

引文格式: 阮仁桂, 魏子卿, 冯来平. 卫星钟差解算及其星间单差模糊度固定[J]. 测绘学报, 2018, 47(7): 916-923. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170458.

RUAN Rengui, WEI Ziqing, FENG Laiping. Satellite Clock Estimation with Between-satellite Single Difference Phase Ambiguity Fixing[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(7): 916-923. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170458.

卫星钟差解算及其星间单差模糊度固定

阮仁桂^{1,2,3}, 魏子卿^{2,3}, 冯来平^{2,3}

1. 信息工程大学, 河南 郑州 450052; 2. 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054

Satellite Clock Estimation with Between-satellite Single Difference Phase Ambiguity Fixing

RUAN Rengui^{1,2,3}, WEI Ziqing^{2,3}, FENG Laiping^{2,3}

1. Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China; 2. State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China; 3. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

Abstract: A large number of researches suggest that integer ambiguity resolution (IAR) significantly improve the precision and reliability of precise point positioning (PPP) and providing “integer” satellite clock corrections is one of the available approaches proposed in the past ten years. In this paper, we propose a novel approach to estimate integer satellite clock corrections to support IAR for PPP application. Our approach is based on between-satellite single difference (BSSD) ambiguity fixing which contains two key steps, namely to estimate wide-lane fractional cycle bias (FCB) for satellites and to select and fix the BSSD ambiguity datum, which would recover the integer property of the wide- and narrow-lane BSSD ambiguities, respectively. This approach has been implemented in the SPODS software developed at Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping. Experiments for clock estimation with data collected at about 66 IGS stations have been carried out to validate the proposed approach. It is demonstrated that, in the clock estimation, 73%, on average, of the independent BSSD ambiguities were successfully fixed to integers and the mean RMS and STD of differences between our clocks and the IGS final clocks are 0.170 ns and 0.012 ns respectively. The fractional parts of the wide-lane and narrow-lane BSSD ambiguities from about 448 IGS stations were analyzed, which proves that the obtained satellite clocks together with the wide-lane FCB products have the ability to support IAR in PPP. Using our products, experiments for simulated kinematic PPP with data collected at 20 IGS stations were carried out. It is shown that, with IAR, the positioning accuracy (RMS) in N, E, U and 3D are 0.009, 0.010, 0.023 and 0.027 m, corresponding to improvements of 30.8%, 61.5%, 23.3% and 37.2%, respectively, compared with that without IAR or with IGS final clocks.

Key words: satellite clocks; ambiguity fixing; between-satellite single difference; ambiguity datum; precise point positioning

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41704035; 41774012; 41574013)

摘要: 整数相位模糊度解算可以显著提高 GNSS 精密单点定位 (PPP) 的精度。本文提出一种解算卫星钟差的方法, 通过固定星间单差模糊度恢复出能够支持单台接收机进行整数模糊度解算的卫星钟差, 即所谓的“整数”钟差。为了实现星间单差模糊度固定, 分别通过卫星端宽巷 FCB 解算和模糊度基准的选择与固定恢复出宽巷和窄巷模糊度的整数性质。为了证明本文方法的可行性, 采用 IGS 测站的 GPS 数据进行卫星钟差解算试验。结果表明, 在解算钟差时, 星间单差模糊度固定的平均成功率为 73%。

得到的卫星钟差与 IGS 最终钟差产品相比,平均的 RMS 和 STD 分别为 0.170 和 0.012 ns。448 个 IGS 测站的星间单差宽巷和窄巷模糊度小数部分的分布表明本文得到的卫星钟差和 FCB 产品具备支持 PPP 用户进行模糊度固定的能力。基于以上产品开展了模拟动态 PPP 定位试验,结果表明模糊度固定之后,N、E、U 和 3D 的定位精度(RMS)分别达到 0.009、0.010、0.023 和 0.027 m,与不固定模糊度或采用 IGS 钟差的结果相比,分别提高了 30.8%、61.5%、23.3% 和 37.2%。

关键词:卫星钟差;模糊度固定;星间单差;模糊度基准;精密单点定位

中图分类号:P228

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2018)07-0916-08

基金项目:国家自然科学基金(41704035;41774012;41574013)

整数模糊度解算是利用 GNSS 载波相位进行精密定位等各类应用的性能倍增器。因为差分能够消除接收机或卫星端公共的非整数偏差项,在相当长的一段时间内,人们一度只能对双差模糊度进行固定。在过去的 10 余年里,针对单台接收机的整数模糊度解算,国内外学者提出了多种方法,以期提高精密单点定位(precise point positioning,PPP)的精度、稳定性和缩短收敛时间。概括起来可以分为以下 3 种^[1]:①提供卫星端的非整数偏差改正数,即小数周偏差(fractional cycle bias,FCB)^[2-3](在不同文献中,尽管名词不同,如 fractional phase offset^[3],uncalibrated phase delay^[4],uncalibrated fractional offsets^[5-6] 等,但其内涵均相同);②提供基于非差整数模糊度固定得到的卫星钟差^[1],包括“整数”钟差^[7-8](integer clock)和解耦钟差^[9-10](decoupled clock);③提供网解时的宽巷和消电离层组合模糊度列表(wide-lane phase bias list,WLPBLIST)^[11]。文献[1]通过公式推导和数值试验证明了途径①和途径②在理论上和应用效果上都是等效的。已有文献表明,不同条件下的 FCB 解算及 PPP 应用研究已取得不少成果^[2,5-6,12-17],而“整数”钟差(包括解耦钟差)的解算似乎还没有得到广泛关注。其中原因大概与下述情况不无关系,即现有文献详尽地给出了 FCB 解算的关键算法,且其所需要的观测量——宽巷和消电离层组合非差模糊度——可以方便地通过 PPP 处理得到;而“整数”钟差解算采用的观测模型在形式上与传统钟差解算算法截然不同,且其关键技术——非差模糊度基准^[9]或参考模糊度^[8]的固定——在现有文献却少见清晰的描述。卫星钟差产品,除了支持单台接收机的精密定位之外,在时间频率传递、卫星钟性能评估方面也有重要意义^[18]。有鉴于此,笔者对卫星钟差解算进行了较深入的研究,提出通过星间单差模糊度固定恢复出卫星钟差的方法。

基于上述研究背景,本文第 1 节从消除秩亏的角度分析传统钟差解算方法与“整数”钟差解算方法的区别,指出“整数”钟差解算的关键在于建立整数模糊度基准。第 2 节阐述实现“整数”卫星钟差解算的关键过程——星间单差模糊度固定。第 3 节采用 IGS 测站数据进行 GPS 卫星钟差解算试验,证明获得的卫星钟差及宽巷 FCB 产品具备分离出单台接收机的星间单差整数模糊度的能力,并通过试验展示进行模拟动态 PPP 定位的效果。

1 观测模型

假设接收机 r 在频点 i 观测到卫星 s 的伪距 $P_{r,i}^s$ 和载波相位 $L_{r,i}^s$,观测方程表示如下^[9]

$$\left. \begin{aligned} P_{r,i}^s &= \rho_r^s + \theta_i^r - \theta_i^s + I_{r,i}^s + \xi_i \\ L_{r,i}^s &= \rho_r^s + \delta_i^r - \delta_i^s + \lambda_i N_{r,i}^s - I_{r,i}^s + w_{r,i}^s + \epsilon_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $\theta_i^* = c dt^* + \alpha_i^*$ 和 $\delta_i^* = c dt^* + \beta_i^*$ 分别为伪距和相位钟差,它们分别包含了各自的设备时延 α_i^* 和 β_i^* , dt^* 为卫星钟或接收机本地钟与系统时的偏差;上标 r 和 s 分别代表接收机和卫星;下标 i 表示信号频点; λ_i 为载波波长; ρ_r^s 为信号传播路径延迟,包括对流层延迟和相对论效应; c 为光速; $w_{r,i}^s$ 为相位缠绕效应; $I_{r,i}^s$ 为电离层延迟; $N_{r,i}^s$ 为整数相位模糊度; ξ_i 和 ϵ_i 分别为伪距和相位的测量误差及模型化误差。如果同时观测到两个频点(i 和 j)的数据,可利用电离层延迟与频率的平方成反比的性质,构造出双频消电离层组合观测量

$$\left. \begin{aligned} P_{r,3}^s &= \rho_r^s + \theta_3^r - \theta_3^s + \xi_3 \\ L_{r,3}^s &= \rho_r^s + \delta_3^r - \delta_3^s + a_{r,3}^s + w_{r,3}^s + \epsilon_3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, $(\cdot)_3 = \frac{f_i^2}{f_i^2 - f_j^2} (\cdot)_i - \frac{f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} (\cdot)_j$, f_* 为信号频率。特别地, $a_{r,3}^s$ 是消电离层组合模糊度参数,不是整数,但可表示为两个整数模糊度参数的线性组合

$$\begin{aligned} a_{r,3}^s &= \frac{c}{f_i + f_j} \left(\frac{f_i}{f_i - f_j} N_{r,i}^s - \frac{f_j}{f_i - f_j} N_{r,j}^s \right) = \\ &\quad \frac{c}{f_i + f_j} \left(\frac{f_i}{f_i - f_j} N_{r,w}^s + N_{r,j}^s \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $N_{r,w}^s = N_{r,i}^s - N_{r,j}^s$ 称为宽巷模糊度, 对应波长为 $\frac{c}{f_i - f_j}$; $N_{r,j}^s$ 称为窄巷模糊度, 对应波长为 $\frac{c}{f_i + f_j}$ 。根据式(3), 如果能够分别对 $N_{r,w}^s$ 和 $N_{r,j}^s$ 进行固定, 就可实现 $a_{r,3}^s$ 的“整数”解。在下文中, 如果一个参数(或它们的线性组合)能够表示为若干整数参数的线性组合则称其具有整数性质。

在式(2)中, 接收机钟差与卫星钟差无法分离, 钟差参数与模糊度参数也不可分离。这导致在没有其他约束的情况下得到的法方程是奇异的。对于前者导致的秩亏问题, 在网解中可以通过选择一台接收机或一颗卫星的时钟作为基准钟得以解决^[8,9]; 在仅用单站数据的(精密)单点定位中, 则可以通过固定卫星钟差而消除。由于设备时延通常是长期稳定的, 对于后一原因导致的秩亏问题, 可以采用以下两种方法进行处理。

方法 1: 也是最传统的方法, 利用伪距钟差对相位钟差进行约束, 将式(2)改写为

$$\left. \begin{aligned} P_{r,3}^s &= \rho_r^s + \theta_3^r - \theta_3^s + \xi_3 \\ L_{r,3}^s &= \rho_r^s + \theta_3^r - \theta_3^s + b_{r,3}^s + w_{r,3}^s + \epsilon_3 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} b_{r,3}^s &= \frac{c}{f_i + f_j} \left(\frac{f_i}{f_i - f_j} b_{r,i}^s - \frac{f_j}{f_i - f_j} b_{r,j}^s \right) = \\ &\quad \frac{c}{f_i + f_j} \left(\frac{f_i}{f_i - f_j} b_{r,w}^s + b_{r,j}^s \right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $b_{r,*}^s = N_{r,*}^s + \frac{\beta_*^r - \beta_*^s - (\alpha_{r*} - \alpha_{s*})}{\lambda_*}$, ($* = i, j$), $b_{r,w}^s = b_{r,i}^s - b_{r,j}^s$ 。注意到 $b_{r,3}^s$ 与 $a_{r,3}^s$ 在形式上是完全一样的, 在不引起混淆的情况下, 不妨也将 $b_{r,3}^s$ 、 $b_{r,w}^s$ 和 $b_{r,j}^s$ 分别称为消电离层、宽巷和窄巷模糊度。由于吸收了卫星和接收机端的设备时延, $b_{r,i}^s$ 、 $b_{r,j}^s$ 、 $b_{r,w}^s$ 和 $b_{r,3}^s$ 都不具有整数性质。式(4)是进行精密钟差解算和 PPP 的传统观测方程。为了能够支持 PPP 用户进行模糊度固定, 需要设法从 $b_{r,w}^s$ 和 $b_{r,j}^s$ 中分离出非整数偏差, 即 FCB^[1,2,4,19]。

方法 2: 通过对模糊度参数进行先验约束或者确定 S 基准^[20] 消除模糊度参数引起的秩亏。特别地, 为了获得整数钟差或解耦钟差^[1], 文献[8—9]通过选择和固定非差模糊度基准

(reference ambiguity^[8] 或 ambiguity datum^[9]), 进而实现非差宽巷和窄巷模糊度固定, 得到基于非差模糊度固定解的钟差产品。当然, 二者在细节上还是有明显区别的, 前者单独解算的伪距钟差被后者忽略; 前者将宽巷小数偏差作为时变参数处理, 而后者将其作为分段常数处理。它们所采用的观测方程也与式(2)或式(4)有明显的差异, 前者在式(2)两个观测量的基础上还加入了 MW 组合观测量, 后者先利用 MW 组合解算出非差宽巷整数模糊度, 然后将式(2)的载波观测方程表示为仅含窄巷模糊度的无电离层组合相位。

由平差理论可知, 求解观测方程式(2)是个秩亏自由网平差问题^[21]。不论是方法 1 还是方法 2, 本质上只是提供了平差的必要基准以达到消除秩亏的目的。在方法 1 中, 伪距钟差为相位钟差和非差模糊度提供了平差基准, 也使得非差整数模糊度参数受到设备时延的“污染”而失去整数性质。文献[8—9]的特别和关键之处是通过选择并固定非差模糊度基准, 建立其余非差模糊度参数的整数性质。由此可知, 模糊度参数或其线性组合是否具有整数性质, 取决于平差解算时被选作用于消除秩亏的基准。

由于载波相位的测量精度通常是伪码测量精度的 100 倍甚至更高, 在以式(4)为观测方程的传统钟差解算方法中, 伪距与相位的权比通常为 1 : 10 000, 甚至更低, 因此伪距只是为模糊度参数提供了松弛的基准。如果能够像文献[8—9]那样选出并固定模糊度基准(更强的基准), 则同样有望恢复出模糊度参数的整数性质。考虑到 PPP 用户只需要卫星的钟差, 因此可以通过星间单差消除包含在模糊度参数中的接收机端的非整数偏差, 然后通过星间单差模糊度固定将卫星钟差与具有整数性质的星间单差模糊度组合(下文简称为单差模糊度)分离, 其中模糊度基准的选择与固定是这一过程的关键。

2 星间单差模糊度固定

星间单差模糊度固定是在获得非差模糊度实数解的基础上进行的。由于消电离层组合模糊度的波长通常很短, 例如对于 GPS, L1 和 L2 的消电离层组合的波长约为 6 mm, 直接固定消电离层模糊度非常困难^[9]。一种有效的方法是将其分解为宽巷模糊度和窄巷模糊度, 然后分别进行宽巷和窄巷模糊度固定^[22—24]。与双差模糊度不同,

单差模糊度并不天然地具有整数性质, 因此固定单差模糊度的方法也与固定双差模糊度有很大区别: 需要分离出卫星端的小数偏差和选择模糊度基准。本文通过以下 3 个步骤实现单差模糊度固定:

(1) 卫星端宽巷 FCB 解算。利用 MW 组合计算宽巷非差模糊度及其标准差的估值^[28]: $\hat{b}_{r,w}^s$ 和 $\hat{\sigma}_{r,w}^s$ 。以 $\hat{b}_{r,w}^s$ 作为观测量按照文献[6]的方法计算卫星端的宽巷 FCB: F_w^s ($s=1, 2, \dots, m$)。为了保证宽巷 FCB 解的质量, 观测时间小于 20 min 或标准差大于 0.2 周的非差宽巷模糊度不参与计算。

(2) 宽巷单差模糊度固定。对于任意两颗卫星(s 和 l)间理论存在(被同一测站同步观测)的单差模糊度, 利用式(6)计算其宽巷的估值 $\hat{b}_{r,w}^{sl}$ 及标准差 $\hat{\sigma}_{r,w}^{sl}$

$$\left. \begin{aligned} \hat{b}_{r,w}^{sl} &= \hat{b}_{r,w}^s - \hat{b}_{r,w}^l - (F_w^s - F_w^l) \\ \hat{\sigma}_{r,w}^{sl} &= \sqrt{(\hat{\sigma}_{r,w}^s)^2 + (\hat{\sigma}_{r,w}^l)^2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

然后, 按照式(7)计算宽巷的固定成功概率。

$$p_w = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{n - (\hat{b}_{r,w}^{sl} - [\hat{b}_{r,w}^{sl}])}{\sqrt{2}\hat{\sigma}_{r,w}^{sl}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{n + (\hat{b}_{r,w}^{sl} - [\hat{b}_{r,w}^{sl}])}{\sqrt{2}\hat{\sigma}_{r,w}^{sl}}\right) \right] \quad (7)$$

式中, $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt$; $[\cdot]$ 表示取最近的整数。对于给定的置信水平, 如 $\alpha = 99\%$, 如果 p_w 大于 α , 则将其固定到最近的整数 $[\hat{b}_{r,w}^{sl}]$, 否则舍弃该单差模糊度。

(3) 消电离层组合单差模糊度固定。消电离层组合单差模糊度固定按照以下 3 个步骤进行:

① 构造窄巷单差模糊度。对于所有固定了宽巷的单差模糊度, 由式(8)计算与之对应的消电离层组合单差模糊度的估值 $\hat{b}_{r,3}^{sl}$ 及其标准差 $\hat{\sigma}_{r,3}^{sl}$

$$\left. \begin{aligned} \hat{b}_{r,3}^{sl} &= \mathbf{d}_r^{sl} \hat{\mathbf{b}}_3 \\ \hat{\sigma}_{r,3}^{sl} &= \sqrt{\mathbf{d}_r^{sl} \hat{\boldsymbol{\Omega}}_3 (\mathbf{d}_r^{sl})^\top} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中, $\hat{\mathbf{b}}_3$ 和 $\hat{\boldsymbol{\Omega}}_3$ 分别为消电离层组合非差模糊度的估值向量及其协方差矩阵; \mathbf{d}_r^{sl} 为对应于 $\hat{b}_{r,3}^{sl}$ 的映射向量, 其中有两个元素的值分别为 1 和 -1, 其余元素为 0。利用式(9)计算窄巷单差模糊度的估值 $\hat{b}_{r,j}^{sl}$ 及其标准差 $\hat{\sigma}_{r,j}^{sl}$

$$\left. \begin{aligned} \hat{b}_{r,j}^{sl} &= \frac{f_i + f_j}{c} \hat{b}_{r,3}^{sl} - \frac{f_i}{f_i - f_j} [\hat{b}_{r,w}^{sl}] \\ \hat{\sigma}_{r,j}^{sl} &= \frac{f_i + f_j}{c} \hat{\sigma}_{r,3}^{sl} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

注意, 至此 $\hat{b}_{r,j}^{sl}$ 并不具有整数性质。

② 单差模糊度基准选择和固定。为了固定单差窄巷模糊度, 需要为每个卫星钟差选择一个单差模糊度基准, 并将其固定到最近的整数。需要强调的是, 单差模糊度基准的选择非常关键, 因为它们为其余的单差模糊度提供整数基准, 是后续单差模糊度固定的基础。为了选出可靠的单差模糊度基准, 本文先从每一对卫星中选出一个标准差最小的作为候选单差模糊度基准, 然后将它们按照标准差的升序进行排列, 采用最小生成树算法(如 Kruskal 算法)选出所有独立的卫星对(以 GPS 星座为例, 卫星数为 32 颗, 独立的卫星对有 31 对), 将所对应的候选窄巷单差模糊度固定到最近的整数, 进而对消电离层组合单差模糊度进行固定。

③ 独立单差模糊度固定。在完成了单差模糊度基准的选择与固定之后, 剩余的单差模糊度就恢复了整数性质, 就可以采用类似于双差模糊度固定的方法进行独立单差模糊度的序贯固定: 基于已有的单差模糊度固定解对所有候选的未固定的单差模糊度按照式(7)重新计算其窄巷的固定成功概率, 每次固定综合成功率最大的且与已固定的单差模糊度相互独立的消电离层组合单差模糊度, 直到没有可固定的独立的单差模糊度为止。这一过程中采用 Kruskal 算法进行独立性判断。

在步骤②和③中, 对消电离层组合单差模糊度(包括单差模糊度基准)进行“固定”是指按照式(10)利用固定了的宽巷和窄巷计算消电离层组合的整数解 $\hat{b}_{r,3}^{sl}$, 并将其作为虚拟观测量对已有方程系统进行约束(具体方法可参考文献[22])。

$$\hat{b}_{r,3}^{sl} = \frac{c}{f_i + f_j} \left(\frac{f_i}{f_i - f_j} [\hat{b}_{r,w}^{sl}] + [\hat{b}_{r,j}^{sl}] \right) \quad (10)$$

式中, $\hat{b}_{r,w}^{sl}$ 和 $\hat{b}_{r,j}^{sl}$ 先后由式(6)和式(9)计算得到。

这样, 本文进行卫星钟差解算的观测方程可等效地表示如下

$$\left. \begin{aligned} P_{r,3}^s &= \rho_r^s + \theta_3^r - \theta_3^s + \xi_3, \dots, p_{P3} \\ L_{r,3}^s &= \rho_r^s + \theta_3^r - \theta_3^s + b_{r,3}^s + w_{r,3}^s + \varepsilon_3, \dots, p_{L3} \\ \tilde{b}_{r,3}^{sl} &= \mathbf{d}_r^{sl} \hat{\mathbf{b}}_3 + v, \dots, p_b \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中, p_* 为 3 类(虚拟)观测量的权, 一般地, $p_{L3}/p_{P3} \approx 10^4$, 而 $p_b \gg p_{L3}$ 。

3 验 证

本文提出的“整数”卫星钟差解算方法所采用的观测模型与传统的 GNSS 非差数据处理完全一致,数据处理时只需要在获得非差消电离层组合模糊度的实数解之后,增加星间单差模糊度固定过程。以上方法已经很方便地应用于西安测绘研究所研制的多功能 GNSS 数据处理软件 SPODS^[25]当中。

为了验证本文方法,笔者收集 2015 年 DOY 243—261 期间的 IGS 监测站的 GPS 数据进行钟差解算试验。测站分布如图 1 所示,测站总数约为 450 个,其中 66 个测站(红色方形)用于解算钟差。在进行钟差解算时,将测站坐标和 GPS 卫星轨道固定到 IGS 最终轨道和站坐标产品,EOP 参数采用 IERS 提供的最终产品;卫星和接收机的天线相位中心改正信息来自 igs08.atx,测站的潮汐形变采用 IERS2003 协议,日月历表采用 JPL DE405,对流层天顶延迟先验值采用 Saastamoinen 模型计算,映射函数采用 GMF 模型计算^[26],天顶延迟采用分段常数模型模拟,每 2 h 解算一个参数,每 24 h 估计一组水平梯度参数。GPS 卫星的姿态模型采用文献[27]提出的简化模型。数据处理弧长为 24 h,数据采样间隔为 300 s,采用文献[28]的方法将钟差加密到 30 s。消电离组合伪距和相位的先验精度设为 2 m 和 2 cm,并根据高度角 e 按照函数 $\sin^2 e$ 进行降权。在星间单差模糊度固定过程中,仅对固定成功概率大于 99% 且小数部分绝对值小于 0.15 周的单差模糊度进行固定,约束权 p_b 取 10^{10} 。

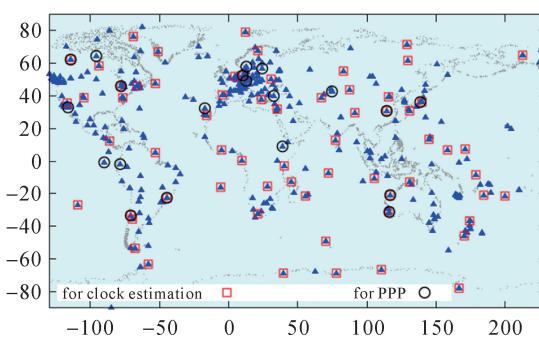


Fig.1 Distribution of IGS stations

图 2 绘出了各颗卫星的宽巷 FCB(相对于 PRN01)序列。可以看出,FCB 的估值相当地稳定,统计表明重复精度在 0.009 周(PRN02)~

0.031 周(PRN04)之间。

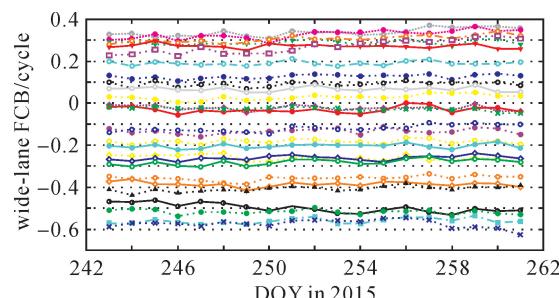


图 2 GPS 卫星星端宽巷 FCB 序列
Fig.2 Estimated wide-lane FCBs for GPS satellites

图 3 按天统计了单差模糊度成功固定的比例及解算得到的卫星钟差与 IGS 最终钟差之差的 RMS 和 STD。可以看出,模糊度固定的成功率稳定在 70%~75%,平均固定成功率为 73%。钟差的 RMS 为 0.13~0.2 ns,STD 都小于 0.014 ns,平均的 RMS 和 STD 分别为 0.17 ns 和 0.012 ns。

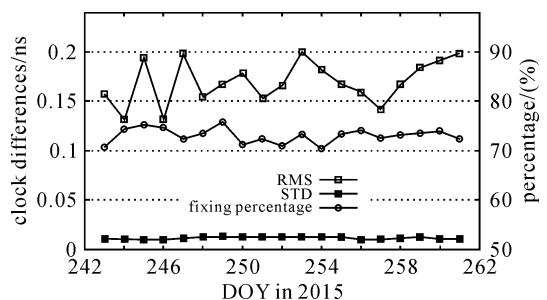


图 3 单差模糊度固定的比例和卫星钟差的精度
Fig.3 Percentage of fixed BSSD ambiguities and the RMS and STD difference between the estimated satellite clocks and the IGS final clocks

为了证明本文的钟差(和宽巷 FCB)具备恢复出单台接收机的单差整数模糊度的能力,笔者利用所获得的 DOY 250 的宽巷 FCB 和卫星钟差对当天所有 IGS 测站(共 448 个)的观测数据进行 PPP 处理,得到非差消电离层组合模糊度的实数解之后,构造出所有可能的单差模糊度并进行宽巷 FCB 改正,而后进行宽巷单差模糊度固定,输出所有宽巷和固定了宽巷的窄巷单差模糊度,总个数分别为 228 958 和 174 894,图 4 统计了它们小数部分的分布。可以看出,宽巷和窄巷的小数部分均呈现出以 0 为均值的近似正态分布,其中,宽巷的小数部分绝对值小于 0.2 周的比例达到了 85.8%,窄巷的这一比例达到了 94.6%。这可说明宽巷和窄巷单差模糊度数学期望是整数,

因此可以采用已有的模糊度固定方法对单差模糊度进行固定。

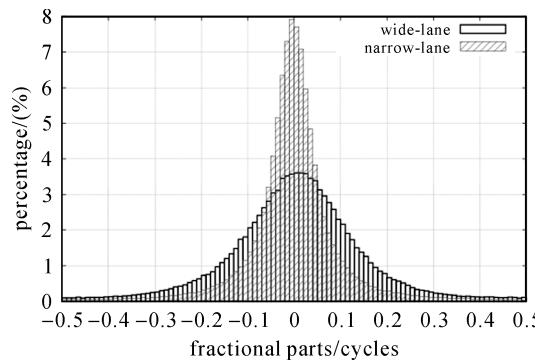


图 4 448 个 IGS 测站宽巷和窄巷单差模糊度小数部分的分布

Fig.4 Distribution of the fractional parts of wide-/narrow-lane BSSD ambiguities from 448 IGS stations

为了展示利用本文的钟差(和宽巷 FCB)进行 PPP 定位模糊度固定的效果。采用 DOY 250 共 20 个测站(图 1 中圆圈表示的点)的数据进行模拟动态 PPP 试验。将每个测站的 24 h rinex 数据文件切分为 12 个 2 h 弧长的独立文件分别进行处理。卫星轨道固定到 IGS 最终轨道,采用不同的钟差产品或模糊度解算策略进行以下 3 组试验:

(1) 试验 1(EXP1):采用 IGS 最终钟差产品,模糊度采用浮点解;

(2) 试验 2(EXP2):采用本文的钟差产品,模糊度采用浮点解;

(3) 试验 3(EXP3):采用本文的钟差产品并进行单差模糊度固定。模糊度固定采用序贯取整方法,具体方法见文献[22],同样仅对固定成功概率大于 99%且小数部分的绝对值小于 0.15 周的单差模糊度进行固定。

将定位结果与 IGS 天解的站坐标进行比较评估定位精度。图 5 统计了 3 组 PPP 试验各测站 N、E、U 方向和三维位置(3D)误差的 RMS。可以看出,试验 2 和试验 1 的结果在不同测站的 RMS 统计中互有优劣,但都相差不大;试验 3 各测站各方向坐标误差的 RMS 普遍地较试验 1 和试验 2 有明显减小,其中在 E 方向的改进尤为明显。统计表明,相比于试验 1,试验 3 各测站 N 方向的改善幅度在 14%~63%;E 方向的改善幅度在 10%~86%;U 方向的改善幅度在 4%~48%;3D 定位精度的改善幅度在 18%~60%。表 1 给出了 20 个测站定位结果的平均 RMS 统计值。可以看出,相比于试验 1,试验 2 的结果在毫米量级上没有差异;而试验 3 则在 3 个方向都有明显的提高,N、E、U 和 3D 误差的 RMS 分别达到了 0.009、0.010、0.023 和 0.027 m,比试验 1 分别提高了 30.8%、61.5%、23.3% 和 37.2%。这说明模糊度固定有效提高了 PPP 的定位精度,再次证明了本文解算的钟差具有支持 PPP 模糊度固定的能力。需要说明的是,以上 PPP 试验仅是为了验证本文的整数钟差产品,所用的模糊度固定方法仍有改进余地。

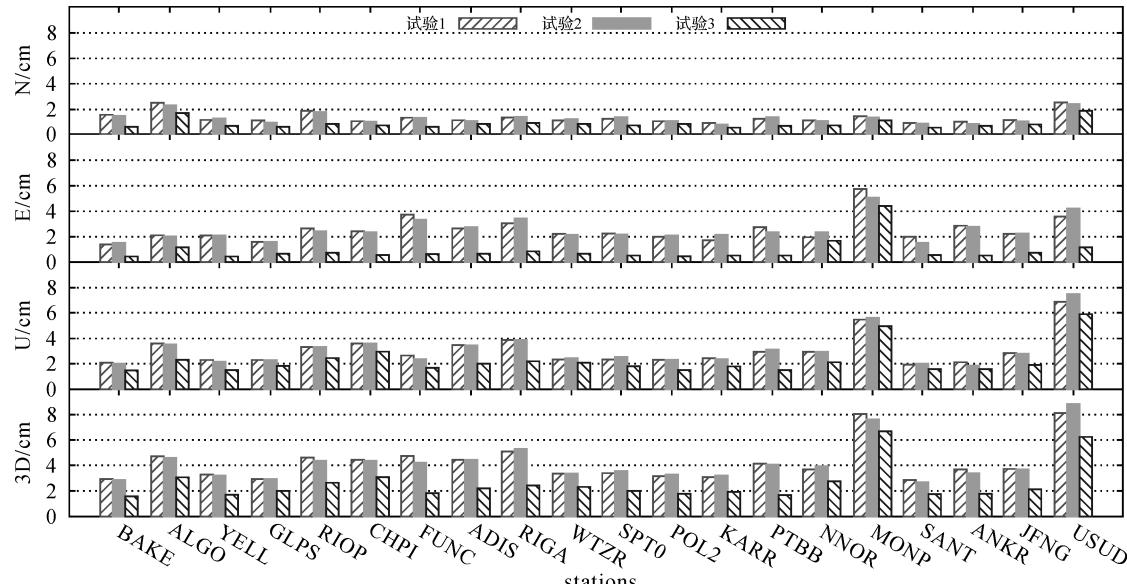


图 5 3 组试验各测站动态 PPP 定位误差的 RMS

Fig.5 RMS of the kinematic PPP for each station

表 1 动态 PPP 定位误差的平均 RMS**Tab.1 Mean RMS of kinematic PPP m**

试验	N	E	U	3D
试验 1	0.013	0.025	0.031	0.042
试验 2	0.013	0.025	0.031	0.042
试验 3	0.009	0.010	0.023	0.027

4 总 结

本文提出一种基于星间单差模糊度固定的卫星钟差解算方法,所得到的卫星钟差能够支持 PPP 用户进行整数模糊度解算。为了验证本文方法,采用 IGS 测站的 GPS 数据进行了钟差解算试验,结果表明星间单差模糊度固定的成功率约为 73%,得到的卫星钟差与 IGS 最终钟差产品相比,平均的 RMS 差和 STD 分别为 0.17 ns 和 0.012 ns。分析 448 个 IGS 测站的星间单差模糊度小数部分的分布表明,本文得到的卫星钟差和宽巷 FCB 产品能够恢复出单台接收机星间单差模糊度的整数性质。20 个测站的模拟动态 PPP 定位结果表明,模糊度固定后,N、E、U 和 3D 误差的 RMS 分别达到了 0.009、0.010、0.023 和 0.027 m,相比于不固定模糊度或采用 IGS 最终钟差产品的结果,改进幅度分别为 30.8%、61.5%、23.3% 和 37.2%,有力证明了本文方法的正确性和有效性。

本文实现星间单差模糊度解算固定的核心思想是通过选择和固定模糊度基准,恢复星间单差模糊度的整数性质,这一思想也可以应用于 Galileo、BDS 等其他 GNSS 系统的“整数”卫星钟差解算。

参考文献:

- [1] GENG Jianghui, MENG Xiaolin, DODSON A H, et al. Integer Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning: Method Comparison [J]. Journal of Geodesy, 2010, 84 (9): 569-581.
- [2] GENG Jianghui, SHI Chuang, GE Maorong, et al. Improving the Estimation of Fractional-cycle Biases for Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning [J]. Journal of Geodesy, 2012, 86(8): 579-589.
- [3] GABOR M J, NEREM R S. GPS Carrier Phase Ambiguity Resolution Using Satellite-satellite Single Differences [C]// Proceedings of the 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1999). Nashville, TN: Institute of Navigation, 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.
- [5] ZHANG Xiaohong, LI Pan, GUO Fei. Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning with Hourly Data for Global Single Receiver [J]. Advances in Space Research, 2013, 51 (1): 153-161.
- [6] LI Xingxing, ZHANG Xiaohong. Improving the Estimation of Uncalibrated Fractional Phase Offsets for PPP Ambiguity Resolution [J]. Journal of Navigation, 2012, 65 (3): 513-529.
- [7] LAURICHESSE D, MERCIER F. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP [C]// Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Fort Worth, TX: Institute of Navigation, 2007: 839-847.
- [8] LOYER S, PEROSANZ F, MERCIER F, et al. Zero-difference GPS Ambiguity Resolution at CNES - CLS IGS Analysis Center [J]. Journal of Geodesy, 2012, 86(11): 991-1003.
- [9] COLLINS P, BISNATH S, LAHAYE F, et al. Undifferenced GPS Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing [J]. Navigation, 2010, 57(2): 123-135.
- [10] COLLINS P, LAHAYE F, HÉROUX P, et al. Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model [C]// Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Savannah: Institute of Navigation, 2008: 1315-1322.
- [11] BERTIGER W, DESAI S D, HAINES B, et al. Single Receiver Phase Ambiguity Resolution with GPS Data [J]. Journal of Geodesy, 2010, 84(5): 327-337.
- [12] LI Xingxing, GE Maorong, ZHANG Hongping, et al. A Method for Improving Uncalibrated Phase Delay Estimation and Ambiguity-fixing in Real-time Precise Point Positioning [J]. Journal of Geodesy, 2013, 87(5): 405-416.
- [13] LI Pan, ZHANG Xiaohong, REN Xiaodong, et al. Generating GPS Satellite Fractional Cycle Bias for Ambiguity-fixed Precise Point Positioning [J]. GPS Solutions, 2016, 20 (4): 771-782.
- [14] GENG Jianghui, BOCK Y. GLONASS Fractional-cycle Bias Estimation Across Inhomogeneous Receivers for PPP Ambiguity Resolution [J]. Journal of Geodesy, 2016, 90 (4): 379-396.
- [15] 潘宗鹏, 柴洪洲, 刘军, 等. 基于部分整周模糊度固定的非差 GPS 精密单点定位方法 [J]. 测绘学报, 2015, 44(11): 1210-1218. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20150056.
- PAN Zongpeng, CHAI Hongzhou, LIU Jun, et al. Partial Ambiguity Resolution Method for Zero-difference Precise Point Positioning [J]. Acta Geodaetica et Cartographica

- Sinica, 2015, 44(11): 1210-1218. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20150056.
- [16] GENG Jianghui, SHI Chuang. Rapid Initialization of Real-time PPP by Resolving Undifferenced GPS and GLONASS Ambiguities Simultaneously [J]. Journal of Geodesy, 2017, 91(4): 361-374.
- [17] LI Pan, ZHANG Xiaohong, GUO Fei. Ambiguity Resolved Precise Point Positioning with GPS and BeiDou [J]. Journal of Geodesy, 2017, 91(1): 25-40.
- [18] SENIOR K L, RAY J R, BEARD R L. Characterization of Periodic Variations in the GPS Satellite Clocks[J]. GPS Solutions, 2008, 12(3): 211-225.
- [19] GENG Jianghui, TEFERLE F N, SHI C, et al. Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning with Hourly Data [J]. GPS Solutions, 2009, 13(4): 263-270.
- [20] JONGE P J. A Processing Strategy for the Application of the GPS in Networks [D]. Delft: Delft University of Technology, 1998: 238.
- [21] 黄维彬. 近代平差理论及其应用[M]. 北京:解放军出版社, 1990: 525.
- HUANG Weibin. Modern Adjustment Theory and Applications [M]. Beijing: The People's Liberation Army Press, 1990: 525.
- [22] 阮仁桂. SPODS软件GPS/GNSS网解的模糊度解算方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(2): 128-134. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20130461.
- RUAN Rengui. Ambiguity Resolution for GPS/GNSS Network Solution with SPODS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(2): 128-134. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20130461.
- [23] GE Maorong, GENDT G, DICK G, et al. Improving Carrier-phase Ambiguity Resolution in Global GPS Network Solutions[J]. Journal of Geodesy, 2005, 79(1-3): 103-110.
- [24] BLEWITT G. Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2000 km [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(B8): 10187-10203.
- [25] RUAN Rengui, JIA Xiaolin, WU Xianbing, et al. SPODS Software and Its Result of Precise Orbit Determination for GNSS Satellites[M]// SUN Jiadong, JIAO Wenhui, WU Haitao, et al. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2014 Proceedings: Volume III. Berlin: Springer, 2014: 301-312.
- [26] BOEHM J, NIELL A, TREGONING P, et al. Global Mapping Function (GMF): A New Empirical Mapping Function Based on Numerical Weather Model Data[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(7): L07304.
- [27] KOUBA J. A Simplified Yaw-Attitude Model for Eclipsing GPS Satellites[J]. GPS Solutions, 2009, 13(1): 1-12.
- [28] RUAN Rengui, WEI Ziqing, JIA Xiaolin. Estimation, Validation, and Application of 30-s GNSS Clock Corrections[M]// SUN Jiadong, LIU Jingnan, YANG Yuanxi, et al. Proceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2017 Proceedings: Volume III. Singapore: Springer, 2017: 21-36.

(责任编辑:陈品馨)

收稿日期: 2017-08-11

修回日期: 2018-02-27

第一作者简介: 阮仁桂(1983—),男,硕士,助理研究员,研究方向为GNSS精密定轨和定位。

First author: RUAN Rengui (1983—), male, master, assistant research fellow, majors in precise positioning and orbit determination with GNSS.

E-mail: rrg2002me@163.com