

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2024.02.013

附加双差模糊度网解约束的 GNSS 相位延迟估计

杨也行¹, 华博深², 冯威¹

(1. 西南交通大学地球科学与工程学院, 成都 610031;
2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 成都 610072)

摘要: 针对现有相位延迟估计方法未利用双差模糊度网解约束的特点, 提出了一种附加双差模糊度网解约束的相位延迟估计方法。首先以整周双差模糊度网解为真值更新精密单点定位 (PPP) 估计的非差浮点模糊度, 再通过网平差法估计未校正相位延迟 (UPD)。实验结果表明, PPP 双差模糊度与双差模糊度网解一致性好, 其宽、窄巷中误差分别为 0.07 周和 0.11 周, 误差大于 1 周的 PPP 双差模糊度主要出现在卫星初升阶段。约束改变了非差浮点模糊度, 从而改变了参与 UPD 网平差的测站, 使 14% 新升起卫星的窄巷 UPD 在短时间内较无约束有大于 0.2 周的差异。附加约束/无约束的全天星间单差 UPD 差异在大于 99.9% 的置信水平下满足零均值假设, 表明整周双差模糊度网解约束方法与无约束方法估计 UPD 相关产品具有等效性。研究结果可为参考网非差模糊度解算和 PPP 与网络实时动态定位 (RTK) 的融合工作提供参考。

关键词: 未校正相位延迟 (UPD); 双差; 精密单点定位 (PPP); 模糊度

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2024)02-0133-10

A method for GNSS phase delay estimation with double-differenced network solution ambiguity constraint

YANG Yexing¹, HUA Boshen², FENG Wei¹

(1. Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China)

Abstract: Aiming at the feature of existing methods for phase delay estimation where double-differenced ambiguity network solutions are not applied, a method for phase delay estimation with the constraint of double-differenced ambiguity network solution is proposed. Firstly, integer double-differenced network ambiguities are utilized as real values to update undifferenced float ambiguities estimated by precise point positioning (PPP), uncalibrated phase delay (UPD) estimation is then performed by net-adjustment method. Experimental results show that PPP double-differenced ambiguities and double-differenced ambiguities network solutions show good accordance, with wide/narrow lane standard deviation being 0.07 cycle and 0.11 cycle respectively. PPP double-differenced ambiguities with biases greater than 1 cycle mainly appear in the newly-ascending periods of satellites. The constraint alters undifferenced float ambiguity and thus changes stations engaged in UPD net-adjustment, causing narrow lane UPD of around 14% of newly-ascending satellites to appear differences greater than 0.2 cycle in a short period compared to the non-constraint

收稿日期: 2023-09-15; 修订日期: 2023-12-11

基金项目: 国家自然科学基金 (42171429)

作者简介: 杨也行 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事 GNSS 实时精密单点定位方面的研究。

通信作者: 冯威 (1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事 GNSS 高精度导航定位理论与应用方面的研究。

case. The difference between with/without constraint inter-satellites single-differenced UPD of a whole day satisfies the zero-mean hypothesis at a confidence level greater than 99.9%, indicating an equivalence between the integer double-differenced network ambiguities constrained method and the non-constrained method for the estimation of UPD and related products. The result of the research can provide reference to the work about the resolution of undifferenced ambiguities of referential networks and the fusion of PPP and network real-time kinematic (RTK).

Key words: Uncalibrated phase delay (UPD); Double-difference; Precise point positioning (PPP); Ambiguity

0 引言

高精度的相位延迟产品是实现精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 模糊度固定 (ambiguity resolution, AR) 的前提, 基于相位延迟估计能有效缩短 PPP 实时动态定位 (PPP real-time kinematic, PPP-RTK) 的收敛时间, 从而拓宽 PPP 的应用场景^[1-3]。国内外学者先后提出了未校正相位延迟 (uncalibrated phase delay, UPD) 分离法、相位整数钟法和钟差去耦法, 并论证了这三种方法的等价性^[4]。随着多频多星座 GNSS 的发展, UPD 等方法被推广到 GLONASS^[5]、Galileo 和 BDS, 多系统组合的 PPP-AR 能将首次固定时间 (time to first fix, TTFF) 缩短至 10 min 以内, 固定解精度可达水平 1 cm、垂向 2 cm^[6-8]。与此同时, UPD 方法也经历了由双频至多频的推广, 三频和多频 PPP-AR 将首次固定时间进一步缩短至约 6 min 内^[9-10]。

实时 UPD 估计方面, 随着国际 GNSS 服务组织 (International GNSS Service, IGS) 于 2013 年正式推出了实时服务 (real-time service, RTS), 目前国内外已有德国联邦制图和大地测量局 (Federal Agency for Cartography and Geodesy, BKG)、法国国家空间研究中心 (National Centre for Space Study, CNES)、德国地学中心 (German Research Centre for Geoscience, GFZ) 及武汉大学 (Wuhan University, WHU) 等多个 IGS 分析中心提供多星座 RTS 产品 (如 CNES 实时产品: 轨道三维精度可达 5 cm^[11], 钟差精度可达 0.2 ns^[12-13]), 为相位延迟实时估计提供了基础。文献 [14-15] 均基于全球参考站网估计实时 UPD, 可在数十分钟达到首次固定, 定位精度约 2 cm, 后者还考虑了相位延迟的历元间稳定性, 采用滤波方法估计 UPD, 基于该 UPD 的实时固定解钟差较浮点解稳定性提高了 31%。文献 [16] 研究了基于实时星历和钟差的区域网整数钟产品估计, 认为基于区域网估计的整数

钟产品可以补偿 PPP-AR 中不可忽略的实时轨道产品残差, 与全球相位延迟产品相比, 其定位精度提升达 40% 以上, 但受限于 RTS 产品精度和区域网卫星升降, 整数钟稳定性欠佳。文献 [17-18] 实验均反映了区域网卫星初升阶段相位延迟估值精度差的现象, 后者认为收敛阶段的相位延迟产品与电离层产品组合使用仍能得到可靠的客户端定位结果。上述研究表明, 基于后处理的 UPD 估计方法能较好地满足 PPP-AR 的需求, 但实时 UPD 估计, 特别是区域网新升起卫星 UPD 的高可靠性估计还存在欠缺, 需要进一步深入研究。

以网络 RTK 为代表的差分定位是目前广泛采用的高精度实时定位方法, 参考站网络双差模糊度实时解算是 RTK 服务的关键环节^[19]。相比 PPP 的非差 (undifferenced, UD) 模糊度解算, 双差 (double-differenced, DD) 模糊度网解具有实时性好、准确性高、成分纯的优势。因此, 有必要在 PPP-RTK 服务端数据处理工作中充分利用参考站网络的网解资源, 但目前 PPP-RTK 与网络 RTK 的融合工作, 或采用非差网解, 需对现有基于双差网解的 RTK 服务系统进行深度改造; 或融合程度浅, 只是两种服务方式的简单共存和切换。为此, 本文提出了一种附加双差模糊度网解约束的 UPD 估计方法, 在模糊度层面实现二者融合。

1 附加约束的 UPD 估计方法

1.1 无约束 UPD 估计

由于传统 PPP 估计的消电离层 (ionosphere free, IF) 组合模糊度不具备整周特性, 双频 PPP-AR 与 UPD 估计一般将测站 r 到卫星 s 的非差浮点 IF 模糊度 $\tilde{N}_{if,r}^s$ 分解为整周宽巷 (wide-lane, WL) 模糊度 $N_{wl,r}^s$ 和浮点窄巷 (narrow-lane, NL) 模糊度 $\tilde{N}_{nl,r}^s$ 。

$$\tilde{N}_{if,r}^s = \frac{1}{\lambda_{if}} \left(\frac{cf_2}{f_1^2 - f_2^2} N_{wl,r}^s + \frac{c}{f_1 + f_2} \tilde{N}_{nl,r}^s \right) \quad (1)$$

式中, f_1, f_2 为载波频率; λ_{if} 为 IF 组合观测值波长; 浮点宽巷模糊度 $\tilde{N}_{wl,r}^s$ 由 Melbourne-Wübbena (MW) 组合计算得到

$$\tilde{N}_{wl,r}^s = \frac{1}{\lambda_{wl}} \left(\frac{f_1 L_{r,1}^s - f_2 L_{r,2}^s}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 P_{r,1}^s + f_2 P_{r,2}^s}{f_1 + f_2} \right) \quad (2)$$

式中, $L_{r,1}^s, L_{r,2}^s, P_{r,1}^s, P_{r,2}^s$ 为双频相位和伪距观测, 由于受卫星和接收机 UPD 影响, 非差 WL, NL 模糊度仍具有浮点特性

$$N_{wl,r}^s = \tilde{N}_{wl,r}^s + u_{wl,r} - u_{wl}^s \quad (3)$$

$$N_{nl,r}^s = \tilde{N}_{nl,r}^s + u_{nl,r} - u_{nl}^s \quad (4)$$

式中, $N_{nl,r}^s$ 为非差整周 NL 模糊度; $u_{wl,r}, u_{wl}^s$ 为接收机和卫星宽巷 UPD; $u_{nl,r}, u_{nl}^s$ 为接收机和卫星窄巷 UPD。PPP 用户进行模糊度固定时, 首先进行星间单差消除接收机端 UPD, 再接收服务端提供的卫星端非差或单差 UPD, 即可恢复单差 WL, NL 模糊度的整周特性, 从而进行整数估计。在服务端, 认为站星 UPD 与浮点模糊度存在以下关系

$$R_r^s = \tilde{N}_r^s - \langle \tilde{N}_r^s \rangle = u_r - u^s \quad (5)$$

式中, $\langle \cdot \rangle$ 为就近取整算符; R_r^s 为浮点模糊度小数部分, 宽窄巷 UPD 具备同样形式, 省略 WL, NL 下标。虽然 $\langle \tilde{N}_r^s \rangle$ 会吸收硬件延迟的整周部分, 但用户仅用硬件延迟的小数部分仍可恢复模糊度整周特性, 且多测站的冗余观测也会削弱取整操作的误差, 因此可用 $\langle \tilde{N}_r^s \rangle$ 代替严格的 N_r^s 。对 m 个测站 n 颗卫星的网络, 联立式(5)即可估计站星 UPD, 得

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_1^1 \\ \vdots \\ R_1^n \\ \vdots \\ R_m^1 \\ \vdots \\ R_m^n \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} u^1 \\ \vdots \\ u^n \\ u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H} = [\mathbf{1} \otimes \mathbf{I} \quad -\mathbf{I} \otimes \mathbf{1}]$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & -1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, \mathbf{I} 为单位阵; $\mathbf{1}$ 为全 1 向量; \otimes 为 Kronecker 积

算符。式(6)秩亏数为 1, 增加参考星 UPD 定值约束或所有卫星 UPD 零均值约束可使方程具备可估计性。根据约束条件的不同, 非差 UPD 的值可能有所差别, 但单差后没有差异, 下文对 $(\mathbf{H}^T \mathbf{H})$ 求逆时 \mathbf{H} 都附带了约束条件。另外需指出, 对于多星座 UPD 估计, 由于接收机端系统间偏差不能被星间单差消除, 各个系统的 UPD 估计和 PPP-AR 是独立进行的, 对于 GLONASS, 由于其频分多址信号体制, 需处理频间偏差, 本文不做考虑。

1.2 双差模糊度网解约束

记双差模糊度网解为 $[\mathbf{D}_r \mathbf{D}^s \mathbf{N}] = [N_{12}^{12}, N_{13}^{12}, \dots, N_{ij}^{pq}]^T$, 左边的方括号表示其不能拆开还原为非差模糊度, 由式(3)和式(4)可知, 参考网中各站分别由 PPP 浮点解得到的非差模糊度进行差分得到的 PPP 双差模糊度具备整周特性, 且与双差模糊度网解有相同的值。但由于非差模糊度包含的部分未建模误差和观测噪声未能被双差消去, PPP 双差模糊度与双差模糊度网解存在差值, 有必要通过式(7)将 PPP 双差模糊度对齐到更可靠的双差模糊度网解, 以去除非差模糊度中吸收的非 UPD 成分。

$$[\mathbf{D}_r \mathbf{D}^s \mathbf{N}] = (\mathbf{D}_r \mathbf{D}^s \tilde{\mathbf{N}}), \mathbf{D}^s = \mathbf{I} \otimes \mathbf{d}^s,$$

$$\mathbf{D}_r = \mathbf{d}_r \otimes \mathbf{I}, \mathbf{D}_r \mathbf{D}^s = \mathbf{d}_r \otimes \mathbf{d}^s \quad (7)$$

式中, \mathbf{d}^s 为星间差分矩阵, \mathbf{d}_r 为站间差分矩阵, 式(7)秩亏数为 2, 双差模糊度网解相互独立时可通过条件平差求解。本文将非差模糊度值作为虚拟观测值约束消除式(7)秩亏, 通过最小二乘估计得到非差模糊度改正数 $\delta \tilde{\mathbf{N}}$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0 \\ [\mathbf{D}_r \mathbf{D}^s \mathbf{N}] - \mathbf{D}_r \mathbf{D}^s \tilde{\mathbf{N}} \end{bmatrix} = \mathbf{B} \delta \tilde{\mathbf{N}},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{A} \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \mathbf{D}_r \mathbf{D}^s, \mathbf{D}(\mathbf{L}) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 & 0 \\ 0 & \mathbf{P}_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, \mathbf{P}_1 为非差模糊度的权, \mathbf{P}_2 为双差模糊度网解的权, 因为双差模糊度网解准确性要高于非差模糊度, \mathbf{P}_2 远大于 \mathbf{P}_1 。显然, 构成 PPP 双差模糊度的 4 个非差模糊度精度不等, 高度角小、被观测时间短的卫星对应的非差模糊度精度通常更低。可结合弧长、高度角、浮点解验后中误差等指标调整 \mathbf{P}_1 阵, 得加权的解如下

$$\delta \tilde{\mathbf{N}} = (\mathbf{P}_1 + \mathbf{A}^T \mathbf{P}_2 \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P}_2 ([\mathbf{D}_r \mathbf{D}^s \mathbf{N}] - \mathbf{D}_r \mathbf{D}^s \tilde{\mathbf{N}}) \quad (9)$$

通过 $\delta \tilde{\mathbf{N}}$ 更新非差模糊度, 得到新的模糊度并取其小数部分 \mathbf{R} , 代入式(6), 即可网平差得到含双

差模糊度网解约束的站星 UPD 估值。

1.3 约束性能分析

对上文附加双差模糊度网解约束 UPD 估计方法的效果进行理论分析,双差模糊度网解约束的目的是消除 PPP 双差模糊度 N_{ij}^{pq} 具有的小数部分 ε

$$\varepsilon = \mathbf{K}_1 \mathbf{R}, \mathbf{K}_1 = [1 \ -1 \ -1 \ 1] \quad (10)$$

当未经约束的 \mathbf{R} 参与 UPD 网平差时

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_i^p \\ R_i^q \\ R_j^p \\ R_j^q \end{bmatrix} = \mathbf{H}_{ij}^{pq} \begin{bmatrix} u^p \\ u^q \\ u_i \\ u_j \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{H}_{ij}^{pq} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

对式(11)附加零均值或参考星约束后用最小二乘解得站星非差 UPD,再做星间差分得星间单差 UPD

$$\mathbf{u}^{pq} = [1 \ -1 \ 0 \ 0] (\mathbf{H}_{ij}^{pq\top} \mathbf{H}_{ij}^{pq})^{-1} \mathbf{H}_{ij}^{pq\top} \mathbf{R} \quad (12)$$

化简得

$$\mathbf{u}^{pq} = \mathbf{K}_2 \mathbf{R}, \mathbf{K}_2 = \frac{1}{2} [1 \ -1 \ 1 \ -1] \quad (13)$$

式(10)和式(13)表明, $(\mathbf{K}_1 \cdot)$ 将非差模糊度映射到双差域, $(\mathbf{K}_2 \cdot)$ 将非差模糊度映射到 UPD 域, 而 $\mathbf{K}_1 \mathbf{K}_2^\top = \mathbf{0}$, 即双差域和 UPD 域正交, 对 \mathbf{R} 在双差域中像的调整, 不会影响其在(星间单差)UPD 域的像, 从而导致双差约束无效。以上结论扩展到 m 站 n 星时

$$\varepsilon = \mathbf{K}_1 \mathbf{R} = \mathbf{A} \mathbf{R} \quad (14)$$

$$\mathbf{u}^{s, sd} = \mathbf{K}_2 \mathbf{R} = \mathbf{d}^s \mathbf{u}^s = [\mathbf{d}^s \ \mathbf{0}] (\mathbf{H}^\top \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^\top \mathbf{R} \quad (15)$$

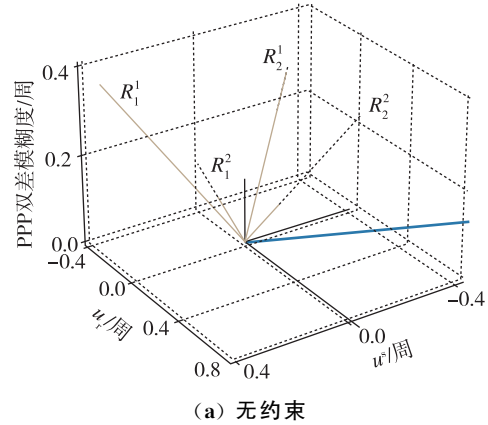
$$\mathbf{u}_r^{sd} = \mathbf{K}_3 \mathbf{R} = \mathbf{d}_r \mathbf{u}_r = [\mathbf{0} \ \mathbf{d}_r] (\mathbf{H}^\top \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^\top \mathbf{R} \quad (16)$$

式中, $\mathbf{u}^{s, sd}, \mathbf{u}_r^{sd}$ 为星间/站间单差 UPD, 可验证 $\mathbf{K}_1 \mathbf{K}_2^\top = \mathbf{0}_{(m-1)(n-1) \times (n-1)}$, 双差域与 UPD 域仍然正交, 并且同时与站间单差 UPD 域和和域 $\mathbf{s} = \mathbf{K}_4 \mathbf{R} = \mathbf{1} \mathbf{R}$ 正交, 即 $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \mathbf{K}_3, \mathbf{K}_4$ 能正交完备地分解非差模糊度空间, 意味着双差约束、站间单差 UPD 约束、非差模糊度和约束都不会影响星间单差 UPD。如图 1 所示, 蓝色粗实线表示非差模糊度向量, 黑色实线表示将其分解为 $\mathbf{u}^{s, sd}, \mathbf{u}_r^{sd}$ 和双差模糊度, 细实线表示将其分解为 4 个非差模糊度。相比约束前, 双差模糊度变为 0, 非差模糊度向量落到由站星 UPD 张成的平面上, 4 个非差模糊度改变, 但测站和卫星 UPD 均不变。将式(9)代入式(15), 可验证

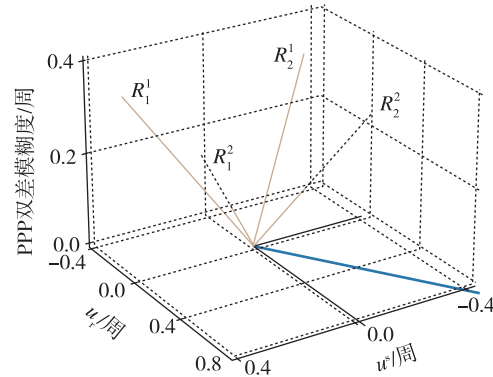
双差约束对星间单差 UPD 的理论贡献为 0

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{u}^{s, sd} &= \mathbf{K}_2 \delta \mathbf{R} \\ &= \mathbf{K}_2 (\mathbf{P}_1 + \mathbf{A}^\top \mathbf{P}_2 \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^\top \mathbf{P}_2 \mathbf{l} = \mathbf{O} \mathbf{l} \\ \mathbf{l} &= [\mathbf{D}_r \mathbf{D}^s \mathbf{N}] - \mathbf{D}_r \mathbf{D}^s \tilde{\mathbf{N}} \end{aligned} \quad (17)$$

以上的讨论只针对式(6)和式(9)同一卫星各测站等权的通常情况, 对测站/卫星赋不同权会破坏星间/站间单差 UPD 与双差的正交性。



(a) 无约束



(b) 附加约束

图 1 无约束/附加约束时非差模糊度向量分解的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the decomposition of UD ambiguity without/with the constraint

特别是, 在 PPP-AR 模式下往往只考虑星间单差模糊度 $\mathbf{D}^s \mathbf{R}$, 其可以用 $\mathbf{u}^{s, sd}$ 与 ε 唯一表示, 即 $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$ 能正交完备地分解星间单差模糊度空间

$$\begin{aligned} \mathbf{D}^s \mathbf{R} &= \mathbf{1}_m \otimes \mathbf{u}^{s, sd} + \mathbf{1}_{m \times (m-1)} \otimes \mathbf{I} \varepsilon \\ &= \mathbf{1}_{m \times (m-1)} \otimes \mathbf{I} \mathbf{K}_1 \mathbf{R} + \mathbf{1}_m \otimes \mathbf{K}_2 \mathbf{R} \end{aligned} \quad (18)$$

因此可认为: PPP-AR 通过取星间单差模糊度并改正 UPD, 去除了非差模糊度除双差部分外的所有分量, PPP-AR 实际固定的是双差模糊度, 文献[20]中也给出了类似推论。PPP-AR 与双差模糊度固定的这种共轭关系表明, 通过传统 UPD 产品, 用

户已经得到了关于双差模糊度网解的信息,因此再通过式(7)向 UPD 引入双差网解信息的作用是受限的。

此外,从最小二乘的角度看,由式(6)法方程结构可知星间单差 UPD 可记为

$$u^{pq} = (R_1^{pq} + R_2^{pq} + \dots + R_m^{pq})/m \quad (19)$$

由式(7)~式(9),双差约束对测站 i 的星间单差模糊度改正数 δ_i^{pq} 满足

$$\begin{cases} [N_{12}^{pq}] - \tilde{N}_{12}^{pq} = \delta_1^{pq} - \delta_2^{pq} \\ [N_{13}^{pq}] - \tilde{N}_{13}^{pq} = \delta_1^{pq} - \delta_3^{pq} \\ \vdots \\ [N_{1m}^{pq}] - \tilde{N}_{1m}^{pq} = \delta_1^{pq} - \delta_m^{pq} \end{cases} \quad (20)$$

不妨记常数 $[N_{1i}^{pq}] - \tilde{N}_{1i}^{pq}$ 为 C_i , 根据最小二乘要求

$$\min(\delta_1^{pq2} + \delta_2^{pq2} + \dots + \delta_m^{pq2}) = \sum_{i=2}^m C_i^2 + \min(m\delta_1^{pq2} - 2\delta_1^{pq} \sum_{i=2}^m C_i) \quad (21)$$

易知式(21)在 $\sum_{i=1}^m \delta_i^{pq} = 0$ 时取到最小二乘解,代回式(19)得

$$\begin{aligned} u^{pq} &= \frac{1}{m} \sum_i^m ((\tilde{N}_i^{pq} - \delta_i^{pq}) - \langle \tilde{N}_i^{pq} - \delta_i^{pq} \rangle) \\ &= \frac{1}{m} \sum_i^m (R_i^{pq} - \delta_i^{pq} + z_i^{pq}) \\ &= \frac{1}{m} \sum_i^m (R_i^{pq} + z_i^{pq}) \end{aligned} \quad (22)$$

式中, $|\delta_i^{pq}|$ 偏大会导致改正后模糊度整周部分 z_i^{pq} 周变化,通常 $|\delta_i^{pq}|$ 是一个小量, $z_i^{pq} = 0$, 从而 u^{pq} 平差前后值不变。即因为双差转单差/非差缺少基准数据,满足式(7)约束条件的非差模糊度有无数组,最小二乘挑选出的满足 $\min(\mathbf{V}^T \mathbf{V})$ 的解恰好不改变单差 UPD。但当 $\sum_{i=1}^m z_i^{pq} \neq 0$ 时,如初升卫星非差浮点模糊度未收敛阶段,双差模糊度网解约束则会改变 UPD 值。

2 实验分析

为验证本文提出的附加双差模糊度网解约束 UPD 估计方法的效果,基于 CNES 发布的实时精密轨道钟差产品,采用 PPP 解算香港 CORS 网 2022 年 356~358 年积日的观测数据,逐历元输出非差 WL 模糊度和浮点 IF 模糊度。同时组网进行基线解算,逐历元输出非组合双差模糊度网解。对比 PPP 双差模糊度与双差模糊度网解;采用双差模糊度网解约束和无约束 2 种方式估计 UPD,并对比分析。

2.1 解算策略

实验包括 PPP 解算、基线解算和 UPD 估计。考虑实时性,本文浮点 PPP 采用卡尔曼滤波进行参数估计,基于 CNES 提供的 RTS 精密产品存档进行拟实时处理,具体解算策略如表 1 所示。

表 1 浮点 PPP 解算策略

Tab. 1 Processing strategy of float PPP

项目	设置
参数估计	静态卡尔曼滤波, 30 s 采样间隔
截止高度角	9°
原始观测值	GPS L1, L2; BDS-3 B1I B3; Galileo E1, E5a, 相位先验误差 3 mm, 伪距先验误差 3 m
精密星历与钟差	CNES RTS 精密星历钟差存档
天线和 DCB 改正	ATX14(week 2223)改正天线, DCB 不改正(由精密钟差产品、接收机钟差和浮点模糊度吸收)
周跳	GF 组合和 MW 组合探测, 不修复
接收机钟	逐历元估计, 初值误差 60 ² m ²
系统间偏差	随机游走模型, 过程噪声 0.01 m/s ^{1/2}
电离层	消电离层组合, 忽略高阶项
对流层	模型改正干延迟, 估计天顶湿延迟(NMF 投影函数, 随机游走模型, 过程噪声 0.000 1 m/s ^{1/2})
地球自转, 潮汐改正, 卫星相位缠绕, 相对论效应	均模型改正

由式(6)解 UPD 需考虑站星 UPD 的初值,并对输入数据(原始观测数据、IF 浮点模糊度等)进行初步质量控制。确定初值一般采用文献[21]的策略:1)将观测到最多卫星的测站接收机 UPD 定为 0,并取浮点模糊度小数部分计算卫星 UPD;2)对有相同卫星的下一个测站,扣除相同卫星的星端 UPD 取均值得到本站 UPD,如果本站观测了其他卫星,则扣除本站 UPD 得到卫星端 UPD;3)获取所有测站 UPD 后,再由非差浮点模糊度扣除测站 UPD,并重新取其小数部分均值作为星端 UPD,迭代以上 3 步数次可得到较稳定的 UPD 初值。

2.2 PPP 双差模糊度特性

由式(7)~式(9)可知,PPP 双差模糊度与双差

模糊度网解的差异直接影响双差模糊度网解约束对非差模糊度的调整,因此首先对比两者差异。以 357 年积日为例,香港 CORS 网浮点 PPP 滤波 1 h 后所有历元宽窄巷 PPP 双差模糊度与双差模糊度网解较差的概率密度直方图如图 2 所示。WL,NL 模糊度较差均基本满足零均值正态分布,中误差分别为 0.07 周和 0.11 周,有 89%,99%的 WL 模糊度较差小于 0.1 周和 0.2 周;88%,97%的 NL 模糊度较差小于 0.1 周和 0.2 周。分别有 0.06%和 0.2%的 WL,NL 模糊度较差超过 1 周。对模糊度较差进行统计检验,在 99.9%和 97%的置信水平下认为 WL,NL 模糊度较差均值为 0。

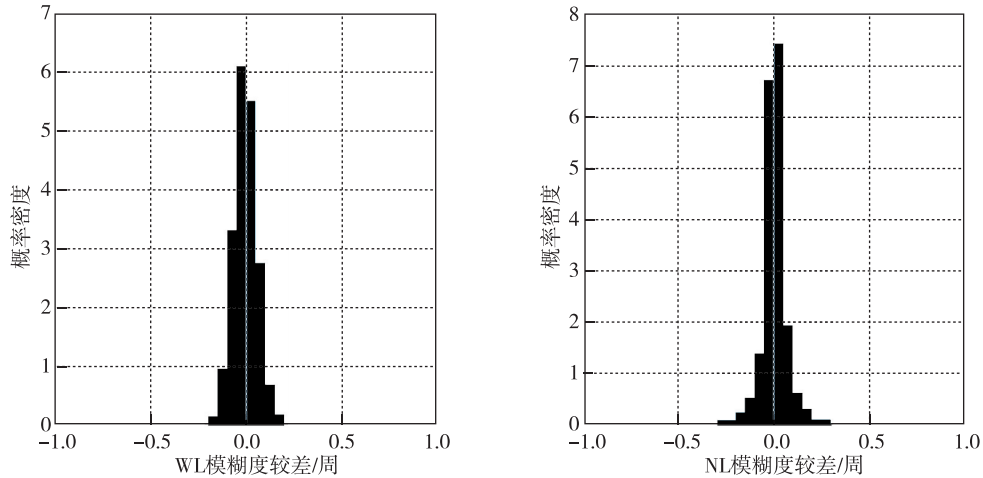


图 2 宽窄巷 PPP 双差模糊度与双差模糊度网解较差概率密度直方图

Fig. 2 Histogram of the discrepancy between WL/NL PPP DD ambiguities and the DD ambiguity network solution

以 NL 模糊度为例,考察 PPP 双差模糊度与双差模糊度网解较差的时变特性,各历元模糊度较差均值及大于 0.5 周/1 周的双差模糊度占整网双差模糊度的比例如图 3 所示。1 天内,整网模糊度较差在 PPP 收敛后的历元能维持在低于 0.1 周水平,但某些时段会出现短暂显著增加后再次收敛,在多个历元出现较差大于 0.5 周甚至 1 周的双差模糊度,约占该历元全网双差模糊度的 2%。部分卫星的 NL 双差模糊度较差的均值如图 4 所示,图中不同曲线表示不同卫星,卫星刚升起时,包含该卫星的 PPP 双差模糊度与双差模糊度网解差值平均可达 0.1 周以上,在约 0.5~1 min 后降至 0.1 周以下,经几分钟或更长长时间后,达到 0.001 周量级的稳定值,在弧段末端差值又可能增大。

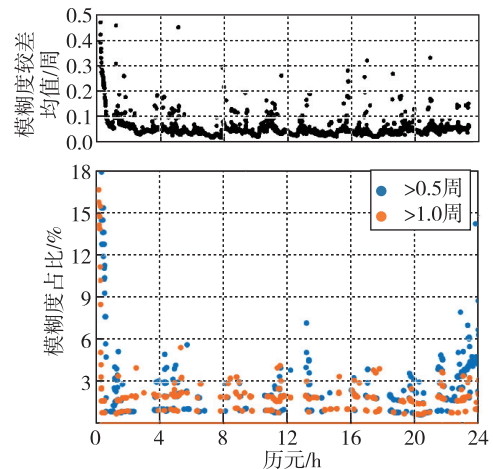


图 3 NL 模糊度较差均值与较大较差模糊度占比
Fig. 3 The average value of the discrepancy of NL ambiguities and the percentage of ambiguities with large discrepancy

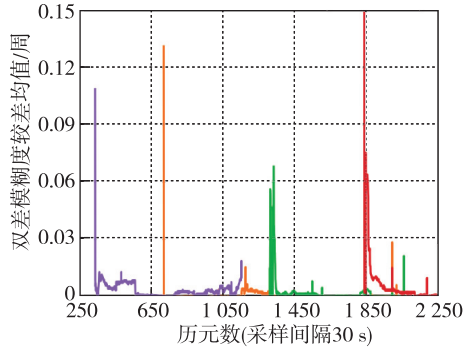


图 4 部分卫星 NL 双差模糊度网解与 PPP 双差模糊度较差均值

Fig. 4 Mean value of the discrepancy between the NL DD ambiguity network solution and NL PPP DD ambiguities for some satellites

实验中绝大部分双差模糊度网解一经固定后在整个弧段保持不变,因此 PPP 双差模糊度与双差模糊度网解的差异和波动由 PPP 双差模糊度造成。由式(1)知,NL PPP 双差模糊度由双差整周 WL 模糊度与双差浮点 IF 模糊度决定,考虑整周 WL 模糊度稳定性,重点分析 IF 模糊度对差值的影响。以 G07 和 G05 卫星为例,其相对已充分收敛的 G09 和 G06 卫星在各站的星间单差模糊度如图 5 所示。不同曲线表示不同测站,平移各站单差 IF 模糊度曲线,使收敛后的值在 $y=0$ 附近,以更好比较各站差异。当卫星初被参考网观测时,各站星间单差 IF 模糊度存在 cm 量级波动,且不同测站间没有一致性;经约 1 h 收敛后,各站星间单差模糊度达到稳定。

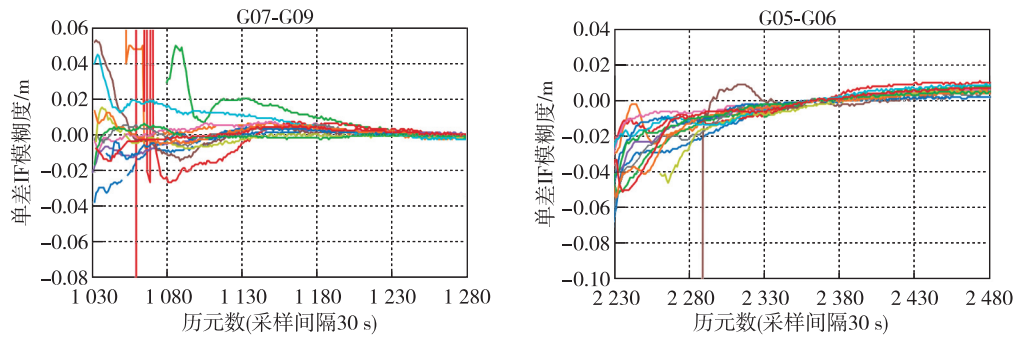


图 5 不同测站 PPP 浮点解星间单差模糊度

Fig. 5 Inter-satellite SD ambiguities of float PPP of different stations

上述对比表明,在解算时段内,WL,NL 的 PPP 双差模糊度与双差模糊度网解整体均具有较好一致性。对于区域新升起卫星,基于滤波解的非差和单差 IF 模糊度存在较长收敛时间,但 PPP 双差模糊度通常不存在明显的收敛过程,这表明在卫星初升阶段,PPP 浮点解非差模糊度虽有较大误差,但仅有很小一部分进入双差域。

2.3 双差约束 NL UPD 解算分析

将双差模糊度网解代入式(9)得到附加约束的非差 NL 模糊度(con),并与约束前值(non)比较,以 HKKT 测站对 G09 卫星的非差模糊度为例,如图 6 所示。双差模糊度初被固定时,双差模糊度网解约束可使非差 NL 模糊度产生约 0.1 周差异,随观测时间延长差异逐渐缩小,经约 75 min 后可以忽略,表明约束改变了非差浮点模糊度。

以 GPS 为例,按式(6)解的无约束 UPD 如图 7(a)所示,按式(9)对非差模糊度进行调整后解的 UPD 如图 7(b)所示,不同曲线表示不同卫星。图

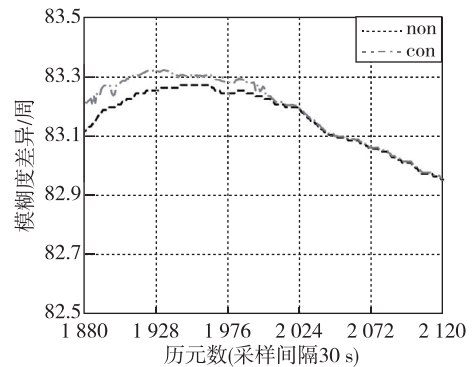


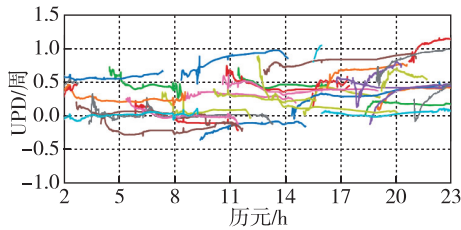
图 6 HKKT 站 G09 星双差模糊度网解约束前后非差 NL 模糊度

Fig. 6 UD NL ambiguity of HKKT station to the G09 satellite with/without the DD ambiguity network solution constraint

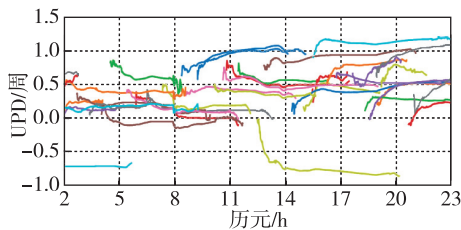
中结果表明,针对区域网滤波解算的非差模糊度,传统的无约束 UPD 解算得到的各卫星 NL UPD 在卫星初升阶段都存在一段较明显的收敛过程,对不同卫星,其持续时间从数分钟到 1 h 以上不等,少数

卫星的 UPD 在整个弧段均呈现一定的趋势性。收敛前后 UPD 值相差一般不超过 0.3 周,少数卫星相差可达约 0.5 周。引入双差模糊度网解约束后,UPD 序列的稳定性并无直观改善,各卫星均存在与无约束时时长接近的收敛阶段。

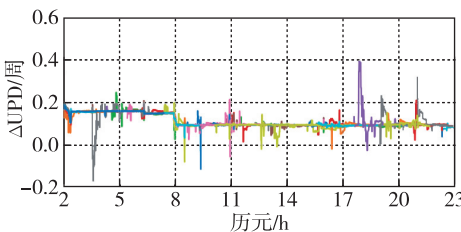
记附加双差模糊度网解约束的卫星 UPD 序列为 u_{con}^p ,无约束序列为 u_{non}^p ,由于非差 UPD 序列吸收了不同的基准,不便直接比较,因此将无约束/双差模糊度网解约束的 UPD 做差。各卫星随时间变化的 $\Delta u^p = (u_{con}^p - u_{non}^p)$ 及其标准差 $std(\Delta u)$ 如图 7 (c)和(d)所示,绝大部分卫星 UPD 差值在 8 h 前集中稳定在约 0.16 周,在 8 h 后集中稳定在约 0.10 周。相同历元下各卫星 Δu 差异很小,可将 $std(\Delta u)$ 定义为无约束/双差约束 UPD 的一致度,定量反映 2 组 UPD 的一致性,2~24 h 间 $std(\Delta u)$ 的均值为 0.008 9 周,在大于 99.9%的置信水平下满足均值为 0 的假设检验,这可以表明双差模糊度网解约束前后的星间单差 UPD 保持一致。



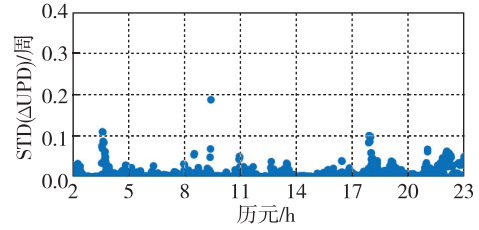
(a) 引入双差约束的 NL UPD 序列



(b) 无约束的 NL UPD 序列



(c) 约束/无约束的 NL UPD 较差序列



(d) 约束/无约束的 NL UPD 一致度

图 7 无约束与双差模糊度网解约束的 NL UPD 及其差异
Fig. 7 NL UPDs with/without the DD ambiguity network solution constraint and their differences

比较无约束/双差模糊度网解约束 UPD 的结果,并不完全符合 1.3 节的讨论:一方面,各历元约束前后的 $std(\Delta u)$ 并不严格等于 0;另一方面,多数卫星新升起时,其 Δu 会短暂地相对该历元平均水平偏离,约 14%卫星偏离(如 3.5 h,18 h 处)值可达 0.2 周以上,且持续时间较长。三方面原因造成了这种现象:1)由式(22)可知,约束前后非差浮点模糊度的取整差异,会向星间单差 UPD 引入大小为 (z/m) 的差异,可以通过星间单差 UPD 的偏离能否通过乘测站数 m 还原成整数判断是否为此因素;2)基于弧长、高度角等指标对非差模糊度加权时,不同测站对同一卫星的权略有差异,这轻微破坏了双差域和星间单差 UPD 域的正交性;3)一个更为重要的原因是,每个历元在如 2.1 节所述初始化阶段,由于双差模糊度网解约束对非差模糊度的调整和取整的效果,满足质量控制条件,从而参与最小二乘解算的测站与无双差模糊度网解约束时不同。约束前后各卫星参与 UPD 解算的测站数之差如图 8 所示,

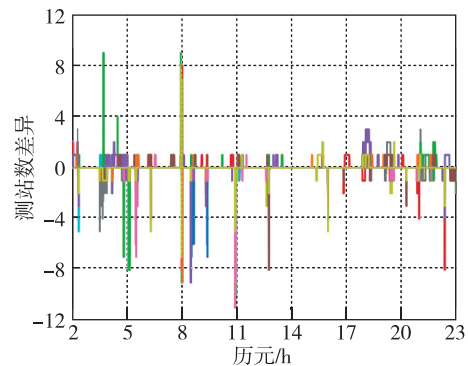


图 8 无约束与双差模糊度网解约束下参与各卫星 UPD 解算的测站数量差异

Fig. 8 The difference of the numbers of stations engaged in the UPD determination of each satellite with/without the DD ambiguity network solution constraint

测站数变化较大的时刻与图 7(c)中各卫星 Δu 差异大的时刻基本保持一致。在测站不变的时段,如 14~15 h, $\text{std}(\Delta u)$ 仅为 10^{-3} 周水平,可认为是计算误差造成的,且不足以影响用户端固定。

图 8 中双差模糊度网解约束使测站增加的历元较减少历元更多,但增加的幅度较小,通常仅 1~2 个测站,约束使测站减少的幅度则常达 5 个测站以上,这表明双差模糊度约束未能改善卫星初升阶段的非差模糊度质量。

3 结论

本文为探究双差模糊度网解对 PPP-RTK 服务端解算的作用,提出了附加双差模糊度网解约束的 UPD 估计方法,并分析了 UPD 和双差模糊度的正交关系对该约束方法性能的制约。基于香港 CORS 网数据评价 PPP 双差模糊度的特性并验证该约束方法,结果表明:

1) PPP 双差模糊度与双差模糊度网解一致性好, WL, NL 模糊度较差的中误差分别为 0.07 周和 0.11 周,在 99.9% 和 97% 的置信水平下认为 WL, NL 模糊度较差均值为 0,较差大于 1 周的宽、窄巷 PPP 双差模糊度分别仅占整网的 0.06% 和 0.2%,主要出现在卫星初升时段。

2) 约束改变了非差浮点模糊度,导致在 UPD 初始化阶段通过质量控制,从而参与 UPD 网平差的测站发生改变,使 14% 新升起卫星的窄巷 UPD 短时间内较无约束有大于 0.2 周的差异。

3) 全天窄巷星间单差 UPD 差异在大于 99.9% 的置信水平下满足零均值假设,即整体保持一致,表明对于通常 CORS 网,整周双差模糊度网解约束方法与无约束的方法对于 UPD 相关产品估计具有等效性。

参考文献

- [1] 张小红, 胡家欢, 任晓东. PPP/PPP-RTK 新进展与北斗/GNSS PPP 定位性能比较[J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1084-1100.
ZHANG Xiaohong, HU Jiahuan, REN Xiaodong. New progress of PPP/PPP-RTK and positioning performance comparison of BDS/GNSS PPP[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1084-1100(in Chinese).
- [2] BRACK A, MÄNNEL B, SCHUH H. Two-epoch centimeter-level PPP-RTK without external atmospheric corrections using best integer-equivariant estimation[J]. GPS Solutions, 2023, 27(1): 12.
- [3] 许智理, 闫倬豪, 李星星, 等. 面向智能驾驶的高精度多源融合定位综述[J]. 导航定位与授时, 2023, 10(3): 1-20.
XU Zhili, YAN Zhuohao, LI Xingxing, et al. Review of high-precision multi-sensor integrated positioning towards intelligent driving[J]. Navigation Positioning and Timing, 2023, 10(3): 1-20(in Chinese).
- [4] SHI J, GAO Y. A comparison of three PPP integer ambiguity resolution methods[J]. GPS Solutions, 2014, 18(4): 519-528.
- [5] GENG J, BOCK Y. GLONASS fractional-cycle bias estimation across inhomogeneous receivers for PPP ambiguity resolution[J]. Journal of Geodesy, 2016, 90(4): 379-396.
- [6] LI X, LI X, YUAN Y, et al. Multi-GNSS phase delay estimation and PPP ambiguity resolution: GPS, BDS, GLONASS, Galileo[J]. Journal of Geodesy, 2018, 92(6): 579-608.
- [7] HU J, ZHANG X, LI P, et al. Multi-GNSS fractional cycle bias products generation for GNSS ambiguity-fixed PPP at Wuhan University[J]. GPS Solutions, 2020, 24(1): 15.
- [8] 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(8): 1105-1122.
- [9] GENG J, GUO J, MENG X, et al. Speeding up PPP ambiguity resolution using triple-frequency GPS/BeiDou/Galileo/QZSS data [J]. Journal of Geodesy, 2020, 94(1): 6.
- [10] 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.
- [11] 舒宝. GNSS RT-PPP 和 RTK 关键技术及其一体化服务方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2022.
SHU Bao. Research on the key technologies of GNSS RT-PPP & RTK and their integrated service method[D]. Wuhan: Wuhan University, 2022(in Chinese).
- [12] LI H, LI X, GONG X. Improved method for the GPS high-precision real-time satellite clock error service[J]. GPS Solutions, 2022, 26(4): 12.
- [13] 王浩浩, 郝明, 庄文泉. GNSS 实时卫星钟差估计在地震监测中的应用[J]. 导航定位与授时, 2023, 10(3): 107-116.
WANG Haohao, HAO Ming, ZHUANG Wenquan.

- Application of GNSS real-time satellites clock offset estimation in seismic monitoring[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2023, 10(3): 107-116 (in Chinese).
- [14] 陈刚. 实时模式下 UPD 产品计算及 PPPAR 定位性能分析[J]. *测绘科学*, 2023, 48(2): 70-76.
CHEN Gang. Real-time UPD product estimation and PPPAR performance analysis[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2023, 48(2): 70-76(in Chinese).
- [15] FU W, WANG J, WANG L, et al. A Kalman filter-based online fractional cycle bias determination method for real-time ambiguity-fixing GPS satellite clock estimation[J]. *Measurement*, 2022, 205: 112207.
- [16] SHU B, LIU H, WANG L, et al. Performance improvement of real-time PPP ambiguity resolution using a regional integer clock[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 67(5): 1623-1637.
- [17] ZENG P, ZHANG Z, WEN Y, et al. Properties of multi-GNSS uncalibrated phase delays with considering satellite systems, receiver types, and network scales[J]. *Satellite Navigation*, 2023, 4(1): 19.
- [18] 侯鹏宇, 张宝成, 刘腾, 等. CDMA+FDMA 非差非组合区域 PPP-RTK[J]. *测绘学报*, 2023, 52(2): 183-194.
HOU Pengyu, ZHANG Baocheng, LIU Teng, et al. Regional PPP-RTK with CDMA+FDMA data at undifferenced and uncombined level[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(2): 183-194 (in Chinese).
- [19] 黄丁发, 周乐韬, 刘经南, 等. 基于 Internet 的 VRS/RTK 定位算法模型及实验研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2007, 32(3): 220-224+228.
HUANG Dingfa, ZHOU Letao, LIU Jingnan, et al. Internet based VRS/RTK positioning algorithm and experiment[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(3): 220-224 + 228 (in Chinese).
- [20] KHODABANDEH A, TEUNISSEN P J G. Integer estimability in GNSS networks[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(9): 1805-1819.
- [21] LI X, HAN X, LI X, et al. GREAT-UPD: an open-source software for uncalibrated phase delay estimation based on multi-GNSS and multi-frequency observations [J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(2): 66.

(编辑:黄利华)