

# 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

韩保民<sup>1</sup>

(1 山东理工大学建筑工程学院, 淄博市张周路 12 号, 255049)

**摘要:** 系统分析、比较了几种精密卫星钟差加密方法, 研究了利用全球分布的 IGS 永久跟踪站的 GPS 观测数据估计高采样率卫星钟差参数的原理与方法, 并将各种卫星钟差加密方法得到的结果与 IGS 数据分析中心估计的卫星钟差结果相比较。最后将不同加密方法得出的精密卫星钟差结果用于基于星载 GPS 双频非差观测值的 CHAMP 低轨卫星的定轨, 并将不同方法得到的定轨精度进行比较。结果表明, 利用地面跟踪站的 GPS 观测数据, 可高精度、高密度地估计 GPS 卫星钟差, 估计精度可达 0.1~0.5 ns。经地面 GPS 跟踪站数据估计的 GPS 卫星钟差, 应用于基于 PPP 方法的低轨卫星定轨, 其定轨精度在 10 cm 以内。

**关键词:** 精密卫星钟差; 加密; 估计; 低轨卫星定轨

**中图分类号:** P228.41

精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 技术是近几年兴起的 GPS 定位新技术。它只用一台 GPS 接收机, 利用 GPS 双频观测值和 IGS 事后精密卫星轨道、钟差改正信息进行单点定位, 就可以达到 cm 级的定位精度<sup>[1-3]</sup>。由于基于 PPP 技术的低轨卫星定轨方法只利用低轨卫星星载 GPS 卫星上的观测信息, 与地面站无关, 不涉及低轨卫星的受力情况, 定轨模型简单, 因此, 近年来人们对利用基于 PPP 方法的低轨卫星定轨方法产生了极大的兴趣。JPL 和 GFZ 分别在其定位定轨软件 GIPSY 和 EPOS 中用 PPP 定位方式与传统的动力学方法相结合, 得到了较高的定位和定轨结果<sup>[4]</sup>。加拿大的 Bisnath 仅用 PPP 方法对 Champ 卫星进行定轨, 得到了 20 cm 左右的定轨精度<sup>[5]</sup>。Bock 和 Svehla 将 PPP 方法进行改进, 利用历元间的相位差消掉模糊度参数, 将得到的伪距定位结果及相位间差分得到的历元间精密位置差作为伪观测值, 和传统的动力学相结合, 得到了 cm 级的定轨结果<sup>[6,7]</sup>。随着精密 GPS 卫星轨道及精密卫星钟改正参数解算精度的提高, 重力场模型的不断精化, PPP 方法必将在低轨卫星定轨中越来越重要。

然而, 采用精密单点定位对低轨卫星定轨需以下两个重要前提: 卫星轨道及卫星钟差的精度必须足够高 (轨道 cm 级, 钟差亚 ns 级); 需用一定的方法将卫星星历和钟差改正信息加密到用户所需的采样间隔。IGS 提供的 15 min 间隔的精密卫星星历精度约在 2~5 cm 左右, 由于卫星星历变化相对较平稳, 用多项式拟合或插值的方法将 15 min 间隔的卫星星历加密到与用户一致的采样间隔时, 其精度不会损失较大, 能满足精密单点定位、定轨的需要。相比较而言, 卫星钟差变化较其轨道大得多, 因此, 在将 IGS 提供的 15 min 或 5 min 的精密卫星钟差加密到用户所需采样间隔时, 需仔细考虑。为了得到较高的定轨精度, 分析、研究不同的精密卫星钟差加密方法有着十分重要的意义。

## 1 卫星钟差加密原理与方法

### 1.1 精密卫星钟差的估计

利用 GPS 双频非差数据估计 GPS 卫星钟差时, 有以下两种方法<sup>[8]</sup>: 将卫星钟差与其他参数 (如站心坐标、卫星星历、地球自转参数及对流

收稿日期: 2006-08-24。

项目来源: 国家自然科学基金资助项目 (40474001); 山东省基础地理信息与数字化技术重点实验室开放研究基金资助项目 (SD040209); 山东理工大学科研基金资助项目 (2004KJM11)。

层参数)一同估计出; 首先解算出卫星星历、地球自转等参数, 然后将其固定, 回代到法方程中, 再求解出卫星钟差参数。两种方法估计的卫星钟差结果是一致的。如果只需要间隔较大的卫星钟差参数(如采样间隔为 5 min 或更长), 第一种方法是可取的。这种方法的优点是可避免因分步求解卫星钟差而消耗过多的时间。但它也有明显的局限性: 法方程要估计参数的个数太多。在第二种方法中, 由于将预先求出的与卫星钟差无关的测站坐标及对流层延迟等参数回代到法方程中, 并将其固定, 这时法方程中待估参数的个数明显减少, 可以一次估计更多的卫星钟差参数, 即可以采样估计间隔较小的卫星钟差参数(如 30 s)。

### 1.2 精密卫星钟差内插及拟合

由于美国的 SA 政策取消后, 加在 GPS 卫星钟上高频随机抖动部分随之消失, 卫星钟差的变化趋于平稳, 使得 GPS 卫星钟差的插值和拟合成为可能<sup>[9]</sup>。插值的原理是假定数据是正确的, 要求以某种方法描述数据点之间所发生的情况。目前, 常用的插值方法有线性插值、Lagrange 插值、Newton 插值、Hermite 插值、样条函数插值等<sup>[10]</sup>。由于样条函数具有计算稳定、最佳逼近、一致收敛性等特点, 因此, 常用三次样条插值方法将 15 min 或 5 min 的精密卫星钟差加密到与用户一致的采样间隔。

拟合的基本原理是设法找出某条光滑曲线, 它最佳地拟合数据, 但没必要经过任何数据点<sup>[10]</sup>。曲线拟合涉及回答两个基本问题: 最佳拟

合意味着什么, 应该用什么样的曲线。可用许多不同的方法定义最佳拟合, 并存在无穷数目的曲线。但最佳拟合被解释为在数据点的误差平方和最小, 且所用的曲线限定为多项式时, 曲线拟合才是简捷的, 而在数学上称为多项式的最小二乘曲线拟合。

## 2 算例及结果分析

为了验证精密卫星钟差加密精度, 笔者用 COD 提供的 GPSweek 1 320 周的第 3 天的 2 号卫星的 5 min 间隔的精密卫星钟差, 用三次样条插值方法和 13 阶切比雪夫多项式拟合的方法将其加密到 30 s, 将 COD 根据全球数据估计的 30s 间隔的卫星钟差作为真值, 内插与拟合结果与真值进行比较, 得到的结果见表 1。为了验证根据全球或区域性数据估计精密卫星钟差的精度, 选取地壳运动观测网络中的 25 个基准站, 进行精密卫星钟差估计, 估计时将 COD 提供的 5 min 间隔的钟差作为约束。估计出的 30 s 采样间隔的钟差与 COD 提供的 30 s 的钟差进行比较, 得到结果见表 1 和图 1。从图、表中可以看出, 根据区域性 GPS 跟踪数据估计的精密卫星钟差 COD 与根据全球 IGS 站跟踪数据估计的结果的差值在 0~0.59 ns 之间, 平均差值在 0.1 ns 左右。而利用插值和拟合的方法加密卫星钟差时, 个别历元加密结果和真值相差较大, 这会该历元的定轨结果带来较大误差。

表 1 用不同卫星加密方法得到卫星钟差同真值比较的统计结果/ns

Tab. 1 Statistic Results Between Real Values and Results with Different Densitification Methods

加密方法	最大值	最小值	平均值	标准差	中位差	RMS
插值	1.02	0	0.11	0.15	0	0.009 6
拟合	2.81	$3.38 \times 10^{-4}$	0.69	0.87	0.05	0.010 6
估计	0.59	0	0.10	0.15	0.13	0.009 8

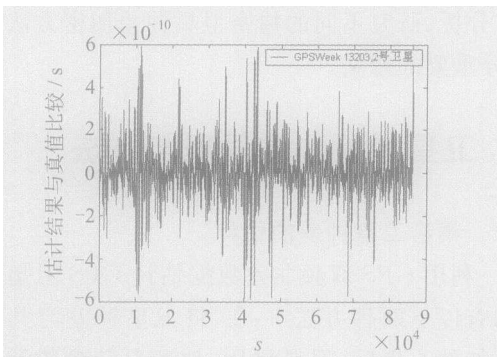


图 1 据区域 GPS 跟踪数据得到卫星钟差结果与真值比较

Fig. 1 Comparison of Estimated Satellite Clock Corrections with Real Values

## 3 卫星钟差加密结果对星载 GPS 低轨卫星定轨的影响

从上述算例可以看出, 内插、拟合和估计作为三种卫星精密钟差加密方法各有特点, 内插和拟合算法简便, 但精度较低, 内插精度要高于拟合结果。根据全球或区域 GPS 跟踪站的双频 GPS 观测值估计精密卫星钟差精度较高, 但算法复杂。为了验证应用这三种方法得到的精密卫星钟差能否满足精密单点定位、定轨的需要, 将其结果应用于 CHAMP 低轨卫星定轨中, 以考察卫星钟差加密结果对定轨精度的影响。

定轨时采用以下方案:  $C_2$  ——基于双频伪距的简化几何法定轨;  $C_{S2}$  ——基于双频伪距的简化动力学定轨;  $P_2$  ——基于双频伪距及历元间相位单差的简化几何法定轨;  $P_{S2}$  ——基于双频伪距及历元间相位单差的简化动力学定轨。

定轨时采用 COD 分析中心提供的精密星历、地球自转参数, 钟差则采用根据 COD 提供的 2004-02-05 GPS Week 1 256 周第 4 天的 15 min、5 min 的精密卫星钟差进行三次样条内插后的精密卫星钟差及根据“地壳运动观测网络”GPS 跟踪数据估计出的精密卫星钟差。采用 GPS 双频伪距消电离层组合的非差观测值和消电离层组合的历元间差分的相位观测值作为基本观测值, 并施加 GPS 卫星和星载 GPS 接收机天线相位中心改正、地球自转改正及相对论改正等模型。动力学模型则包括 120 阶的 TEG4 重力场模型、海潮模型为 CSR3.0, 第三体摄动模型采用 JPL DE200。

另外采用了光压、辐射压及大气阻力模型, 并估计 3 个常数和 6 个每圈一次的加速度常数, 每 12 min 在径向、切向和法向各预置一组随机脉冲, 其先验方差为径向、切向和法向都为 10 mm/s。

根据 15 min、5 min 精密卫星钟差加密到 30 s 的结果及根据地壳观测网络估计得到的 GPS 精密卫星钟差对 CHAMP 卫星进行定轨, 把德国慕尼黑工业大学 TUM 的几何法定轨结果作为真值, 将定轨结果与真值比较, 得到的结果见表 2、图 2。

表 2 不同卫星加密方法得到的卫星钟差应用于 CHAMP 定轨得到结果与真值比较/m

Tab. 2 Comparison of CHAMP Orbit Generated with Satellite Clock Corrections with True Orbits

时间间隔	$C_2$	$P_2$	$C_{S2}$	$P_{S2}$
Interpolated 15 min	1.24	0.15	0.45	0.15
Interpolated 5 min	1.22	0.11	0.43	0.10
Estimated 30 s	1.00	0.08	0.23	0.08

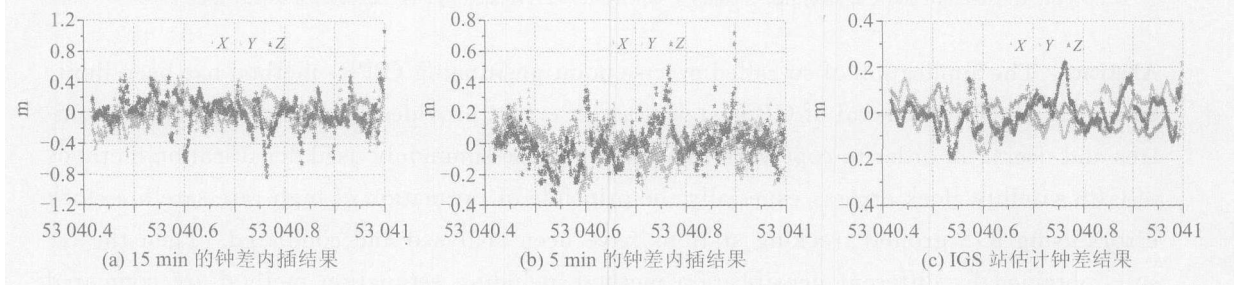


图 2 CHAMP 卫星定轨结果同真值比较图

Fig. 2 Orbit Differences Between Kinematic Orbit  $P_2$  and True Orbit

从表 2 和图 2 中可以看出, 无论应用那种方法, 根据 15 min 精密卫星钟差加密到 30 s 时定轨精度最差, 用 5 min 加密结果定轨精度次之, 而根据地壳观测网络跟踪数据估计的卫星钟差用于定轨的精度最高, 用基于双频伪距及相位观测值的简化动力学定轨及简化几何法定轨精度, 同在 TUM 轨道相比较, 差异在 10 cm 以内。

## 4 结 语

1) 在应用插值和拟合方法加密卫星钟差时, 插值精度明显优于拟合方法, 但低于估计结果。由于内插或多项式拟合卫星钟差时, 个别历元结果同“真值”相差较大, 在对精度要求较高的动态定轨中, 内插或拟合卫星钟差的误差就成了定位、定轨精度的重要影响因素, 因此对高精度的定位、定轨来说, 应寻求好的卫星钟差加密方法。

2) 采用合理的方法, 利用 GPS 地面跟踪站

的观测数据, 可高精度、高密度地估计 GPS 卫星钟差的改正值, 估计精度可达 0.1~0.5 ns。经地面跟踪站的观测数据估计的 GPS 卫星钟差, 应用于低轨道卫星星载 GPS 定轨, 其定轨精度可达 0.08 m, 基本满足低轨卫星的测地应用需要。

## 参 考 文 献

- [1] 刘经南, 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位技术探讨[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(3): 234-240
- [2] 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位理论与实现[D]. 武汉: 武汉大学, 2002
- [3] 韩保民, 欧吉坤. 基于 GPS 非差观测值进行精密单点定位研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(4): 409-412
- [4] Webb F H, Zumberge J F. An Introduction to GPS/OASIS II. JPL D-11088[R]. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, 1995
- [5] Bisnath S B, Langley R B. Precise Orbit Determination

- tion of Low Earth Orbiters with GPS Point Positioning [C]. The Institute of Navigation National Technical Meeting 2001, Long Beach, California, 2001
- [6] Bock H. Efficient Methods for Determining Precise Orbits of Low Earth Orbiters Using the Global Positioning System[D]. Berne: Astronomical Institute University of Berne, 2003
- [7] Svehla D, Rothacher M. Kinematic Orbit Determination of LEOs Based on Zero- or Double-Difference Algorithms Using Simulated and Real SST Data [C]. IAG 2001 Scientific Assembly, Budapest, 2001
- [8] Hugentobler R, Rolf D, Fridez P. Bernese GPS Software Version 5.0 Draft[M]. Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 2004
- [9] 季善标, 朱文耀, 熊永清. 精密 GPS 卫星钟差的改正和应用[J]. 空间科学学报, 2001, 21(1): 42-48
- [10] 刘大杰, 陶本藻. 实用测量数据处理方法[M]. 北京: 测绘出版社, 2000
- 
- 作者简介: 韩保民, 博士, 副教授。现主要从事 GPS 快速定位、星载 GPS 低轨卫星精密定轨等方面研究。  
E-mail: hanbm@hotmail.com, hbmlxh0909@sina.com

## Densification Methods of GPS Satellite Clock Errors and Their Impact on Orbit Determination Precision of LEOs

HAN Baomin<sup>1</sup>

(1 School of Architecture and Engineering, Shandong University of Technology, 12 Zhangzhou Road, Zibo 255049, China)

**Abstract:** The application of so-called precise point positioning (PPP) method has been limited by the different interval of GPS satellite clock errors provided by IGS or its analysis centres and users. In order to cope with this problem, the commonly used densification methods of GPS satellite clock errors, especially the principle of estimation of high-rate satellite clock errors using IGS ground tracking stations have been analysed and compared. Then the results obtained by different densification method including estimation method are compared with the estimated high-rate satellite clock errors by IGS. After that the satellite clock errors gained by different densification methods introduced have been used for CHAMP orbit determination (OD) employing PPP method combined with dynamic models, and the precision of them are compared as well. The results show that GPS ground tracking data can be used for estimation of high rate satellite clock errors. The precision of estimation is about 0.1 ns to 0.5 ns, which is close to the precision of IGS. The OD precision of LEOs based on PPP method using satellite clock errors obtained by estimation discussed in this paper is less than 10 cm.

**Key words:** precise satellite clock errors; densification; estimation; orbit determination of low-earth orbiters

---

**About the author:** HAN Baomin, Ph D, associate professor, majors in rapid GPS positioning and GPS-based precision orbit determination for low earth orbiters.

E-mail: hanbm@hotmail.com, hbmlxh0909@sina.com