

全球参考站网窄巷非校准相位延迟 产品时变特性

王思遥, 李博峰

(同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要: 窄巷非校准相位延迟(UPD)产品的质量和可用性是影响精密单点定位模糊度固定(PPP-AR)效率的重要因素。采用全球 108 个国际 GPS 服务(International GPS Service, IGS)测站观测数据, 计算了基于全球参考站网的窄巷 UPD 产品, 分析了窄巷 UPD 产品的变化特性, 其单日变化量最大可达 0.6 周。通过分析 UPD 改正后的模糊度残差, 论证了 UPD 产品和用户端模糊度均受到因未被恰当模型化而造成的残余误差的影响, 且 UPD 的时变特性与各参考站残余系统误差有关。最后, 采用 4 个用户站进行 PPP-AR 实验分析 UPD 产品的可用性, 以模糊度固定失败率、固定错误率和首次固定时间为评估指标, 结果表明, 全球参考站网窄巷 UPD 产品的最佳使用时限不大于 30 min。

关键词: 非校准相位延迟(UPD); 精密单点定位(PPP); 模糊度固定(AR); 全球参考站网; UPD 可用时限

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

UPDs were analyzed to demonstrate that ambiguities and UPDs are both influenced by the unmodeled atmosphere errors. We found the time-varying property of NL UPD is relevant to the residual atmospheric errors of the selected reference stations used to estimate UPDs. Moreover, the real observation data of four IGS stations were processed in PPP-AR mode to demonstrate the time availability of UPD products. The statistical results of time-to-first-fix (TTFF), unfix rate and incorrect fix rate were adopted to evaluate the performance of PPP-AR service. According to the experiment results, we concluded that the effective time limit of NL UPD products should be no more than 30 minutes.

Key words: uncalibrated phase delays (UPD); precise point positioning (PPP); ambiguity resolution (AR); global reference station network; effective time limit of UPD products

Time-varying Property of Narrowlane Uncalibrated Phase Delays Products Estimated from a Global Reference Station Network

WANG Siyao, LI Bofeng

(College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The quality and availability of narrowlane (NL) uncalibrated phase delays (UPD) products are the key factors to precise point positioning ambiguity resolution (PPP-AR) service. In this paper, the GPS observations from 108 world distributed International GPS Service (IGS) reference stations were employed to calculate the widelane (WL) and NL UPD products. The variations of NL UPDs were evaluated and the results show that the maximum daily variation can reach 0.6 cycles. Then, the residuals of ambiguities corrected with

精密点定位(PPP)技术在无需参考站的前提下为全球用户提供厘米级定位服务。在过去 10 余年中, 该技术得到了学界深入系统的研究, 其应用已从位置服务扩展到大气变化监测、地震学和板块移动等科学领域^[1-4]。传统 PPP 算法仅凭单站无法消除浮点模糊度中的卫星初始相位偏差与硬件延迟, 模糊度不具有整数性, 必须耗费数 10 min 使得浮点模糊度收敛。为了缩短收敛时间, 模糊度固定(ambiguity resolution, PPP-AR)技术应运而生。该技术根据参考站网观测数据解算卫星硬件延迟产品并发送给用户, 用户使用该产品对模糊度进行改正, 改正后的模糊度等价于差分定位模式中的双差模糊度, 已具备整数特性, 可被固定从而得到精确位置解。

由于 PPP 使用无电离层组合(IF)观测值, 用户

收稿日期: 2017-06-04

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0501802); 国家自然科学基金(41622401, 41574023)

第一作者: 王思遥(1991—), 男, 博士生, 主要研究方向为 GNSS 数据处理。E-mail: siyao_wang91@163.com

通讯作者: 李博峰(1983—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为数据处理与 GNSS 理论算法。

E-mail: Bofeng_Li@tongji.edu.cn

端的模糊度固定一般采用如下方案:先利用宽巷改正信息固定宽巷模糊度,再通过无电离层组合模糊度和固定的宽巷模糊度解算窄巷模糊度,最后利用窄巷改正信息固定窄巷模糊度.对于卫星硬件延迟 UPD(uncalibrated phase delays)的解算,诸多学者提出了策略,具有代表性的有 Collins 等^[5]提出的耦合钟法和 Laurichesse 等^[6]提出的整数相位钟法,均将卫星端相位硬件延迟和卫星钟差合并,在无电离层组合观测方程中估计“整数相位钟”,但它们的宽巷硬件延迟解算策略并不相同,可参考文献[5-6].整数钟法与耦合钟法的最大缺陷是要求所有参考站观测值联立求解,这对服务器的数据处理效率有较高要求.第3种被广泛认可的硬件延迟解算策略是 Ge 等^[7]提出的 UPD 法.该方法通过对宽巷与窄巷模糊度分别求取小数部分均值得到 UPD 改正数.由于该方法对参考站观测数据实行各站分散式解算,有效地缓解了服务器计算压力.上述3种方法在模糊度整数特性恢复、必要改正数选取和参数等价性等方面的详细比较可参阅文献[8].

针对基于 UPD 产品的 PPP-AR 技术,近10年间有不同学者从理论与应用方面进行了大量有意义的研究^[7,9-10].参考站发送给用户的 UPD 产品分为宽巷与窄巷两类,用户收到产品后依次改正并固定宽巷与窄巷模糊度.经宽巷 UPD 改正后的宽巷模糊度一般仅需几分钟即可被固定.文献[11]详细分析了站、星宽巷 UPD 的时变特性,指出卫星宽巷 UPD 具有很高的稳定性,在卫星可视周期内,经过一段时间收敛后稳定于一常数值.因此提高其播发频率对用户定位效率的提升实际上非常有限.而窄巷波长较短,理论上相比宽巷模糊度随时间变化的速度要快得多,它的可用性和时效性对用户端模糊度固定效率和定位精度均有显著影响,因此对其时变特征进行分析有助于服务器确定合适的窄巷 UPD 播发频率.在不影响用户使用效果的前提下降低播发频率对缓解通讯压力颇有裨益.另外,分析窄巷 UPD 的时变特性也具有用户端实际应用的参考价值.例如当用户由信号良好区域进入暂时无法实时接收 UPD 产品的区域时,只能使用进入该区域前最后接收的一组 UPD 产品进行定位.由于窄巷 UPD 随时间实时变化,这组 UPD 能够使用的最长时间就决定了用户在通讯受阻地区的定位效率.

本文在介绍非差 UPD 估计的基本原理的基础上,利用全球108个IGS站的观测数据解算了宽巷与窄巷 UPD 产品,讨论了窄巷 UPD 产品的时变特

性及其影响因素.最后,用实际观测数据模拟不同 UPD 延迟进行了 PPP-AR 解算实验,分析了窄巷 UPD 产品的可用性时限.

1 非差 UPD 产品解算

UPD 是包含卫星及接收机端未检校的初始相位偏差和硬件延迟等偏差的综合误差.在传统 PPP 解算中,UPD 造成的模糊度非整周部分不能和整数模糊度分离,这导致 PPP 模糊度为浮点值,破坏了模糊度的整数性,为固定模糊度制造了障碍. Ge 等^[7]提出的 UPD 改正方法是采用一定数量的参考站网先后估算卫星宽巷与窄巷 UPD 改正数,发送至用户后由用户对星间单差模糊度进行整数特性恢复.文献[9]对上述方案进行了改进,介绍了非差 UPD 产品解算方法.

传统 PPP 算法采用消电离层组合(IF)求解参数,考虑接收机与卫星端 UPD,伪距与相位 IF 方程为

$$P_{i,\text{IF}}^k = \rho_i^k + ct^k - ct_i + T_i^k + \delta_{i,\text{IF}} - \delta_{\text{IF}}^k \quad (1)$$

$$\phi_{i,\text{IF}}^k = \rho_i^k + ct^k - ct_i + T_i^k + \lambda_{\text{IF}} \tilde{N}_{i,\text{IF}}^k + \varphi_{i,\text{IF}} - \varphi_{\text{IF}}^k \quad (2)$$

式中: i 和 k 分别代表接收机编号和卫星编号; P 和 ϕ 分别为伪距和相位观测值; ρ 为卫地距,包括固体潮、海洋潮和相对论效应的影响; c 为光速; t^k 和 t_i 分别为卫星钟差和接收机钟差; T 为对流层延迟; λ 为波长; \tilde{N} 为整周模糊度; δ_i 和 δ^k 分别为接收机和卫星端的码偏差; φ_i 和 φ^k 分别为接收机和卫星端的相位偏差.在解算时,对流层延迟采用天顶延迟和映射函数来建模.

由于硬件延迟无法和整周模糊度分离,式(1)、(2)联立求得的是浮点 IF 模糊度 $N_{i,\text{IF}}^k$.此外,由 MW 组合观测值可计算宽巷浮点模糊度,如式(3):

$$N_{i,\text{WL}}^k = (\phi_{i,1}^k - \phi_{i,2}^k) - \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} \frac{f_1 p_{i,1}^k + f_2 p_{i,2}^k}{c} \quad (3)$$

式中: f_1 、 f_2 分别为GPS的1、2频率; $\phi_{i,1}^k$ 、 $\phi_{i,2}^k$ 、 $p_{i,1}^k$ 和 $p_{i,2}^k$ 分别2个频率的相位和伪距观测值.在得到一定时间弧段参考站网内所有测站对于所有卫星的宽巷浮点模糊度 $N_{i,\text{WL}}^k$ 之后,采用式(4)至(6)解算宽巷 UPD 产品,再用以改正宽巷浮点模糊度并固定其整数解. PPP 浮点宽巷模糊度可以写为

$$N_{i,\text{WL}}^k = \tilde{N}_{i,\text{WL}}^k + b_i + b^k + \epsilon_i^k \quad (4)$$

式中: $\tilde{N}_{i,\text{WL}}^k$ 为 $N_{i,\text{WL}}^k$ 对应的整数模糊度; b_i 和 b^k 分别为接收机和卫星 UPD 参数; ϵ_i^k 为包含观测噪声与残余

模型误差的混合噪声量^[12]. 卫星 UPD 解算即为求解 b^k , 需要多个参考站的模糊度数据作为伪观测值信息将其与整周模糊度分离. 假设有 r 个参考站接收机同时观测 s 颗卫星, 可得式(5):

$$\begin{bmatrix} N_1^1 \\ N_1^2 \\ \vdots \\ N_1^s \\ N_2^1 \\ N_2^2 \\ \vdots \\ N_r^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{N}_1^1 \\ \tilde{N}_1^2 \\ \vdots \\ \tilde{N}_1^s \\ \tilde{N}_2^1 \\ \tilde{N}_2^2 \\ \vdots \\ \tilde{N}_r^s \end{bmatrix} + [\mathbf{I}_r \otimes \mathbf{e}_s \quad \mathbf{e}_r \otimes \mathbf{I}_s] \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_r \\ b^1 \\ \vdots \\ b^s \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: \mathbf{I}_n 和 \mathbf{e}_n 分别为 n 维单位矩阵和 n 维元素全为 1 的列向量. 该方程观测值数共 rs 个, 而未知数有 $rs+r+s$ 个, 包括 rs 个整周模糊度, r 个接收机 UPD 和 s 个卫星 UPD, 故该方程秩亏, 需要固定基准消除秩亏得到唯一解. 首先将所有 rs 个模糊度作为整数基准固定, 整数基准确定的详细过程可参考文献[13-14]. 需要说明的是, 所谓“整数模糊度基准”无须等于浮点模糊度对应的整周模糊度. 在用户端, UPD 产品基准将被消除, 模糊度基准加减整数并无影响. 整周模糊度基准确定后可视为已知值, 将其移动到等式左边, 式(5)改写为

$$\begin{bmatrix} N_1^1 - \tilde{N}_1^1 \\ N_1^2 - \tilde{N}_1^2 \\ \vdots \\ N_1^s - \tilde{N}_1^s \\ N_2^1 - \tilde{N}_2^1 \\ N_2^2 - \tilde{N}_2^2 \\ \vdots \\ N_r^s - \tilde{N}_r^s \end{bmatrix} = [\mathbf{I}_r \otimes \mathbf{e}_s \quad \mathbf{e}_r \otimes \mathbf{I}_s] \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_r \\ b^1 \\ \vdots \\ b^s \end{bmatrix} \quad (6)$$

由于卫星与接收机 UPD 参数仍然不可分离, 该方程依然秩亏. 可将任意一个接收机的 UPD 设置为零以消除秩亏. 之后方程组所有参数可估, 采用最小二乘法估计剩余的 UPD 参数. 非差 UPD 产品解算过程中多次指定非差基准, 但用户端使用过程中采用了星间单差观测值, 故基准的选取实际不会改变用户的解算结果.

考虑到宽巷 UPD 的高稳定性, 观测时间前 24 h 内的宽巷 UPD 产品足以替代实时宽巷 UPD 用以进行模糊度固定^[7]. 一旦宽巷模糊度固定, 即可采用宽巷模糊度固定解 $\tilde{N}_{i,\text{WL}}^k$ 和 IF 浮点模糊度 $N_{i,\text{IF}}^k$ 解算窄巷浮点模糊度.

$$N_{i,\text{NL}}^k = \frac{f_1 + f_2}{f_1} N_{i,\text{IF}}^k - \frac{f_2}{f_1 - f_2} \tilde{N}_{i,\text{WL}}^k \quad (7)$$

各参考站独立完成窄巷浮点模糊度解算后, 将其汇

总联立, 按照式(4)、(6)方法求解窄巷 UPD 产品, 按照固定格式输出后即可播发给用户.

需要指出的是, 式(6)可用于求解宽巷或窄巷 UPD, 本文基于这一方法生成非差 UPD 产品. Ge 等^[7]提出的 UPD 估计方法与本文略有不同, 他将所有测站相同卫星单差模糊度小数部分的均值作为 UPD 参数估值, 如式(8):

$$b^{kl} = \frac{\sum_{i=1}^r \text{frac}(N_i^{kl})}{r} \quad (8)$$

式中: $\text{frac}()$ 表示取模糊度小数部分; k, l 表示星间单差的 2 颗卫星. 可见 Ge 等^[7]解算的 UPD 产品是星间单差形式的; 本文所述方法所用最小二乘估计策略保留了不同 UPD 参数间的相关性, 比直接取平均在理论上更为严密.

2 实验数据与评价指标

PPP-AR 服务的参考站数量与范围亦与服务质量相关. 选择全球分布参考站网可以随时观测到所有卫星, 理论上可为全球任意位置的用户服务. 本文实验数据来源于 IGS 全球观测网中的 108 个测站, 分布如图 1.

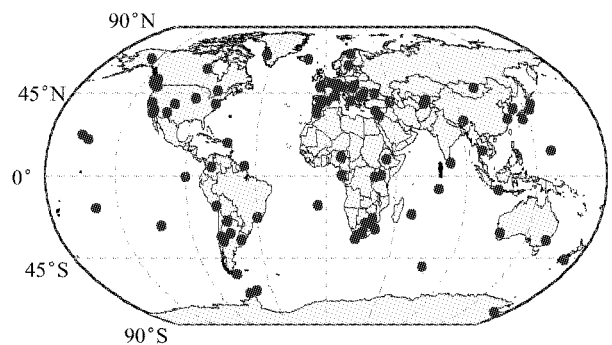


图 1 实验数据来源

Fig.1 Source of the experimental data

观测数据为 2016 年 6 月 30 日起连续 7 d、历元间隔 30 s 的 GPS 数据. 用以模拟用户站进行 PPP-AR 解算的 4 个 IGS 站分别位于日本鹿儿岛县 (GMSD)、美国夏威夷 (KOKB)、德国波茨坦 (POTS) 和法兰克福 (FFMJ).

在用户端 PPP-AR 的模拟试验中, 为了统计全天的整体定位效果, 观测数据每隔 10 min 进行 1 次模拟重启解算, 每次解算使用 1 h 的观测数据并最终得到一个浮点解或固定解. 实验中在每个历元尝试固定高度角高于 10° 的所有卫星的模糊度, 使用模

糊度检核系数(ratio)大于 3 作为模糊度是否固定的检核标准. 若 1 h 内无法通过 ratio 检验,则认为固定失败,固定失败率 f_{un} 定义为

$$f_{un} = \frac{n_f}{n_a}$$

式中: n_f 表示可以固定解的数量; n_a 表示全部解的数量. 将首次固定历元的固定坐标解和已知精确坐标进行对比,若平面误差大于 0.1 m 或高程误差大于 0.2 m,则认为模糊度固定错误,固定错误率 f_{wr} 定义为^[15]

$$f_{wr} = \frac{n_{wr}}{n_f}$$

式中: n_{wr} 表示错误固定解的数量. 另外,首次固定所需观测时间(TTFF)也是衡量模糊度固定效率的重要指标,本文仅对“正确固定”的模糊度统计其 TTFF. 平均 TTFF 将与前 2 项指标一起用以综合评价 UPD 产品的时间可用性.

3 窄巷 UPD 的周变化

为了直观地观察窄巷 UPD 随时间的变化范围,利用软件解算了 2016 年 6 月 30 日起 7 d 的全球参考站网非差窄巷 UPD 产品,其中 2 组卫星对的单差 UPD 见图 2,历元间隔为 30 s,DOY 表示年积日.

图中 UPD 进行单差处理是为了避免因基准变换发生跳变而对分析 UPD 稳定性造成影响. 可以发现:① UPD 在每天零时发生明显跳变后又快速稳定于某值,这展现了滤波重启后的收敛过程,收敛后的单日变化量最大值出现在 G27~G11 单差 UPD 的第 3 d,如图 2 标出所示,达到了 0.6 周. ② UPD 每天随时间变化的趋势类似. 这说明 UPD 内包含以天为单位规律性变化的系统误差,即式(5)中的 ϵ 项,其主要成分可能为未被恰当模型化的对流层延迟残差^[16]. ③ UPD 在跨天的时刻发生明显的阶跃. 究其原因,其一可能是 UPD 参数受到其吸收的时变系统性误差的影响而变化,在 UPD 解算时使用的单日序贯弧段滤波可能会造成零点时的结果不统一;其二可能是继承于 IGS 钟差的每日间阶跃,G25 与 G26 卫星 7 d 内的 IGS 钟差如图 3 所示. 为了表达简洁,图示钟差已沿纵坐标平移以消除零阶大值,同时已减去一阶趋势项.

图 3 所示钟差跨天时刻阶跃(也有文献称作天跳变)在纳秒量级. 虽然初始相位偏差在不关机的情况下不会变化,但伪距硬件延迟具有随时间变化的特性. 而 IGS 的星历与钟差是以天为单位弧段进行

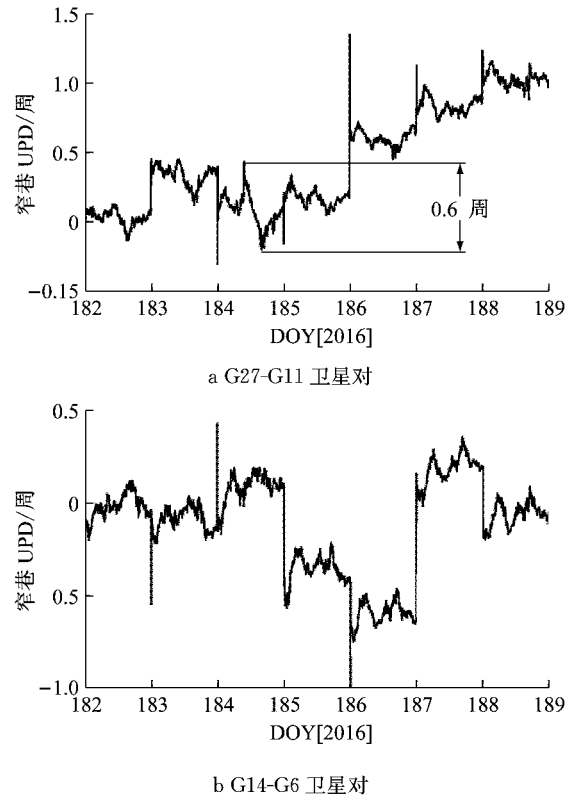


图 2 2 组卫星对的一周单差窄巷 UPD

Fig. 2 Single-differenced NL-UPD of two pairs of satellites in a week

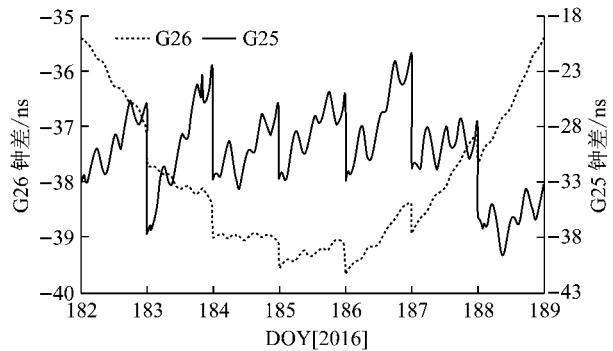


图 3 2 颗卫星的一周钟差

Fig. 3 Clock error of 2 satellites in a week

滤波解算的^[17],滤波在每日零时重置便会造成与前一天结果的不统一. PPP 浮点模糊度吸收了钟差中的伪距硬件延迟部分,故 UPD 也随之发生阶跃. 该阶跃的存在使得使用 IGS 钟差和 UPD 产品的用户必须在 GPS 时间每日零点重置 PPP 滤波,否则将造成模糊度参数有偏.

UPD 参数是由式(4)通过最小二乘解得的,自身也是随机量,其参数精度与所用到参考站的数量和观测值质量有关. 在认为 UPD 参数无偏的前提下,中误差反映了 UPD 的解算质量. 2016 年 6 月 30 日全天所有卫星非差 UPD 的中误差均值如图 4.

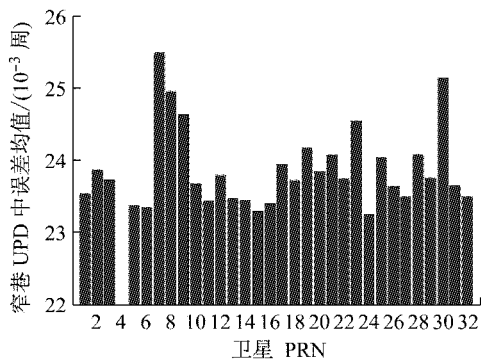


图 4 非差 UPD 的中误差均值

Fig.4 Mean standard deviation of zero-differenced UPD

图中 G4 卫星结果缺失是由于其 IGS 精密轨道未提供,其余所有卫星窄巷 UPD 平均中误差数值接近,均在 0.023 至 0.026 周之间,反映了全球参考站网解算窄巷 UPD 的精度水平一致且较高。

4 UPD 产品在用户端的使用误差

PPP 用户模糊度能否固定不只与 UPD 产品质量有关,用户端浮点模糊度的解算质量也是影响其固定的重要因素。

实际上,由于 UPD 产品受到的残余系统误差与用户端浮点模糊度受到的误差不一致,导致经 UPD 改正后的用户端模糊度依然可能存在系统性偏差。本节通过 UPD 产品在用户端的使用误差进一步分析时变残余误差对模糊度固定的影响。若将用户端浮点非差窄巷模糊度写为 N_i^k ,则 UPD 改正后的单差窄巷模糊度为

$$N_{i,corr}^{k_s} = N_i^{k_s} - (b^k - b^s) \quad (9)$$

由于 UPD 产品是参数的最小二乘估值,与真实值存在偏差,式(9)中的 b^k 实际上应当以估值 \hat{b}^k 表示,如下:

$$\hat{b}^k = \check{b}^k + \epsilon_b^k \quad (10)$$

式中: \check{b}^k 为 UPD 真值; ϵ_b^k 为 UPD 产品偏离真值的误差,包含系统性偏差和随机噪声,该误差的大小体现了 UPD 产品的质量。将式(10)代入式(9)可得

$$N_i^{k_s} - (\check{b}^k - \check{b}^s) - (\epsilon_b^k - \epsilon_b^s) = N_i^{k_s} - \check{b}^k + \epsilon_b^k \quad (11)$$

再将式(4)代入,式(11)改写为

$$\tilde{N}_i^{k_s} + \check{b}^k + \epsilon_b^k - \check{b}^s - \epsilon_b^s = \tilde{N}_i^{k_s} + \epsilon_b^k \quad (12)$$

式中: $\tilde{N}_i^{k_s}$ 为单差模糊度整周部分,UPD 改正后的模糊度小数部分即为 ϵ_b^k ,由用户端模糊度误差和 UPD 产品误差两部分组成。理想模型中 ϵ_b^k 应当为随机噪声,但实际情况并不符合理想模型。GMSD 和 POTS

两台接收机 2016 年 6 月 30 日所有单差模糊度经 UPD 改正后的残余小数部分如图 5。

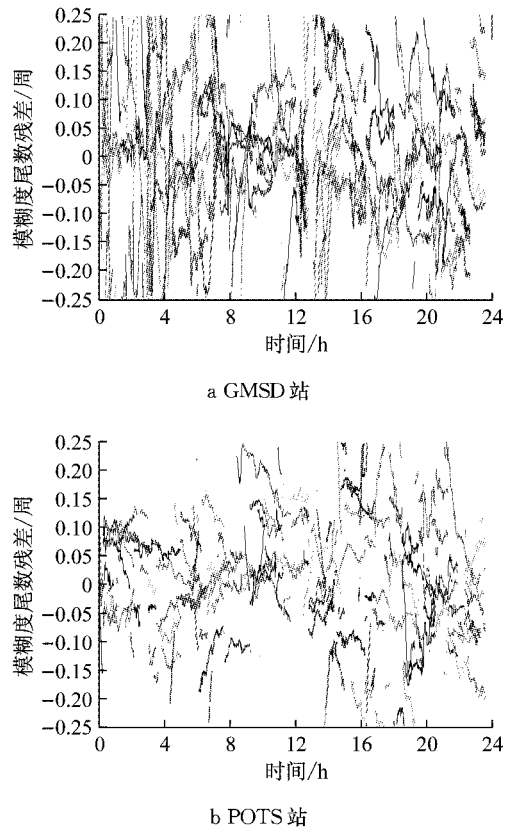


图 5 2 个 IGS 站经 UPD 改正后的模糊度小数残差
Fig.5 Ambiguity residuals of 2 IGS stations after corrected with UPD products

由图可见,对于每一条曲线所代表的单差模糊度而言,UPD 产品在用户站的误差并不是简单的随机噪声,其收敛后一段时间内的均值不为零且具有明显的时间相关性。该时间相关性是由模糊度小数残余量 ϵ_b^k 引起的,其主要成分可能是一些系统性的模型误差,例如由于未被恰当模型化导致的对流层延迟残余误差。可以推测 ϵ_b^k 中可能包含一个随时间变化的常数项和一个随机噪声项。对于参考站端,由于观测环境不同,不同参考站对于同一颗卫星的 UPD 误差并不一致,在解算卫星 UPD 时实际上是在最小二乘平差过程中得到了各参考站对于该卫星 UPD 参数的平差值。对于用户端,用户模糊度中包含的系统残余偏差也会使 UPD 改正数与用户模糊度小数部分不一致,导致改正后的模糊度参数有偏。随着卫星被观测的时间增长,随机噪声的影响逐渐减弱,改正后的单差模糊度虽然有偏但趋于稳定,直到通过 ratio 检验从而被固定。如果用户端模糊度误差与 UPD 产品中残余模型误差差距过大,模糊度将无法被固定。

5 窄巷 UPD 产品的时效性分析

研究 UPD 产品的使用时效问题可以为参考站产品播发和用户使用提供参考. 首先,为了了解不同

时间间隔内 UPD 的变化程度,对 UPD 产品在不同时间间隔内变化量的分布率进行了统计. 图 6 为逐历元统计一星期内所有卫星 UPD 不同间隔时间变化量的概率分布直方图,表 1 为统计结果. 可见无论时间间隔长短,UPD 变化量的均值都非常小,

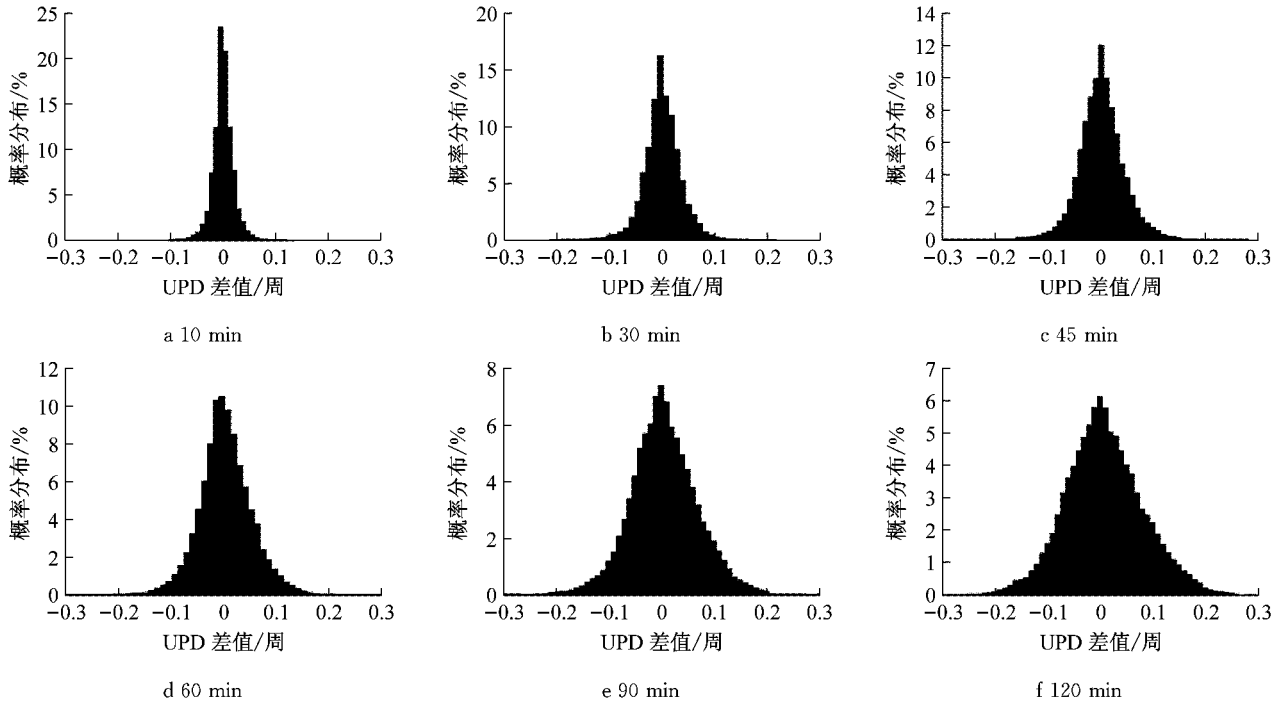


图 6 不同间隔时间窄巷 UPD 变化量概率分布

Fig.6 Probability distribution of NL UPD differences over different latency time

表 1 不同间隔时间窄巷 UPD 变化量统计结果

Tab.1 Statistical results of NL UPD differences over different latency time

延迟/min	均值/ 10^{-3}	标准差/ 10^{-3}	绝对值的均值/ 10^{-3}
10	0.6	24	15
30	1.8	43	28
45	2.9	53	36
60	3.7	62	42
90	5.8	72	52
120	7.3	80	61

在 10^{-3} 量级. 不同时间间隔的 UPD 变化量概率分布直观上符合正态分布特征,在零附近出现峰值并随着差值绝对值的增大概率逐渐减小. 即使间隔时间达到 120 min,变化量也基本不超过 ± 0.3 周. 随着间隔时间的增长,变化量标准差和绝对值均值均随之增长. 间隔为 10 min 时,标准差为 0.025 周,平均差值绝对值为 0.015 周;间隔时间为 60min 时,该 2 项数据分别为 0.062 和 0.042 周;而当间隔时间达到 120 min 时,2 项数据分别达到 0.080 和 0.061 周. 这说明如果使用过早前的 UPD 产品,会有多个 UPD 改正数信息与其对应模糊度的小数部分存在较大差距,将造成模糊度参数存在系统性偏差,可能

导致模糊度固定失败.

为了更为深入地探究 UPD 产品延迟时间与用户模糊度固定质量的关系,需要以真实观测数据解算结果验证 UPD 延迟时间的影响,即以模糊度固定效果来确定 UPD 产品的可用性时效. 实验利用 4 个 IGS 站的实测数据以不同 UPD 延迟时间进行静态 PPP-AR 解算. 4 个模拟用户站的分布、模糊度固定评价指标及实验方法参照第 2 节所述. 通过处理连续 7 d 的观测数据获得解算结果,4 个用户站平均固定失败率 f_m 和平均固定错误率 f_{wr} 如图 7,正确固定的平均 TTFF 如图 8.

该实验中,随着 UPD 延时从零增加至 120 min,除 GMSD 站外的 3 个测站平均 TTFF 均略微增加,增加幅度约 5 个历元. 各站的平均 TTFF 水平存在差异,这与测站所处地理位置和观测环境有关. 除此以外,120 min 延迟的平均 f_m 相比于零延迟有明显增加趋势,增幅达到 12%~18%,同时平均 f_{wr} 增加 3%~8%,可见 UPD 产品若不及时更新,用户的模糊度固定效率将随着 UPD 的时延增加而降低. 从时效性的角度来看,当使用 30min 前的 UPD 产品时,

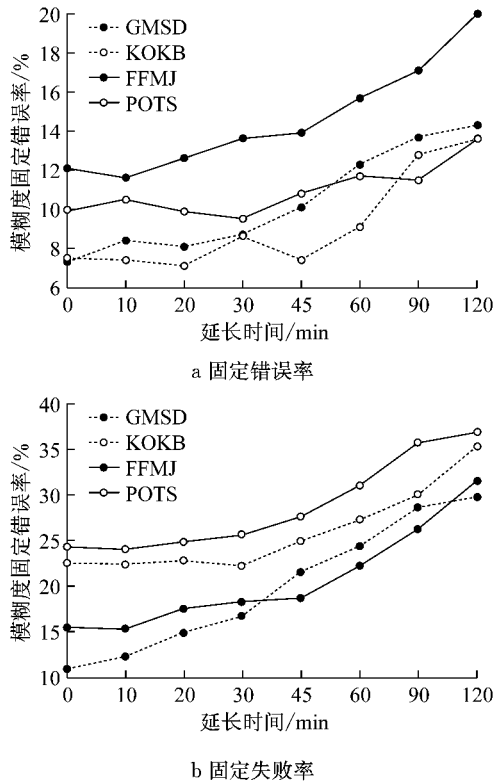


图 7 4 个 IGS 站不同时间延迟 PPP-AR 实验统计结果

Fig. 7 Statistical results of PPP-AR of the 4 IGS stations with different latency time

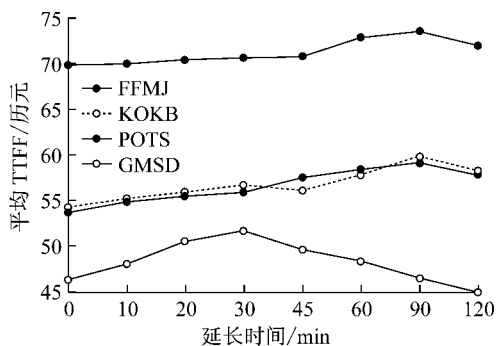


图 8 4 个 IGS 站不同时间延迟的平均 TTFF

Fig. 8 Average TTFF of the 4 IGS stations with different latency time

相对于零延迟产品仅有 GMSD 站 f_{un} 增加了约 5%，其余 3 站均在 1%~3% 之间，而 f_{wr} 增加约 1%~2%；而当延迟时间为 45 min 时，GMSD 站 f_{un} 相比于零延迟增幅达到 11%，POTS 和 KOKB 站的 f_{un} 也均有较大幅度上升并呈现快速增长趋势，同时各站 f_{wr} 也有最大达到 3% 的增加。较为特殊的是 FFMJ 站，当延迟时间为 60 min 后， f_{un} 才可被发现快速增加。另外需要指出的是，本实验中每个历元在模糊度固定时均使用固定延迟时间之前的 UPD，即体现的是播发间隔时间内的最后一个观测历元的产品使用效率。实际播发产品时，用户端 UPD 延迟时

间随着观测时间的推移由零增长至规定的延迟上限后便可接收到下一批次 UPD 产品，故实际使用效果应当优于本实验算例。综合以上分析结果，兼顾数据传输与 UPD 产品的可靠性，建议的全球参考站网窄巷 UPD 产品有效时限即产品播发最长间隔时间为 30 min。

6 结 语

利用全球 108 个 IGS 测站连续 7 d 的观测数据，生成了相应的全球参考站网宽巷与窄巷 UPD 产品，分析了窄巷 UPD 产品的变化范围，发现窄巷 UPD 单天最大变化量可以达到 0.6 周。之后由用户端经 UPD 改正后的模糊度残差说明了用户模糊度固定受到未模型化残余模型误差的影响。在 PPP-AR 解算实验部分，利用 4 个 IGS 站进行了不同延迟状态下 UPD 产品的可用性时效实验，采用模糊度固定失败率、模糊度错误固定率和首次固定时间作为指标评估固定效果。实验结果表明，UPD 产品若不及时更新，用户的模糊度固定效率将随着时间的增长越来越低。如果延迟达到 2 h，4 个实验站模糊度固定失败率将达到 28%~36%，而固定错误率也达到 13%~20%。通过比较 7 种不同延迟的 UPD 产品使用效率的实验结果，推荐全球参考站网窄巷 UPD 产品有效时限不大于 30 min。

参考文献:

- [1] ROCKEN C, JOHNSON J, HOVE T V, *et al.* Atmospheric water vapor and geoid measurements in the open ocean with GPS[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(12):12813.
- [2] CALAIS E, HAN J Y, DEMETS C, *et al.* Deformation of the North American plate interior from a decade of continuous GPS measurements[J]. 2006, 111(B6):6402.
- [3] LI X, GE M, ZHANG Y, *et al.* Real-time coseismic displacements from tightly-integrated processing of high-rate GNSS and strong motion data[C]// *European Geosciences Union General Assembly 2013*. Vienna: [s. n.], 15:8302-1.
- [4] KAO S P, CHEN Y C, NING F S. A MARS-based method for estimating regional 2-D ionospheric VTEC and receiver differential code bias[J]. *Advances in Space Research*, 2014, 53(2):190.
- [5] COLLINS P, LAHAYE F, HEROUX P, *et al.* Precise point positioning with ambiguity resolution using the decoupled clock model[C]// *Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*. Savannah: [s. n.], 2008:1315-1322.
- [6] LAURICHESSE D, MERCIER F, BERTHIAS J P, *et al.* Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase

- measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination[J]. *Navigation*, 2009, 56(2):135.
- [7] 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.
- [8] SHI J, GAO Y. A comparison of three PPP integer ambiguity resolution methods[J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(4):519.
- [9] LI X, ZHANG X. Improving the estimation of uncalibrated fractional phase offsets for PPP ambiguity resolution [J]. *Journal of Navigation*, 2012, 65(3): 513.
- [10] LI P, ZHANG X, GUO F. Ambiguity resolved precise point positioning with GPS and BeiDou [J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(1): 25.
- [11] 张小红, 李盼, 李星星, 等. 宽巷载波相位模糊度小数偏差时变特性分析[J]. *测绘学报*, 2013, 42(6):798.
ZHANG Xiaohong, LI Pan, LI Xingxing, *et al.* An analysis of time-varying property of widelane carrier phase ambiguity fractional bias[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(6):798.
- [12] GENG J, MENG X, DODSON A H, *et al.* Integer ambiguity resolution in precise point positioning: Method comparison[J]. *Journal of Geodesy*, 2010, 84(9):569.
- [13] LI X, GE M, ZHANG H, *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.
- [14] LI Y, GAO Y, SHI J. Improved PPP ambiguity resolution by COES FCB estimation [J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(5):437.
- [15] LI B, SHEN Y, FENG Y, *et al.* GNSS ambiguity resolution with controllable failure rate for long baseline network RTK [J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(2):99.
- [16] ZHANG Z, LI B, SHEN Y. Comparison and analysis of unmodelled errors in GPS and BeiDou signals[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2016, 8(1):41.
- [17] 郭向欣, 李敏. IGS精密钟差天跳变影响及消除方法研究 [C]//2014年第五届中国卫星导航学术年会电子论文集. 南京:[s.n.], 2014:133-137.
GUO Xiangxin, LI Min. Research of IGS precise clock offset day boundary effects and eliminating methods [C]// China Satellite Navigation Conference 2014 Proceedings. Nanjing:[s.n.], 2014:133-137.

~~~~~

(上接第 534 页)

- [4] HAMMORI M, HERBST J, KLEINER N. Interactive workflow mining-requirements, concepts and implementation[J]. *Data & Knowledge Engineering*, 2006, 56(1): 41.
- [5] AALST W V D, WEIJTERS T, MARUSTER L. Workflow mining: Discovering process models from event logs[J]. *IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering*, 2004, 16(9): 1128.
- [6] MEDEIROS A K A D, Dongen B F V, AALST W M P V D, *et al.* Process mining for ubiquitous mobile systems: An overview and a concrete algorithm [C]// International Workshop on Ubiquitous Mobile Information and Collaboration Systems. [S.l.]: Springer, 2004: 151-165.
- [7] WEN L, AALST W M P V D, WANG J, *et al.* Mining process models with non-free-choice constructs [J]. *Data Mining & Knowledge Discovery*, 2007, 15(2):145.
- [8] WEN L, WANG J, SUN J. Mining invisible tasks from event logs[C]// Joint, asia-pacific web and international conference on web-age information management conference on advances in data and web management. [S. l.]: Springer-Verlag, 2007: 358-365.
- [9] 李嘉菲, 刘大有, 杨博. 过程挖掘中一种能发现重复任务的扩展  $\alpha$  算法[J]. *计算机学报*, 2007, 30(8):1436.  
LI Jiafei, LIU Dayou, YANG Bo. Process mining: An extended  $\alpha$ -algorithm to discovery duplicate tasks[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2007, 30(8):1436.
- [10] WEN L, WANG J, AALST W M P V D, *et al.* A novel approach for process mining based on event types[J]. *Journal of Intelligent Information Systems*, 2009, 32(2):163.
- [11] QUAGLINI S, STEFANELLI M, LANZOLA G, *et al.* Flexible guideline-based patient careflow systems [J]. *Artificial Intelligence in Medicine*, 2001, 22(1):65.
- [12] GRANDO M A, GLASSPOOL D W, FOX J. Petri nets as a formalism for comparing expressiveness of workflow-based clinical guideline languages[C]// International Conference on Business Process Management. [S. l.]: Springer, 2008: 348-360.
- [13] 赵艳丽, 江志斌, 李娜. 基于分层赋时着色 Petri 网的临床路径建模[J]. *上海交通大学学报*, 2010(2):252.  
ZHAO Yanli, JIANG Zhibing, LI Na. Modeling of clinical pathway based on hierarchical timed colored Petri net [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2010(2):252.
- [14] 田燕, 马晓普, 张新刚, 等. 基于 Petri 网的临床路径评估与优化[J]. *计算机科学*, 2013, 40(5):193.  
TIAN Yan, MA Xiaopu, ZHANG Xingang, *et al.* Evaluation and optimization of clinical pathway based on Petri net [J]. *Computer Science*, 2013, 40(5):193.
- [15] WEERAPONG S, POROUHAN P, PREMCHAIWADI W. Process mining using  $\alpha$ -algorithm as a tool: A case study of student registration[C]//2012 10th International Conference on ICT and Knowledge Engineering. Bangkok: IEEE, 2012: 213-220.
- [16] AALST W M P V D, DONGEN B F V, HERBST J, *et al.* Workflow mining: A survey of issues and approaches[J]. *Data & Knowledge Engineering*, 2003, 47(2):237.