

GPS/BDS 精密高频卫星钟差计算及应用

张益泽^{1,2} 陈俊平^{2,3} 王解先¹ 吴斌^{2,3}

(¹ 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092)

(² 中国科学院上海天文台, 上海 200030)

(³ 上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海 200030)

摘要: 为了获得高采样率的 GPS/BDS 卫星钟差, 对基于相位历元间差分的精密钟差加密方法进行了改进, 并利用 IGS MGEX 观测站数据和 GFZ 提供的 5 min 采样率卫星钟差生成 30 s 采样率的 GPS/BDS 卫星钟差. 分析结果表明: 与 GFZ 提供的 30 s 采样率的精密钟差相比, 二者差异在 10 ps 以内, 且测站数量对钟差结果的影响不大; 加密得到的 30 s 钟差与 5 min 钟差的 Allan 方差保持高度一致; 移动历元动态 PPP 证实加密钟差并未损失原始钟差的精度. 动态 PPP 统计结果表明加密后的钟差大大缩短了 PPP 收敛时间, 并提高了定位精度. 该方法计算效率高, 可应用于更高采样率的卫星钟差估计中.

关键词: 历元间差分; 相对钟差; Allan 方差; 动态精密单点定位

中图分类号: P228.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2017)04-0673-06

Generation and application of GPS/BDS precise high rate satellite clock

Zhang Yize^{1,2} Chen Junping^{2,3} Wang Jiexian¹ Wu Bin^{2,3}

(¹ College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(² Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

(³ Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030, China)

Abstract: To derive high frequency GPS/BDS (global positioning system/Beidou system) satellite clock, an improved algorithm of epoch-differenced GPS/BDS satellite clock densification is proposed. GNSS (global navigation satellite system) data of the IGS (International GNSS Service) MGEX (multi GNSS experiment) tracking network and the GFZ GPS/BDS satellite clocks at 5 min sampling are densified to 30 s for the algorithm evaluation. Analysis results show that, compared with the 30 s clocks provided by GFZ, the satellite clock differences are below 10 ps. The number of stations has neglectable impacts on the precision of the densified clocks. The Allan deviation of 30 s clocks is consistent with that of 5 min. Kinematic PPP (precise point positioning) with shifted epochs demonstrates that the densified clock does not lose accuracy. Kinematic PPP using densified 30 s and original 5 min clocks shows that PPP convergence time is reduced and positioning accuracy is greatly improved using the densified clocks. The computation efficiency of the algorithm is high, so it can be applied in the estimation of higher frequency satellite clocks.

Key words: epoch difference; relative clock; Allan deviation; kinematic precise point positioning

精密单点定位由于其不需要参考站, 不受时间、地点、天气影响, 已经在许多方面得到了广泛的应用^[1]. 高精度卫星轨道和钟差对于动态精密定

位, 尤其是低轨卫星定轨等具有重要作用^[2]. 文献^[3]表明对采样率为 15 min 的精密轨道进行内插, 其精度损失在毫米级, 但卫星钟差的线性内插产生

收稿日期: 2017-01-10. 作者简介: 张益泽(1990—)男, 博士生; 陈俊平(联系人)男, 博士, 研究员, 博士生导师, junping@shao.ac.cn.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2014AA123102)、国家自然科学基金资助项目(11673050, 11273046).

引用本文: 张益泽, 陈俊平, 王解先, 等. GPS/BDS 精密高频卫星钟差计算及应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(4): 673-678.

DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2017.04.008.

的误差则不可忽略^[4-5]. 因此对于精密定轨定位, 必须获得高采样率的精密卫星钟差. 目前获取高采样率卫星钟差的方法主要有非差和历元间差分 2 种. 普通非差方法计算卫星钟差需耗费大量时间, 有些 IGS 分析中心在获得低采样率卫星钟差后, 采用固定其他参数的方式获得更高采样率的卫星钟差^[5], 但这种方法计算效率仍然较低. 基于此, 欧洲定轨中心(CODE)提出了一种更有效的卫星钟差加密算法^[6-7], 这种方法消除了相位模糊度, 计算效率大大提高. 国内一些文献也对这种方法进行了研究和探讨, 但仍仅限于 GPS 和 GLONASS^[8-9].

北斗系统自 2012 年正式提供服务以来, 已经成为 GNSS 系统的重要组成部分. 然而, 目前只有德国地学研究中心(GFZ)自 2015 年 5 月起提供 30 s 采样率的北斗卫星钟差, 其他分析中心如 CODE, 武汉大学只提供 5 min 采样率的北斗卫星钟差(<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/mgex/>), 这必然会限制北斗精密定位的应用, 因此有必要研究获取北斗高采样率卫星钟差的方法.

CODE 提出的钟差加密算法在处理中将所有历元的观测值形成一个整体法方程, 并通过特殊的矩阵算法对方程进行求解, 但这种算法增加了数据处理的复杂度. 本文以 CODE 提出的精密钟差加密算法为基础, 对其进行进一步优化, 获取了高采样率 GPS/BDS 精密卫星钟差, 并通过钟差比较及用户精密单点定位等方式对其精度进行了评估.

1 GNSS 卫星钟差加密算法

高精度卫星轨道和钟差的处理, 一般是利用全球分布的 GNSS 监测站数据. 目前应用最为广泛的高精度 GNSS 轨道和钟差产品由 IGS 提供, 其下分析中心包括 CODE, GFZ, WHU 等. 随着计算采用的卫星、测站个数的不断增加, 定轨时需要估计的参数数量也越来越大. 因此 IGS 各分析中心精密轨道和钟差的计算所采用的数据采样率通常为 5 ~ 15 min, 在此基础上获取的卫星钟差的采样率也相应较低, 为 5 ~ 15 min. 更高采样率的卫星钟差的获取主要有 2 种方法. 第 1 种方法是在获取低频钟差数据的基础上, 固定精密轨道、地球自转参数、测站坐标等参数, 采用精密单点定位的方法估计更高采样率的卫星钟差. 该方法仍然要估计大量的模糊度参数, 随着监测站和卫星数目的增加, 需要估计的参数仍然较多, 因此效率不高. 第 2 种方法是在获取低频钟差数据的基础上, 通过相位观测值历元间差分的方式获取卫星钟差在历元间

的变化, 并通过在低频采样点上增加钟差约束的方式计算绝对钟差. 该方法消除了模糊度参数, 效率大大提高. 利用相位历元间差分的方法进行钟差加密最早由 CODE 提出, 该方法主要分为 3 步: ① 采用低频数据, 进行常规精密轨道和钟差解算, 获取低频钟差参数; ② 估计高频历元间钟差的变化; ③ 高频精密钟差的综合. CODE 的钟差加密算法在历元间钟差综合时数据处理较为复杂, 本文对该算法进行了改进, 并将其应用于 GPS/BDS 卫星钟差加密.

1.1 历元间钟差计算模型

对于 GPS/BDS 无电离层组合相位观测值, 有

$$\left. \begin{aligned} L_k^G(t_i) &= \rho_k^G(t_i) + c\delta_k(t_i) - c\delta^G(t_i) + \\ &\quad \delta_{\text{trop}}^G(t_i) + \lambda_G N_k^G(t_i) + \varepsilon_k^G(t_i) \\ L_k^C(t_i) &= \rho_k^C(t_i) + c\delta_k(t_i) + c\delta_{\text{JSB}}^C(t_i) - \\ &\quad c\delta^C(t_i) + \delta_{\text{trop}}^C(t_i) + \lambda_C N_k^C(t_i) + \varepsilon_k^C(t_i) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, 上标 G, C 分别表示 GPS 和 BDS 系统; L_k 为无电离层组合相位观测值; ρ_k 为卫星到接收机的几何距离; δ_k 为接收机钟差; δ^G, δ^C 分别为 GPS 和 BDS 卫星钟差; δ_{JSB}^C 为 GPS 和 BDS 包含硬件延迟差在内的系统时间偏差; δ_{trop} 为对流层延迟误差; N_k 为相位观测值模糊度; λ 为相位无电离层组合波长; ε_k 为包含固体潮、海潮、PCO、PCV、相位缠绕及观测值噪声在内的其他误差; c 为光速.

若相邻历元 i 和 $i+1$ 之间没有发生周跳, 则模糊度和系统时间差可通过历元间差分消除. 历元间差分观测值可表示为

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_k^G(t_{i+1}, i) &= \Delta \rho_k^G(t_{i+1}, i) + c\Delta \delta_k(t_{i+1}, i) - \\ &\quad c\Delta \delta^G(t_{i+1}, i) + \Delta \delta_{\text{Trop}}^G(t_{i+1}, i) + \Delta \varepsilon_k^G(t_{i+1}, i) \\ \Delta L_k^C(t_{i+1}, i) &= \Delta \rho_k^C(t_{i+1}, i) + c\Delta \delta_k(t_{i+1}, i) - \\ &\quad c\Delta \delta^C(t_{i+1}, i) + \Delta \delta_{\text{Trop}}^C(t_{i+1}, i) + \Delta \varepsilon_k^C(t_{i+1}, i) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 Δ 表示历元间差分算子. 对于卫星钟差加密, 式中的测站坐标、卫星坐标、对流层误差可在常规精密卫星轨道和钟差解算中事先精密求解. 因此式中的几何距离项和对流层项无需作为参数估计, 式(2)可重写为

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_k^G(t_{i+1}, i) &= c\Delta \delta_k(t_{i+1}, i) - c\Delta \delta^G(t_{i+1}, i) + \varepsilon_k^G(t_{i+1}, i) \\ \Delta L_k^C(t_{i+1}, i) &= c\Delta \delta_k(t_{i+1}, i) - c\Delta \delta^C(t_{i+1}, i) + \varepsilon_k^C(t_{i+1}, i) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中需要估计的参数只有历元间卫星和接收机钟差之差. 参数个数的减少将大大减小法方程的大小, 并缩短数据处理的计算时间.

由于卫星和测站钟差线性相关,式(3)组成的法方程矩阵存在秩亏.通常的处理方法为引入基准参考钟,参考钟一般选择氢原子钟.在计算过程中,若选定的参考钟消失或发生跳变,可切换至另一参考钟.

此外,由历元间差分的法方程中可获得历元间差分的方差 $\Delta\delta(t_{i+1,j})$,其可用于后续的高频精密卫星钟差综合中.

1.2 高频精密钟差综合计算

通过 1.1 节可得到各卫星历元间钟差之差 $\Delta\delta(t_{i+1,j})$,为了获得绝对钟差,还需参考历元的绝对钟差.在常规精密轨道和钟差解算数据处理中,能够获取采样率为 5~15 min 的低频钟差,其精度可达到 75 ps(www.igs.org/products),因此可将低频钟差作为约束条件.CODE 的方法是将所有历元的历元间钟差和 5 min 的绝对钟差形成一个整体的法方程,但这种方法大大增加了法方程的大小,影响计算效率,因此本文对这种方法进行进一步优化.假定历元间卫星钟差之差的采样率为 30 s,对于某一颗卫星,有如下误差方程:

$$\left. \begin{aligned} -\delta(t_1) + \delta(t_2) &= \Delta\delta(t_{2,1}) \\ -\delta(t_2) + \delta(t_3) &= \Delta\delta(t_{3,2}) \\ &\vdots \\ -\delta(t_{11}) + \delta(t_{10}) &= \Delta\delta(t_{11,10}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

引入采样率为 5 min 的卫星绝对钟差 δ_{fix} 作为约束条件,有

$$\left. \begin{aligned} \delta(t_1) &= \delta_{\text{fix}}(t_1) \\ \delta(t_{11}) &= \delta_{\text{fix}}(t_{11}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

忽略两历元间钟差之差的相关性,式(4)的随机模型可表示为

$$\varepsilon(t_{i+1,j}) = \frac{\sigma^2(t_{i+1,j})}{\sigma_0^2} \quad (6)$$

式中 $\sigma^2(t_{i+1,j})$ 为历元间差分的方差.综合式(4)和(5),各历元的绝对钟差可通过下式计算:

$$\delta(t_{i+1}) = \delta(t_i) + \Delta\delta(t_{i+1,j}) + \varepsilon(t_{i+1,j}) \quad d\delta \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, 10$$

式中, $d\delta = \left(\delta_{\text{fix}}(t_{11}) - \delta_{\text{fix}}(t_1) - \sum_{j=1}^{10} \Delta\delta(t_{j+1,j}) \right) / \sum_{j=1}^{10} \varepsilon(t_{j+1,j})$.

与常规精密轨道和钟差解算采用的数据采样率相同,对于每颗卫星每隔 5~15 min 可建立以上解算方程.在此基础上可得到采样率更高的绝对卫星钟差.

2 数据试验及结果评估

基于上述方法,开发了卫星钟差加密软件 SHA_HRSCD (high rate satellite clock densification).为了获得 GPS/BDS 的 30 s 采样率卫星钟差,采用 2016 年年积日 001~009 的 MGEX 数据,选取 47 个全球均匀分布的 MGEX 监测站数据(见图 1,其中圆形点位 25 个,方形点位 10 个,三角形点位 12 个),这些测站大部分都能接收 GPS 及 BDS 数据.目前 IGS 官方网站上只有 GFZ 分析中心提供的采样率为 30 s 的 BDS 卫星钟差,其钟差加密方法为第 1 节介绍的精密单点定位方法.为了进行比较验证,本文将 GFZ 提供的 30 s 采样率的 GPS/BDS 卫星钟差(称为 gbm)每隔 5 min 取一个钟差点,重新采样成 5 min,并利用第 1 节介绍的历元间差分方法将其加密到 30 s(称为 sha).

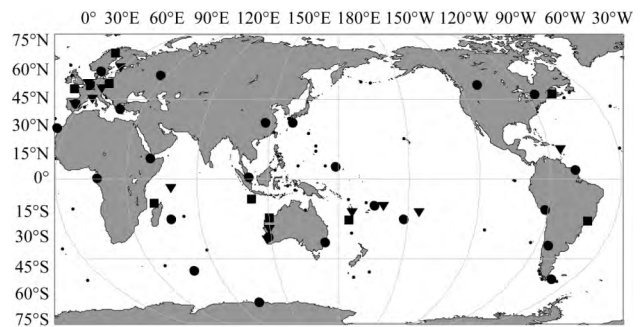


图 1 MGEX 监测站分布

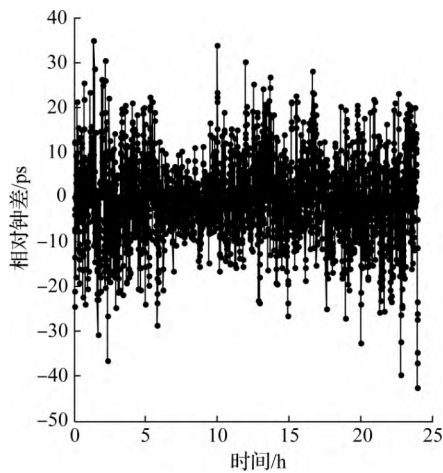
对于加密后的卫星钟差精度的比较验证,本文将从相对钟差、Allan 方差、移动历元动态 PPP 等方面进行评估.

2.1 相对钟差精度评估

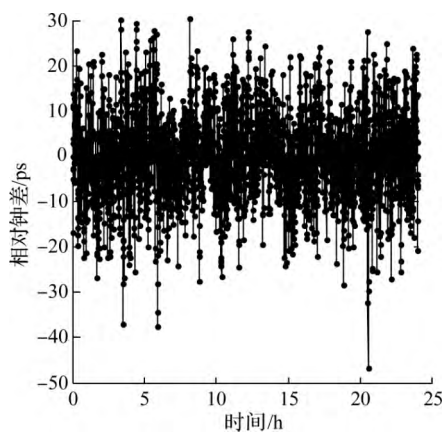
由于 5 min 采样率的卫星钟差来自于 gbm,可将加密后的钟差 δ_{sha}^j 与 gbm 的 30 s 卫星钟差 δ_{gbm}^j 进行比较,得到二者之间的差异,其相对钟差误差可定义为

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_{\text{sha}}^i - \delta_{\text{gbm}}^i)^2}{n}} \quad (8)$$

以 2016 年年积日 001 为例,图 2 给出了 G01 和 C01 卫星 24 h 相对钟差误差的变化情况,图 3 为所有 GPS 和 BDS 卫星相对钟差的 RMS 统计结果.由图 2 和图 3 可看出,GPS 的钟差差异为 8.4 ps,BDS 的略低于 GPS,为 9.7 ps,差异均在 10 ps 以内,等效距离误差都在 3 mm 以内.以上差异远小于 IGS 精密钟差标称 75 ps 的精度,因此该差异对用户精密定位几乎没有影响.

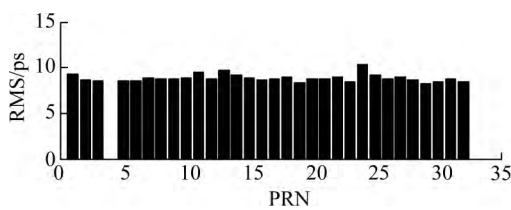


(a) G01

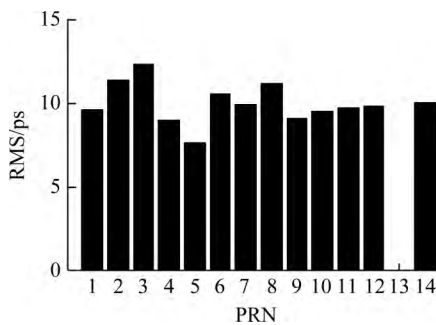


(b) C01

图 2 gbm 与 sha 的 30 s 卫星钟差差异



(a) GPS 相对钟差



(b) BDS 相对钟差

图 3 gbm 与 sha 所有卫星的 30 s 相对钟差 RMS 统计

将 MGEX 监测站分别减少至全球均匀分布的 35 个(图 1 中圆形 + 方形点位)和 25 个(图 1 中圆

形点位)站. 采用同样的方法对 5 min 采样率的 GPS + BDS 卫星钟差进行加密, 仍然与 gbm 的 30 s 精密卫星钟差进行比较, 结果见表 1. 从表中可看出, 随着监测站个数的减少, 加密后的钟差精度略微下降, 但仍然在 10 ps 左右. 这是因为卫星钟差估计与测站几何分布无关, 表明只要观测数据足够, 用少量的站就可以估计出高精度的卫星钟差.

表 1 监测站个数对钟差加密精度的影响 ps

| 监测站个数 | 47 | 35 | 25 |
|------------|-----|-----|------|
| GPS 钟差加密精度 | 8.4 | 8.8 | 9.9 |
| BDS 钟差加密精度 | 9.7 | 9.9 | 10.9 |

2.2 Allan 方差评估

Allan 方差是检验钟差稳定性的一种评价方法^[10-11]. 相似的 Allan 方差分布表明钟差具有相近的物理特性, 因此本节用 Allan 方差评估加密后的 30 s 卫星钟差的特性.

图 4 给出了 G20 (BLOCK IIR-A)、G31 (BLOCK IIR-M)、G06 (BLOCK IIF)、C04、C08 不同系统及不同类型卫星的钟差在 30 ~ 30 000 s 的 Allan 方差. 从图中可看出, 加密后的 30 s 采样率 sha 钟差与 30 s 采样率和 5 min 采样率 gbm 钟差的 Allan 方差变化趋势总体上保持一致, 这说明加密的钟差并未改变其噪声类型和稳定性. BLOCK IIF 类型卫星的钟差长稳和短稳特性表现最好, 北斗卫星短稳性能优于 BLOCK IIR-A 和 BLOCK IIR-M 类型卫星, 长稳性能则明显变差.

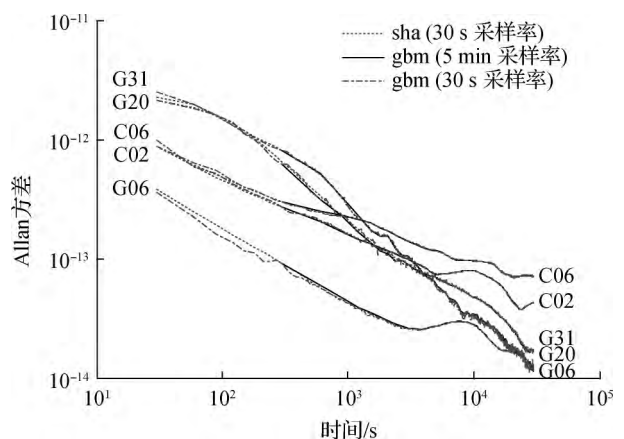


图 4 不同卫星的 Allan 方差

2.3 移动历元动态 PPP 计算

为进一步验证加密得到的卫星钟差的一致性, 采用移动历元单天动态 PPP 的方法进行验证. 具体做法为: GPS + BDS 单天动态定位中设定 PPP 定位的数据采样率为 5 min, 第 1 次处理数据的数据采样率为 5 min, 第 1 次处理数据的数据采样时刻内为整 5 min (即 0.5, 1.0 min, ...); 之后每

一次处理的数据采样时刻依次后推 30 s(如第 2 次为 0.5, 5.5, 10.5 min, …)。以上处理中,第 1 次采用的钟差为精密定轨获取的 5 min 采样率的精密钟差,之后每次处理采用的卫星钟差为加密后的对应 5 min 采样率的钟差。通过以上设置计算得到 10 种动态 PPP 的结果。将单天动态 PPP 1 h 后的定位结果与 IGS 给出的精密坐标相比,统计其差值的 RMS。图 5 给出了 6 个 MGEX 监测站 GPS + BDS 的 10 种动态定位结果,表 2 统计了每个站所有结果在南北、东西、高程 3 个方向的平均标准差、最大标准差、平均峰峰差及最大峰峰差。结合图 5 和表 2 可看出,移动历元动态 PPP 差异在毫米级范围,与相对钟差的量级保持一致,这表明加密后的卫星钟差与精密定轨获取的精密钟差精度一致。

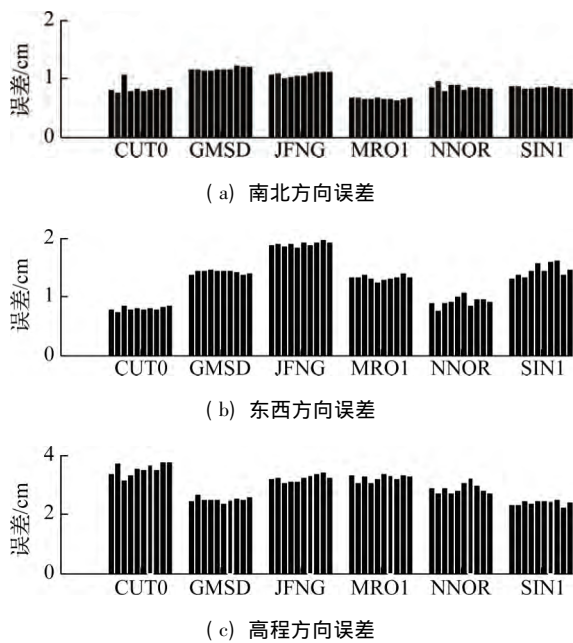


图 5 10 种 GPS + BDS 动态 PPP 结果比较

表 2 GPS + BDS 动态 PPP 差异统计 cm

| 方向 | 平均标准差 | 最大标准差 | 平均峰峰差 | 最大峰峰差 |
|----|-------|-------|-------|-------|
| 南北 | 0.04 | 0.08 | 0.13 | 0.30 |
| 东西 | 0.06 | 0.11 | 0.19 | 0.31 |
| 高程 | 0.13 | 0.21 | 0.40 | 0.61 |

3 高频 GPS/BDS 精密钟差应用

为验证加密后卫星钟差对用户精密定位的提升,将原始 5 min 和加密后的 30 s 采样率的卫星钟差应用于 GPS/BDS 静态和动态 PPP 中。定位采用 2016 年年积日 001 ~ 009 共 9 个 MGEX 站的数据,数据处理基于自主开发的软件 Net_PPP,其中采用的解算策略见表 3。

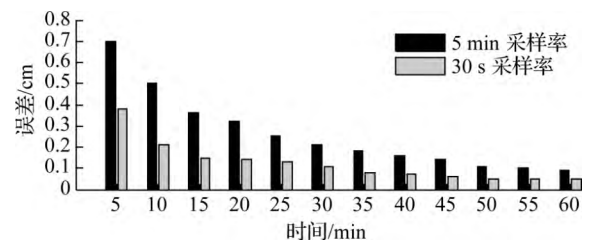
表 3 Net_PPP 解算策略

| 类别 | 参数 | 处理策略 |
|------|----------|---|
| 观测值 | 观测值组合及噪声 | PC + LC |
| | 先验约束 | 伪距 1 m 相位 0.01 m |
| | 截止高度角 | 10° |
| | 观测值权重 | 当 $e > 30^\circ$ $P = 1$; 当 $e < 30^\circ$ $P = 2 \sin e$ |
| 模型改正 | 固体潮、海潮改正 | 模型改正 |
| | 相位缠绕 | 模型改正 |
| | 天线相位改正 | GPS 采用 IGS 默认值, BDS 采用欧洲航空局发布值 |
| | 相对论、地球自转 | 模型改正 |
| | 卫星轨道 | gbm 精密轨道 |
| | 卫星钟差 | 5 min 或 30 s 精密钟差 |
| 参数估计 | 测站坐标 | 估计 先验约束 10 km |
| | 对流层延迟 | Saastamoine 模型 + 湿延迟参数估计 先验约束 0.1 m |
| | 接收机钟差 | 估计 先验约束 30 km |
| | 模糊度 | 估计 先验约束 20 m |
| | 系统差 | 估计 先验约束 10 km |

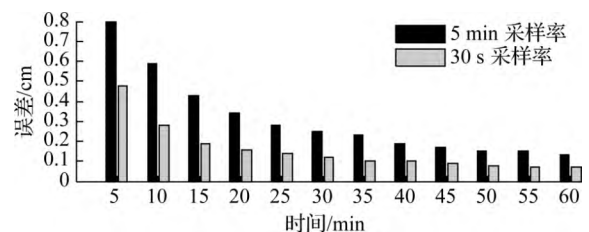
注: PC 为伪距无电离层组合; LC 为相位无电离层组合; P 为权重; e 为卫星高度角。

首先对定位收敛性进行分析。统计第 1 个小时内每隔 5 min 所有站 GPS + BDS PPP 的平均三维误差。结果见图 6。由图可知,相对于 5 min 采样率,30 s 采样率的卫星钟差无论对静态或者动态定位都能提高其收敛时间。对于静态 PPP,采用 30 s 的卫星钟差的 PPP 三维误差能在 30 min 内收敛至 0.1 m,而采用 5 min 的卫星钟差只能收敛至 0.2 m。对于动态定位,采用 30 s 的卫星钟差收敛至 0.2 m 需要 15 min,而采用 5 min 的卫星钟差则需要 40 min。

为比较不同系统的定位情况,采用加密前后的



(a) 静态 PPP



(b) 动态 PPP

图 6 5 min 和 30 s 采样率下的 GPS + BDS 静态和动态 PPP 三维平均收敛误差

GPS + BDS 卫星钟差,分别对 GPS ,BDS ,GPS + BDS 三种系统组合模式进行定位.对于静态 PPP,不同采样率的卫星钟差的 24 h 最终定位结果几乎没有区别.表 4 为 2 种采样率的卫星钟差在不同系统组合模式下所有站的动态 PPP 误差统计结果,由于收敛时间内的定位误差较大,因此只统计收敛(1 h)后的定位结果.由表 4 可发现,30 s 采样率的卫星钟差能明显提高动态定位精度,其中 GPS 提高程度最大,GPS + BDS 次之,BDS 最小.同时也可看出,双系统组合动态定位精度较单系统有明显改善.

表 4 动态 PPP 在不同方向上的误差统计 cm

| 系统 | 5 min 采样率钟差 | | | 30 s 采样率钟差 | | |
|-----------|-------------|-----|------|------------|-----|-----|
| | 南北 | 东西 | 高程 | 南北 | 东西 | 高程 |
| GPS | 3.7 | 5.5 | 12.4 | 1.2 | 2.6 | 4.9 |
| BDS | 4.1 | 3.3 | 10.3 | 2.5 | 2.2 | 8.4 |
| GPS + BDS | 1.9 | 2.6 | 6.0 | 1.0 | 1.5 | 3.5 |

4 结论

1) 所提加密算法可获取高采样率、高精度的卫星钟差.加密后的卫星钟差精度在 10 ps 以内,Allan 方差与原始 5 min 的卫星钟差保持一致,不同历元的钟差对用户动态定位的影响在毫米级.

2) 与采用原始钟差相比,采用加密后的卫星钟差可以提高 PPP 的收敛时间和动态 PPP 的定位精度.

3) 与传统非差方法比较,本算法计算简单,占用计算机内存少,计算效率高.随着 GNSS 系统和监测站数量的增加,采用传统非差方式估计高采样率卫星钟差将越来越耗时.本文研究也表明监测站的数量对钟差加密精度的影响很小,因此可利用该算法高效地获取多系统、高采样率的精密卫星钟差.

参考文献 (References)

- [1] Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, **102**(3): 5005-5017. DOI: 10.1029/96jb03860.
- [2] Zhu S, Reigber C, König R. Integrated adjustment of CHAMP, GRACE, and GPS data [J]. *Journal of Geodesy*, 2004, **78**(1): 103-108. DOI: 10.1007/s00190-004-0379-0.
- [3] 张守建,李建成,邢乐林,等.两种 IGS 精密星历插值方法的比较分析 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2007, **27**(2): 80-83. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5942.2007.02.015. Zhang Shoujian, Li Jiancheng, Xing Lelin, et al. Comparative analysis on two methods for IGS precise ephemeris interpolation [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007, **27**(2): 80-83. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5942.2007.02.015. (in Chinese)
- [4] 洪樱,欧吉坤,彭碧波. GPS 卫星精密星历和钟差三种内插方法的比较 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2006, **31**(6): 516-518, 556. DOI: 10.3321/j.issn:1671-8860.2006.06.012. Hong Ying, Ou Jikun, Peng Bibo. Three interpolation methods for precise ephemeris and clock offset of GPS satellite [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, **31**(6): 516-518, 556. DOI: 10.3321/j.issn:1671-8860.2006.06.012. (in Chinese)
- [5] 韩保民.精密卫星钟差加密方法及其对星载 GPS 低轨卫星定轨精度影响 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2006, **31**(12): 1075-1078. DOI: 10.3321/j.issn:1671-8860.2006.12.010. Han Baomin. Densification methods of GPS satellite clock errors and their impact on orbit determination precision of LEOs [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, **31**(12): 1075-1078. DOI: 10.3321/j.issn:1671-8860.2006.12.010. (in Chinese)
- [6] Bock H, Dach R, Jäggi A, et al. High-rate GPS clock corrections from CODE: Support of 1 Hz applications [J]. *Journal of Geodesy*, 2009, **83**(11): 1083-1094. DOI: 10.1007/s00190-009-0326-1.
- [7] Dach R, Brockmann E, Schaer S, et al. GNSS processing at CODE: Status report [J]. *Journal of Geodesy*, 2009, **83**(3): 353-365. DOI: 10.1007/s00190-008-0281-2.
- [8] Chen J, Zhang Y, Zhou X, et al. GNSS clock corrections densification at SHAO: From 5 min to 30 s [J]. *Science China: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2013, **57**(1): 166-175. DOI: 10.1007/s11433-013-5181-7.
- [9] 马卓希,杨力,贾小林,等.基于历元间差分的精密钟差加密算法研究 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2016, **36**(5): 415-418. Ma Zhuoxi, Yang Li, Jia Xiaolin, et al. Research on precise clock correction densification based on epoch differential model [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, **36**(5): 415-418. (in Chinese)
- [10] Allan D W. Time and frequency (time-domain) characterization, estimation, and prediction of precision clocks and oscillators [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 1987, **34**(6): 647-654. DOI: 10.1109/t-uffc.1987.26997.
- [11] 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. DOI: 10.1007/s10291-008-0089-9.