

# GPS 双频相位平滑伪距在卫星 预报钟差精度评定中的应用

路晓峰<sup>1</sup>, 贾小林<sup>2</sup>, 杨志强<sup>1</sup>

(1 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 利用 Hatch 滤波对双频消电离层组合伪距观测值进行相位平滑讨论, 对原 Hatch 滤波公式中的定权方法进行了改进。在此基础上, 利用伪距与星地距比对法对广播星历中卫星预报钟差精度评定进行了研究。计算结果表明: 载波相位平滑能有效地提高伪距观测值的精度, 从而提高伪距与星地距比对法评估卫星预报钟差的可行性。利用双频消电离层相位平滑伪距计算的卫星钟差精度优于  $1\text{ ns}(1\sigma)$ , 测定的卫星钟差与实际卫星钟差不存在系统差。

**关键词:** Hatch 滤波; 相位平滑伪距; 消电离层组合; 广播星历; 卫星钟差; 精度评定

**中图分类号:** P228 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2008)02-0209-05

## Application of GPS Dual Frequencies Phase-Smoothed Pseudo-Range Data in Accuracy Evaluation of Satellite Clock Error of Broadcast Ephemeris

LU Xiao-feng<sup>1</sup>, JIA Xiao-lin<sup>2</sup>, YANG Zhi-qiang<sup>1</sup>

(1 School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** The carrier smoothed pseudo-range is briefly discussed, and a weighting method is developed for Hatch-type filter. Based on this modified Hatch-type filter and precise ephemeris, the accuracy evaluation of satellite clock bias of broadcast ephemeris using GPS dual frequencies phase-smoothed pseudo-range is researched. By comparison and analysis, the following facts are drawn: it improves the precision of pseudo-range using phase smoothing pseudo-range, and improves the precision of satellite clock bias when the clock bias is calculated by using pseudo-ranges data; the precision of satellite clock bias is better than  $1\text{ ns}(1\sigma)$ , when the clock bias is calculated by using GPS dual frequencies phase-smoothed pseudo-range data; there is no systematic error between this research and IGS's clock bias.

**Key words:** Hatch-type filter; carrier phase smoothed pseudo-range; iono-free combination; broadcast ephemeris; satellite clock bias; accuracy evaluation

## 0 引言

轨道误差和卫星钟差误差是用户导航定位的

主要误差源。对于事后精密定位采用的是精密轨道和钟差, 对于大多数实时导航用户来说采用的是广播星历给出的轨道和钟差, 而广播星历的轨道和

收稿日期: 2007-09-20

基金项目: 西安测绘研究所创新基金项目(CX0148); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060710003); 陕西省国际合作重点计划基金项目(2005KW-06)

作者简介: 路晓峰(1981-), 男, 山西芮城人, 从事空间大地测量研究。E-mail: lxf\_9@sohu.com.

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

钟差均是预报值,其精度能达到什么样的水平,是许多实时所关心的问题。同时对于系统建设来说,也需要对其发播的广播星历精度做一个合理地评估,以检验其是否达到了系统设计的指标。卫星广播星历中包含卫星轨道和卫星钟参数,这里仅讨论卫星钟差的精度评估。

卫星预报钟差精度的评定可采取观测量评估和精密事后钟差评估两种方式,观测量评估根据观测量的不同分为时间同步站激光观测量评估、星地双向时间同步伪距观测量评估以及监测站双频伪距观测量评估。卫星预报钟差精度评估的关键是卫星钟差的精确测定。目前,利用 GPS 地面跟踪站的微波测距资料估算 GPS 卫星钟差时,由于测量机制的原因,很难将卫星钟差与测站钟差分离,确定卫星钟差成为一个技术难题,通常采用组差的方法获得卫星钟差,这会降低卫星钟差的确定精度,而且需要多个观测站的支持。季善标利用全球 IGS 站的观测资料研究表明:采用合理的方法,利用 GPS 地面跟踪站的观测数据,可高精度地估算 GPS 卫星钟差的改正值,估算精度可达 1 ns,相当于伪距测量的精度<sup>[1]</sup>。利用监测站观测数据、主控站计算的测站和卫星钟差可获得卫星钟差。

利用 GPS 伪距资料评估卫星预报钟差的精度,主要在于高精度的利用伪距与星地距比对法计算卫星钟差,因此伪距数据的精度是计算卫星钟差的关键所在。为了提高监测站伪距观测量精度,可以利用载波相位来平滑伪距,相位平滑伪距观测值的精度为 30~60 cm,并且低高度角的卫星观测残差变化抖动较大,精度也更低,而高度角较大的卫星观测值残差较小,变化也更为平缓<sup>[2]</sup>。范士杰等研究表明:利用改进的 Hatch 滤波方法,双频消电离层组合伪距平滑值的残差中误差约为 0.5 m,明显高于未经平滑的伪距观测值的精度<sup>[2]</sup>。笔者利用改进后的 Hatch 滤波方法,采用双频消电离层组合载波相位观测值对双频消电离层组合伪距观测值进行相位平滑,并采用 IGS 提供的 sp3 事后精密星历和精密卫星钟差,对伪距与星地距比对法计算卫星钟差的精度改进情况进行研究。

## 1 改进型的伪距相位平滑

GPS 接收机所测得的测码伪距和载波相位伪距观测值可表示为

$$P^j(t) = R^j(t) + I^j(t) + \epsilon_p(t) \quad (1)$$

$$\Phi^j(t) = \lambda \Phi^j(t) = R^j(t) - I^j(t) - \lambda N^j + \epsilon_p(t) \quad (2)$$

$$R^j(t) = \rho^j(t) + C[\delta T(t) - \delta^j(t)] + \delta^j_{\text{trop}}(t) \quad (3)$$

式中:  $R^j(t)$  为历元  $t$  接收机至卫星  $j$  的几何距离加频率无关的偏差项;  $I^j(t)$  为测码伪距  $P^j(t)$  的电离层延迟,而相位伪距  $\Phi^j(t)$  的电离层延迟为  $-I^j(t)$ ;  $N^j$  为整周模糊度;  $\delta T(t)$ 、 $\delta^j(t)$  分别为  $t$  时刻的接收机钟差和卫星  $j$  的钟差;  $\epsilon$  为测量噪声。

若在相邻 2 个历元  $t_{k-1}$ 、 $t_k$  之间对 GPS 载波相位测量值求差,可消除对卫星  $j$  作载波相位测量的整周模糊度(前提是 2 个历元之间没有发生周跳),表示为

$$\Delta \Phi^j_{t_k, t_{k-1}} = \Phi^j(t_k) - \Phi^j(t_{k-1}) =$$

$$\Delta R^j_{t_k, t_{k-1}} - \Delta I^j_{t_k, t_{k-1}} + \Delta \epsilon_{\Phi}(t_{k-1}, t_k) \quad (4)$$

在相邻 2 个历元  $t_{k-1}$ 、 $t_k$  之间,对 GPS 测码伪距测量值求差,可得到

$$\Delta P^j_{t_k, t_{k-1}} = P^j(t_k) - P^j(t_{k-1}) =$$

$$\Delta R^j_{t_k, t_{k-1}} + \Delta I^j_{t_k, t_{k-1}} + \Delta \epsilon_p(t_{k-1}, t_k) \quad (5)$$

将式(4)代入式(5),则得相位平滑伪距的计算式为

$$\bar{P}^j(t_k) = P^j(t_{k-1}) + \Delta \Phi^j_{t_k, t_{k-1}} + 2\Delta I^j_{t_k, t_{k-1}} \quad (6)$$

由于双频消电离层组合观测量  $P^j_{LC}$  和  $\Phi^j_{LC}$  消除了电离层延迟影响,所以其相位平滑伪距计算式为<sup>[3]</sup>

$$\bar{P}^j_{LC}(t_k) = P^j_{LC}(t_{k-1}) + \Delta \Phi^j_{LC, t_k, t_{k-1}} \quad (7)$$

处理多历元数据时,可采用非发散的 Hatch 滤波公式

$$\bar{P}^j_{LC}(i) = \frac{1}{i} P^j_{LC}(i) + \frac{i-1}{i} \cdot$$

$$[\bar{P}^j_{LC}(i-1) + \Delta \Phi^j_{LC, i, i-1}]$$

$$\bar{P}^j_{LC}(1) = P^j_{LC}(1) \quad (8)$$

式中:  $P^j_{LC}(i)$  为历元  $i$  的消电离层组合伪距观测值;  $\bar{P}^j_{LC}(i-1)$  为历元  $i-1$  的平滑伪距值。

在式(8)的基础上,对定权方法进一步改进,目前基本上都是按照高度角进行加权,只是在加权的经验公式上略有不同。在实际解算中,根据卫星高度角  $\alpha_i$  确定当前观测值的权  $p_i = \sin \alpha_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ),则平滑伪距的递推公式为

$$\bar{P}^j_{LC}(i) = \frac{p_i}{\sum_k p_k} P^j_{LC}(i) + \left[ 1 - \frac{p_i}{\sum_k p_k} \right] \cdot$$

$$[\bar{P}^j_{LC}(i-1) + \Delta \Phi^j_{LC, i, i-1}]$$

$$\bar{P}_{IC}^i(1) = P_{IC}^i(1) \quad (9)$$

## 2 利用伪距资料计算卫星钟差的算法

GPS 采用单程测量传播延迟的测距原理, 所以, 要准确测定卫星至观测站的距离, 就必须使卫星钟与用户接收机钟保持严格同步, 这在实践中很难实现。由于卫星钟和接收机钟不同步, 所以 GPS 得到的观测量是含有两个时钟钟差的伪距(观测量), 它等于所测卫星到接收机的距离加两个钟差的修正<sup>[4]</sup>, 忽略延迟改正, 可写为

$$\rho' = \rho + c\Delta T_{SA} \quad (10)$$

式中:  $\rho'$  为伪距观测量(含有卫星钟钟差和地面接收机钟差的星地距);  $\rho$  为星地距(不含有钟差的星地距);  $\Delta T_{SA}$  为星地钟差(包含接收机钟差和卫星钟差); 若已知星地距离, 则星地钟差  $\Delta T_{SA} = \frac{1}{c}(\rho - \rho')$ 。

采用伪距与星地距比对法进行星地钟差计算, 不仅涉及伪距观测量的修正, 还涉及卫星到测站的距离计算, 其中伪距观测量的误差修正项包括: 电离层延迟改正; 对流层改正; 相对论改正; 卫星质心改正; 测站偏心改正。其中电离层的延迟改正用双频伪距就可消去一阶的电离层影响; 对流层改正采用 Saastamoinen 模型计算。

卫星到测站的距离计算涉及卫星位置和测站位置的获得以及对测站坐标的改正。为了得到准确的星地距, 笔者采用精密星历计算卫星位置, 相当于卫星位置是无误差的, 对测站坐标进行固体潮改正、海潮改正、极潮改正、板块运动改正。经过改正的测站坐标和卫星位置计算出来的是不含有星地钟差的星地距。关于伪距的各项修正公式和对测站坐标的修正公式可见文献[5]。

求得星地钟差  $\Delta T_{SA}$  后, 若已知地面站钟差  $\Delta T_A$ , 则可求得卫星钟差  $\Delta T_S$

$$\Delta T_S = \Delta T_{SA} + \Delta T_A \quad (11)$$

由误差传播定理可知

$$m_S = \sqrt{m_{SA}^2 + m_A^2} \quad (12)$$

式中:  $m_S$  为卫星钟差的中误差;  $m_{SA}$  为星地钟差  $\Delta T_{SA}$  的中误差;  $m_A$  为地面站钟差  $\Delta T_A$  的中误差。

地面站钟差采用 IGS 提供的精密钟差, 精度优于 0.2 ns, 忽略其误差, 因此计算的卫星钟差精度与观测量得到的星地钟差精度相当。

## 3 计算与分析

笔者研制了双频伪距和双频相位平滑伪距的卫星预报钟差精度评定软件, 其数据处理方案采用两种方案进行卫星预报钟差精度评估, 观测值分别采用双频消电离层组合伪距和双频消电离层组合相位平滑伪距(对于两类观测值均剔除了高度角低于  $15^\circ$  的观测数据)。计算时采用的观测数据为 IGS 拉萨站 2004 年 6 月 6 日的实测 GPS 数据。现对两种方案进行比较:

方案一。采用原始的伪距作为观测数据, 即采用双频消电离层组合伪距。

方案二。采用平滑后的伪距作为观测数据, 即采用双频消电离层组合相位平滑伪距。

表 1~2 列出了 IGS 拉萨站 2004 年 6 月 6 日 GPS 观测数据计算的伪距平滑前后每颗 GPS 卫星的钟差与 IGS 精密钟差的残差均值及中误差比较, 图 1~4 描述了伪距平滑前后计算的卫星钟差与 IGS 精密钟差差值及变化情况。选择代表性的 8 颗卫星: PRN01(型号 BLOCK II, 铯钟)、03(型号 BLOCK IIR, 铷钟)、14(RB)、15(CS)、18(RB)、19(RB)、30(CS)、22(RB), 横轴以分钟为间隔, 纵轴以纳秒为单位。根据求得结果绘制其计算的卫星钟差残差在伪距平滑前后的比较图, 其中 OCJD 表示由观测量计算的卫星钟差与 IGS 提供的 5 min 精密钟差比较的残差。

由表 1~2 和图 1~4 分析计算结果可知:

(1) 利用双频消电离层组合的伪距与星地距比对法计算的卫星钟差, 除 PRN 22 卫星外, 其他卫星的计算精度均优于 3 ns, 除 PRN 19、22 卫星外, 其他卫星均不存在系统误差。

(2) 比较表 2 可知, 对所有卫星, 用经过载波相位平滑处理的伪距, 解算结果明显优于未经平滑伪距计算的结果, 有效提高了监测站双频伪距观测量评定广播星历卫星预报钟差的精度。

(3) 分析表 2 得出, 用双频消电离层组合的平滑伪距与星地距比对法计算的卫星钟差, 除 PRN 11、19、22、28 卫星外, 其他卫星钟差计算精度均优于 1 ns, 且均不存在系统差。需注意上述 4 颗卫星均为 BLOCK IIR 型号, 原子钟为铷钟的卫星。

## 5 结语

利用监测站双频伪距观测量评定广播星历中

卫星预报钟差精度时,在观测设备和观测精度一定的情况下,用预处理平滑伪距方法改善观测量精度,能有效提高评估广播星历卫星预报钟差的精度。

利用载波相位平滑处理伪距,明显提高了伪距

表 1 伪距资料计算的卫星钟差与 IGS 精密钟差之差统计

Tab. 1 Summary Statistics of Differences Between Satellite Clock Bias and IGS's Precision

Satellite Clock Bias when the Clock Bias is Calculated by Using Pseudo-Ranges Data					
PRN 编号	平均值 / ns	中误差 / ns	PRN 编号	平均值 / ns	中误差 / ns
1	0.345	1.571	13	-0.418	2.069
3	-0.438	1.472	14	0.196	1.339
4	0.025	1.500	15	0.014	1.252
5	-0.339	1.819	16	-0.039	1.311
6	0.315	1.433	17	0.222	1.346
7	-0.158	1.494	18	-0.053	1.346
8	0.171	1.961	19	-2.426	2.775
9	-0.314	1.450	20	0.137	1.498
10	-0.198	1.355	21	-0.175	1.569
11	-0.801	1.999	22	-3.760	4.008
总 RMS					1.734

的观测精度,有效提高了伪距与星地距比对法评定卫星预报钟差的可行性精度。初步试验结果表明,监测站双频伪距观测量评定广播星历中的卫星预报钟差精度优于 1 ns(1σ)。

表 2 平滑伪距资料计算的卫星钟差与 IGS 精密钟差之差统计

Tab. 2 Summary Statistics of Differences Between Satellite Clock Bias and IGS's Precision Satellite Clock Bias when the Clock Bias is Calculated by Using GPS Dual Frequencies Phase-Smoothed Pseudo-Ranges Data

PRN 编号	平均值 / ns	中误差 / ns	PRN 编号	平均值 / ns	中误差 / ns
1	0.099	0.311	13	-0.682	0.764
3	-0.602	0.665	14	-0.236	0.386
4	-0.190	0.366	15	-0.176	0.351
5	-0.376	0.539	16	-0.151	0.327
6	0.139	0.354	17	-0.283	0.679
7	-0.510	0.624	18	-0.217	0.360
8	-0.273	0.445	19	-2.499	2.520
9	-0.725	0.789	20	-0.638	1.026
10	-0.176	0.652	21	-0.288	0.409
11	-1.316	1.336	22	-3.589	3.607
总 RMS					1.024

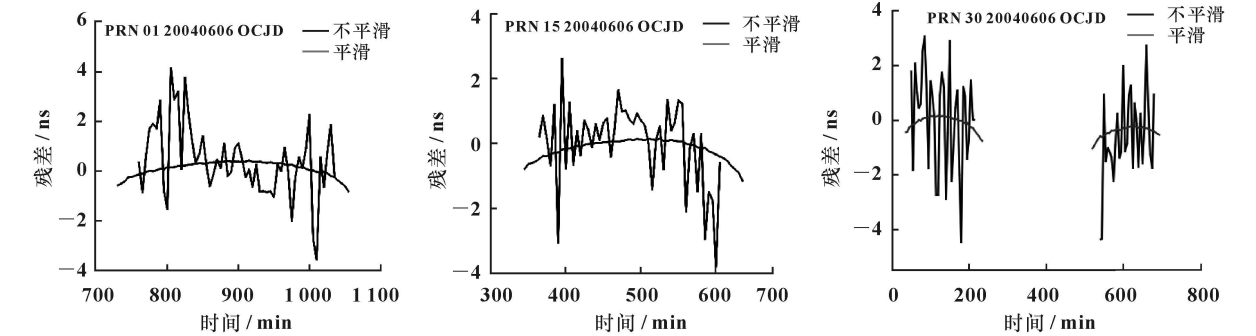


图 1 PRN01、15 和 30(铯钟)平滑前后的卫星钟差残差比较

Fig. 1 Comparison of Clock Residuals Error Satellite PRN01, 15, 30 (Cs) Between Pseudo Range and Smoothed Pseudo Range

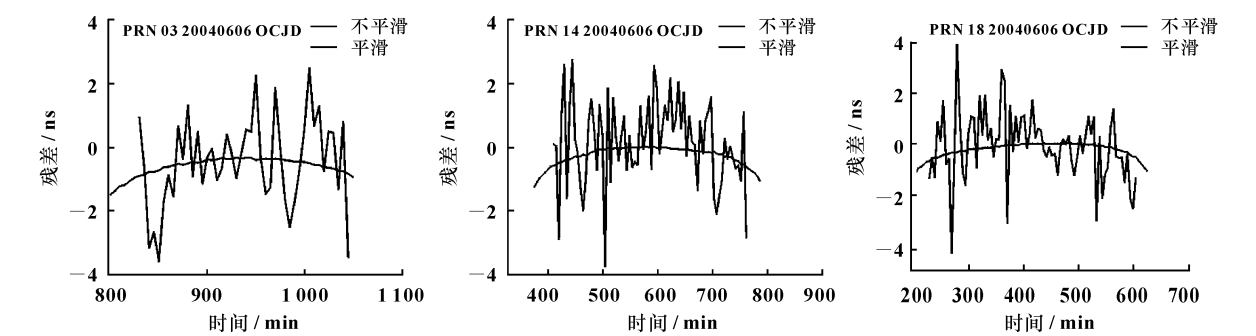


图 2 PRN03、14 和 18(铷钟)平滑前后的卫星钟差残差比较

Fig. 2 Comparison of Clock Residuals Error Satellite PRN03, 14, 18 (Rb) Between Pseudo-Range and Smoothed Pseudo-Range

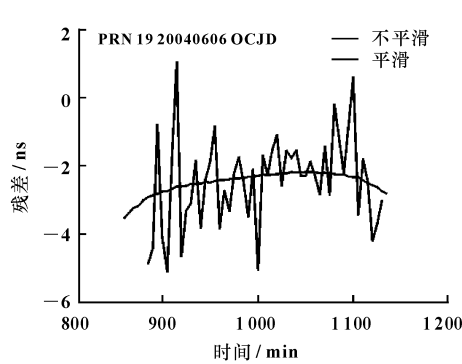


图 3 PRN19 平滑前后的卫星钟差残差比较

Fig. 3 Comparison of Clock Residuals Error Satellite PRN19 Between Pseudo-Range and Smoothed Pseudo-Range

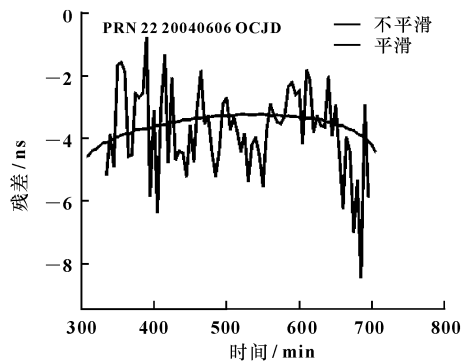


图 4 PRN22 平滑前后的卫星钟差残差比较

Fig. 4 Comparison of Clock Residuals Error Satellite PRN22 Between Pseudo-Range and Smoothed Pseudo-Range

参考文献:

[ 1 ] 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(3): 42-48.

[ 2 ] 范士杰, 郭际明, 彭秀英. GPS 双频相位平滑伪距及其单点定位的精度研究 [ J ]. 测绘工程, 2005, 14(4): 39-42.

[ 3 ] Hatch R. The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements [ C ] // Proceedings of the Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, New Mexico USA, 1982.

[ 4 ] 周忠谟, 易杰军, 周琪, 等. GPS 测量原理与应用 [ M ]. 北京: 测绘出版社, 1999.

[ 5 ] 魏子卿, 葛茂荣. GPS 相对定位的数学模型 [ M ]. 北京: 测绘出版社, 1998.

[ 6 ] Porsani J L, Sauck W A, Junior A O S. GPR for Mapping Fractures and as Guide for the Extraction of Ornamental Granite from a Quarry: A Case Study from Southern Brazil [ J ]. Journal of Applied Geophysics, 2006, 51(3): 177-187.

[ 7 ] Beres M, Olivier R, Luetscher M. Integration of Ground Penetrating Radar and Microgravimetric Methods to Map Shallow Caves [ J ]. Journal of Applied Geophysics, 2001, 46(4): 249-262.

(上接第 199 页)

[ 3 ] 刘康和. 地质雷达在水利工程质量检测中的应用 [ J ]. 长江理工大学学报, 2001, 18(1): 10-13.

[ 4 ] 赵修军, 陈锁忠, 邹叶锋. 地质雷达在江苏宜兴段高速公路边坡勘测中的应用 [ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(1): 111-114.

[ 5 ] 余中明, 丁强. 地质雷达探测工程的几个问题 [ J ]. 地质找矿论丛, 2006, 21(增刊): 182-184.