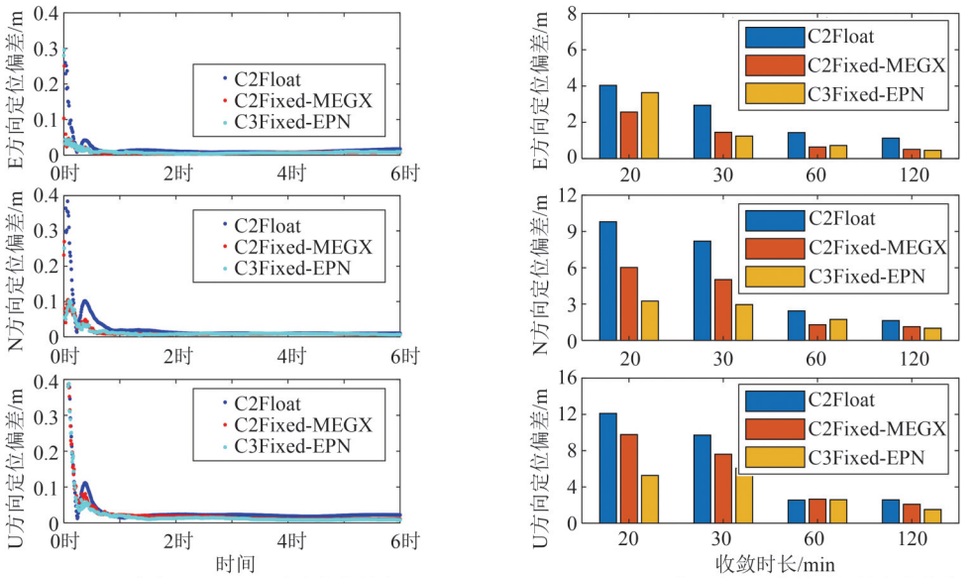
图7(b)给出了3组实验方案在收敛时长分别为20 min、30 min、60 min和120 min时E、N、U方向上的定位精度。结果表明,当收敛时长小于30 min时,C3Fixed-EPN方案定位效果明显优于其他组方案。随着收敛时间的增加,C3Fixed-EPN方案在定位精度方面的优势逐渐减小,当收敛时间达到120 min时,C2Float方案、C3Fixed-MGEX方案和C3Fixed-EPN方案在E、N、U方向的定位偏差分别为1.13、1.63、2.58 cm和0.51、1.13、2.09 cm以及0.46、1.00、1.51 cm。综合来看,采用区域UPD产品的三频PPP AR方案定位精度最优。

为进一步增强结果的说服力,给出2021年年积日第310—324天5个EPN测站基于不同区域尺度UPD产品的BDS-3三频PPP AR的定位结果,其E、N、U方向上定位偏差RMS时间序列如图8所示。结果表明,C3Fixed-EPN方案收敛速度显著优于C3Fixed-MGEX方案。随着收敛时间的增加,两组方案定位精度差异逐渐减小,这与前文的研究结论保持一致。

以上实验结果表明,通过区域网络估计得到的UPD产品和利用全球网络获得的UPD产品均可实现较高精度的BDS-3多频PPP模糊度固定。但采用不同UPD产品时,用户端的PPP AR性能可能存在显著差异。基于区域UPD产品的多频PPP AR可能实现更快速收敛和更高精度的定位性能。一方面是因为基于区域参考站网络估计的UPD产品在该区域内与用户站的一致性更好,而基于全球参考站网络估计的UPD产品在测站非密集区存在一定程度的精度损失。另一方面,已有研究表明宽巷UPD的估计与接收机(天线)类型存在一定相关性[19]。由于全球测站网络的接收机(天线)类型构成极为复杂,因此基于全球参考站网估计的UPD精度可能会受此影响。

3　结　语

为充分发挥BDS-3系统多频服务能力,本文联合B1I、B3I传统信号和B2a新信号实现了BDS-3三频PPP模糊度快速固定。首先利用原



(a) 不同方案在E、N、U方向定位偏差序列　(b)不同方案对应不同收敛时长的定位偏差

图7　基于不同尺度UPD的BDS-3 PPP AR结果

Fig. 7　BDS-3 PPP AR Positioning Results Based on Different Scale UPD Products

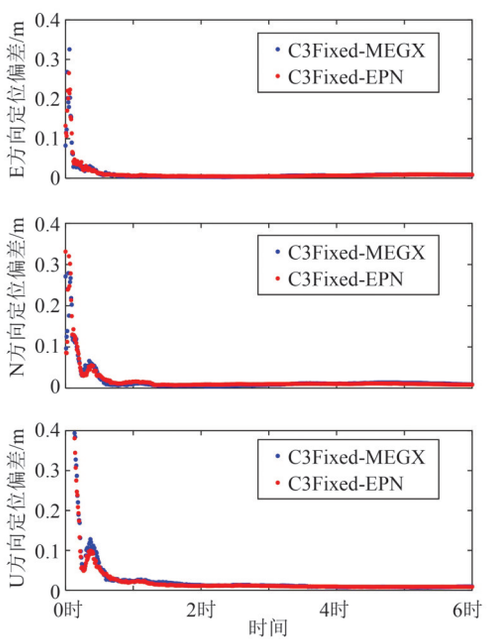


图8　2021年年积日第310—324天5个EPN站利用不同尺度UPD产品在E、N、U方向的定位偏差RMS

Fig. 8　RMS Statistics of Positioning Errors of in the E, N and U Directions for 5 EPN Stations Using Different Scale UPD Products on the Day of Year 310 to 324 in 2021

始浮点模糊度估计EWL、WL和NL非差UPD，然后基于高精度的UPD产品采用EWL-WL-NL模糊度顺序固定的方法实现BDS-3三频PPP AR。重点讨论了基于不同尺度UPD的BDS-3三频非差非组合PPP AR性能表现。设置两组实验验证算法，实验1采用2021年年积日第310至324天的MGEX全球分布的160个测站估计卫星UPD产品，再利用其他12个测站评估PPP AR性能。实验2则利用EPN芬兰境内的15个测站估计UPD，利用另5个测站验证PPP AR性能。结果表明，BDS-3 EWL、WL和NL UPD产品具有较高的稳定性，标准差均值均优于0.04周，EPN区域UPD产品精度和稳定性高于MGEX全球UPD产品。

MGEX全球测站实验中BDS-3三频PPP AR收敛时间最短（25.4 min），相较于双频浮点解的40.1 min和双频PPP AR的36.3 min，分别缩短了36.7%和30.0%；EPN区域测站实验中，三频PPP AR则将收敛时间从双频浮点解的39.7 min和双频PPP AR的30.8 min缩短至25.1 min，减少幅度分别达到36.8%和18.5%。

利用MGEX和EPN网络共公共测站评估两种UPD产品的BDS-3 PPP AR性能，结果表明，采用EPN区域UPD产品的BDS-3三频PPP AR明显收敛更快、定位精度更高。原因可能有以下两方面：(1)基于全球参考站网络估计的UPD产品在测站非密集区存在一定程度的精度损失；(2)UPD估计可能与接收机类型存在一定相关性，MGEX全球测站网接收机类型复杂，因此可能会对UPD估计精度造成一定影响。

参　考　文　献

[1] YANG Y, GAO W, GUO S, et al. Introduction to BeiDou-3 Navigation Satellite System[J]. *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, 2019, 66(1):7-18.

[2] LU M, LI W, YAO Z, et al. Overview of BDS III

New Signals[J]. *Navigation*, 2019, 66(1):19-35.

[3] 郭树人，蔡洪亮，孟铁男，等. 北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J]. 测绘学报，2019，48(7)：810-821.
GUO Shuren, CAI Hongliang, MENG Yinan, et al. BDS-3 RNSS Technical Characteristics and Service Performance [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(7): 810-821.

[4] MONTENBRUCK O, HAUSCHILD A, STEIGENBERGER P, et al. Initial Assessment of the COMPASS/BeiDou-2 Regional Navigation Satellite System [J]. *GPS Solutions*, 2013, 17 (2): 211-222.

[5] LI X,LI X,LIU G,et al. Spatial-Temporal Characteristic of BDS Phase Delays and PPP Ambiguity Resolution with GEO/IGSO/MEO Satellites [J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(4):123.

[6] LI P, ZHANG X, GUO F. Ambiguity Resolved Precise Point Positioning with GPS and BeiDou[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(1):25-40.

[7] GABOR M J, NEREM R S. GPS Carrier Phase Ambiguity Resolution Using Satellite-Satellite Single Difference[C]//The 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Nashville, 1999.

[8] 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.

[9] GU S, LOU Y, 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.

[10] LI X, LI X, LIU G, et al. Triple-Frequency PPP Ambiguity Resolution with Multi-constellation GNSS: BDS and Galileo[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93: 1105-1122.

[11] 杜祯强，柴洪洲，潘宗鹏，等. 针对消电离层组合FCB的非组合PPP部分模糊度固定方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2021，46(6)：913-919.
DU Zhenqiang, CHAI Hongzhou, PAN Zongpeng, et al. Partial Ambiguity Resolution Method for Uncombined PPP Using Ionosphere Free Combined FCB[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(6): 913-919.

[12] SU K, JIN S. Triple-Frequency Carrier Phase Precise Time and Frequency Transfer Models for BDS-3[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(3): 86-101.

[13] LI X, XIE W, HUANG J, et al. Estimation and Analysis of Differential Code Biases for BDS-3/BDS-2 Using iGMAS and MGEX Observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 93(3):419-435.

[14] WANG M, WANG J, DONG D, et al. Performance of BDS-3: Satellite Visibility and Dilution of Precision[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(2): 18-32.

[15] 李浩东，赵齐乐，陶钧，等. 北斗三号卫星FCB估计及其模糊度固定[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2022，47(9)：1439-1446.
LI Haodong, ZHAO Qile, TAO Jun, et al. FCB Estimation and Ambiguity Resolution of BDS-3 [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(9): 1439-1446.

[16] QU L, WANG L, ACHARYA T, et al. Global Single-Epoch Narrow-Lane Ambiguity Resolution with Multi-constellation and Multi-frequency Precise Point Positioning[J]. *GPS Solutions*, 2022, 27 (1): 1-11

[17] PAN L, LI X, ZHANG X, et al. Considering Inter-Frequency Clock Bias for BDS Triple-Frequency Precise Point Positioning [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(7) : 734-749.

[18] TAO J, CHEN G, GUO J, et al. Toward BDS/Galileo/GPS/QZSS Triple-Frequency PPP Instantaneous Integer Ambiguity Resolutions Without Atmosphere Corrections[J]. *GPS Solutions*, 2022, 26 (4): 127-142.

[19] HAN S. Quality-Control Issues Relating to Instantaneous Ambiguity Resolution for Real-Time GPS Kinematic Positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 1997, 71(6):351-361.