第27卷第2期
2007年4月

大地测量与地球动力学
JOURNAL OF GEODESY AND GEODYNAMICS

Vol. 27 No. 2
Apr. ,2007

文章编号:1671-5942(2007)02-0103-04

低轨卫星定轨中精密卫星钟差的插值方法*

郭东美[1,2)]　韩保民[3)]　熊　熊[1)]

(1)中国科学院测量与地球物理研究所,武汉　430077
2)中国科学院研究生院,北京　100049
3)山东理工大学,淄博　255049)

摘　要　分析了多种精密卫星钟差的插值方法,将插值结果与JPL等IGS分析中心结果相比较,最后将钟差插值结果进行低轨卫星定轨,并对不同插值方法得出的定轨精度进行分析。结果表明,利用GPS地面跟踪站的观测数据,估计GPS卫星钟差,估计精度可达0.1~0.3 ns。将其应用于CHAMP卫星定轨,其定轨精度优于10 cm。

关键词　精密卫星钟差　插值法　钟差估计　精密单点定位　低轨卫星定轨

中图分类号:P228.1　　**文献标识码**:A

INTERPOLATION OF SATELLITE CLOCK BIAS IN LOW EARTH ORBITS DETERMINATION

Guo Dongmei[1,2)], Han Baomin[3)] and Xiong Xiong[1)]

(1) *Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan*　430077
2) *School of Graduate, CAS, Beijing*　100049
3) *Shandong University of Technology, Zibo*　255049)

Abstract　Several methods to interpolate precise satellite clock bias are introduced. Then, the results obtained by interpolation are compared with that from JPL and other IGS analysis center. Finally, the clock bias results after interpolation are used in the orbit determination for LEOs, and orbit determination accuracies obtained by different methods are analyzed. Using the GPS data of ground tracking stations to estimate satellite clock bias, the estimation accuracy is up to 0.1 – 0.3 ns. When the GPS satellite clock bias is applied to orbit determination for CHAMP, the accuracy of orbit determination is better than 10cm.

Key words: precise satellite clock bias, interpolation, clock bias estimation, Precise Point Positioning (PPP), Low Earth Orbits (LEO) determination

1　引言

非差精密单点定位(PPP)技术是近几年刚刚兴起的GPS定位新技术。非差精密单点定位方法使用一台GPS接收机,利用GPS双频非差观测值和IGS事后精密轨道产品就可以达到厘米级的定位精度,使得在精度要求不太高的测量中可以用一台GPS接收机取代原来两台接收机,也能达到原来的精度,另外该定位方法不需要精确的初始坐标,因此精密单点定位技术成为目前大地测量研究的热

* **收稿日期**:2006-07-25
基金项目:东亚地区地壳运动(0505151067);科技部国际合作重点项目(2006DFA21910)
作者简介:郭东美,女,硕士,主要从事GPS数据处理与地球物理研究. E – mail:guodongmei67@hotmail.com

点[1]。GPS 精密单点定位用 IGS 所提供的精密星历及精密卫星钟差改正信息和 GPS 双频非差观测值进行单点定位。其前提之一是应用 IGS 的精密卫星钟差改正,但由于 IGS 仅提供 15 分钟、5 分钟及 30 s 采样间隔的精密卫星钟差改正,而在实际定位中,采样间隔一般为 30 s、10 s、2 s 甚至更密,因此需要采取一定的措施对卫星钟差进行处理,以和用户的采样间隔保持一致。

2 卫星钟差插值与估计

目前常用的内插方法有:线性内插、Lagrange 内插、Newton 内插、Hermite 内插、样条函数内插等。Lagrange 内插公式含义直观,形式对称,但是增加新节点时原有公式不能利用,必须重新建立;Newton 内插函数能够灵活地增加节点,但是 Newton 内插同 Lagrange 内插一样只能保障在节点上函数值相等,而不能保证在节点上的导数值也相等;Hermite 内插既能保证在节点上函数值相等,也能保证在节点上的导数值相等;样条函数具有计算稳定性、最佳逼近性、一致收敛性等特点[2]。

直接内插无法满足精度要求。为解决此问题,JPL、GFZ、CODE 等 IGS 分析中心开展了高采样率卫星钟差估计方法的研究。目前,这些 IGS 分析中心可提供 30 s 间隔的卫星钟差,IGS 及其他分析中心也可提供间隔为 5 分钟的卫星钟差。这些钟差是在固定卫星轨道、测站坐标、整周模糊度及对流层延迟参数的情况下估计出来的。利用全球分布的 IGS 永久站的观测数据估计高采样率卫星钟差参数,其估计方法是先根据全球的数据求得精确的轨道参数、各测站精确的坐标值及对流层参数,然后把这些参数作为已知值,用双频伪距和相位观测值求出 30 s 采样间隔的精密卫星钟差参数[3,4]。利用这种方法估计的卫星钟差的精度为 0.2 ns ~ 0.3 ns。但这种做法的缺点是计算量大且计算复杂。

3 卫星钟差插值算例分析

为了验证精密卫星钟差插值方法的精度,本文利用 CODE 提供的 2004 年 2 月 5 日 GPSWeek 1256 周的 15 分钟和 5 分钟的精密卫星钟差将其用不同的方法插值到 30 s,在内插时分别使用线性内插、三次样条函数内插、三次 Hermite 内插,拟合时使用最小二乘曲线拟合。然后将插值结果和 CODE 提供的 30 s 的钟差进行比较,以验证不同插值方法的精度。比较结果见表 1、图 1、图 2 和图 3。

表 1 15 分钟和 5 分钟钟差插值到 30 s 的结果与“真值”的比较

Tab. 1 The difference of “true values” with interpolation of 15 min and 5 min to 30 s

采样间隔(分钟)	插值方法	最大值(ns)	平均值(ns)	标准差(ns)	中位数(ns)	RMS(ns)
15	线性内插	1.47	0.25	0.34	0	0.007
	样条内插	1.47	0.25	0.34	0	0.000 9
	Hermite 内插	1.60	0.25	0.35	0.001	0.001 7
	拟合	2.84	0.59	0.78	0.09	0.021
	估计	0.58	0.11	0.15	0.13	0.009
5	线性内插	0.48	0.09	0.12	0	0.002
	样条内插	0.45	0.08	0.11	0	0.002
	Hermite 内插	0.48	0.08	0.11	0	0.003
	拟合	2.67	0.59	0.77	0.06	0.029

从结果可以得出,用 15 分钟和 5 分钟采样间隔的精密卫星钟差内插后对距离的影响分别是10.5

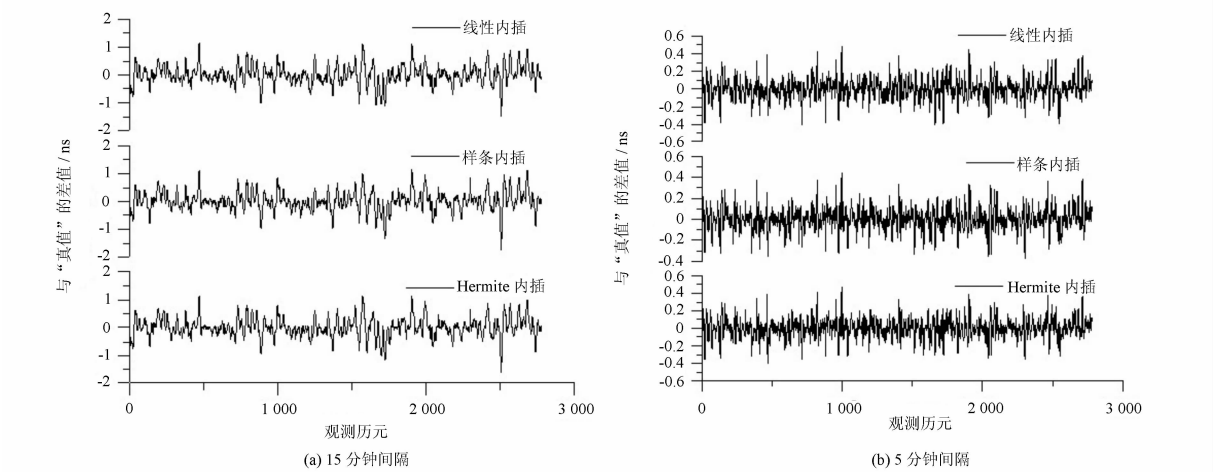


图 1 15 分钟和 5 分钟采样间隔的卫星钟差内插结果

Fig. 1 The result of satellite clock bias with interpolation intervals of 15 min and 5 min

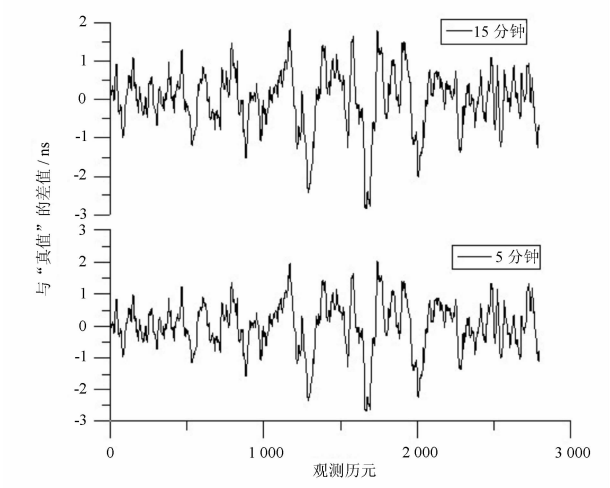


图 2　15 分钟和 5 分钟采样间隔的卫星钟差拟合结果

Fig. 2　The result of satellite clock bias fitted by time intervals of 15 min and 5 min time

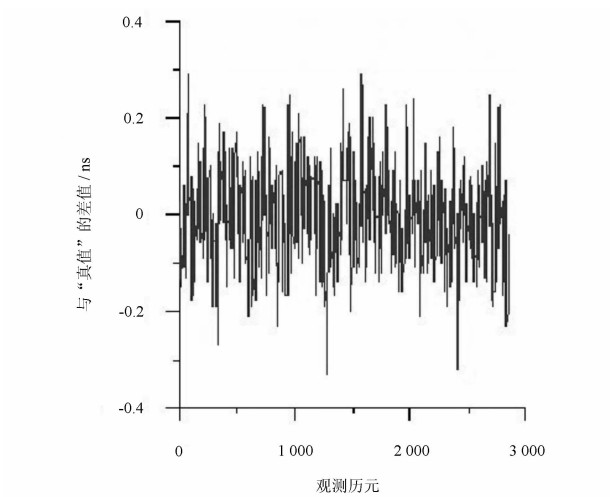


图 3　卫星钟差估计结果

Fig. 3　The estimated satellite clock biases

cm 和 3.5 cm;拟合到 30 s 后的卫星钟差对距离的影响分别是 23 cm 和 22 cm;根据 IGS 站估计的卫星钟差估计后的精度会明显地提高,对距离的影响仅为 4.5 cm。因此,用插值方法得到的高采样率的卫星钟差可以应用于精密单点定位。

为验证此结论的普遍性,本文随机选取 CODE 提供的 2004 年 2 月 ~2005 年 12 月期间 12 天的精密卫星钟差,将其插值到 30 s,并将插值结果与 CODE 提供的 30 s 的钟差进行比较。表 2 给出了 15 分钟和 5 分钟采样间隔的精密卫星钟差三次样条内插后的精度。统计结果表明,12 天的精密卫星钟差插值精度基本一样;15 分钟采样间隔的卫星钟差插值结果精度可达 0.33 ns ~0.38 ns;5 分钟采样间隔的卫星钟差插值结果精度达到 0.10 ns ~0.12 ns。

表 2　2004 年 2 月 ~2005 年 12 月卫星钟差插值结果精度统计表

Tab. 2　Statistics of clock bias by interpolation during 2004-02 – 2005-12

时间（年　月　日）	标准差(ns)	
	15 min	5 min
2004-02-01	0.35	0.11
2004-02-05	0.34	0.11
2004-04-23	0.34	0.12
2004-06-02	0.33	0.10
2004-08-27	0.34	0.12
2004-10-16	0.38	0.11
2005-01-15	0.37	0.11
2005-04-25	0.33	0.11
2005-04-30	0.34	0.10
2005-08-11	0.35	0.11
2005-09-30	0.34	0.11
2005-12-15	0.34	0.11

4　卫星钟差插值误差对低轨卫星定轨的影响

用 IGS 提供的 2003 年 7 月 28 日 GPSWeek 1256 周第 4 天的 15 分钟、5 分钟采样间隔的精密卫星钟差三次样条内插后的结果和根据 IGS 站估计的卫星钟差结果对 CHAMP 进行定轨,以考察卫星钟差插值结果对定轨精度的影响。定轨时采用的是简化的几何法定轨方法,GPS 观测值为双频伪距非差观测值,用动力学方法对轨道进行平滑,以获得较准确的卫星轨道。然后将根据 15 分钟、5 分钟钟差插值到 30 s 的结果和根据 IGS 站估计的结果对 CHAMP 卫星进行定轨与德国慕尼黑大学(TUM)的定轨结果比较,比较结果见表 3、图 4、图 5、图 6。

表 3　不同时间间隔的钟差插值方法应用于 CHAMP 定轨并与 TUM 给出的结果比较

Tab. 3　Comparison of the TUM orbit with the CHAMP orbiting results by use of different interpolating methods of satellite clock bias

时间间隔(s)	C2(m)	P2(m)
900	1.03	0.14
300	0.09	0.10
30	0.75	0.07

注:表中 C2 表示基于双频伪距的简化几何法定轨,P2 表示基于双频伪距及相位的简化几何法定轨

从结果可看出,用 15 分钟内插得到的结果应用于精密单点定位中可达到 0.15 m 的精度;用 5 分钟内插得到的结果应用于精密单点定位中可达到0.10 m 的精度;经地面跟踪站的观测数据估计的 GPS 卫星钟差,应用于星载 GPS 低轨卫星的几何定轨,其定轨精度可达 0.08 m,基本满足低轨卫星测地应用

的需要。

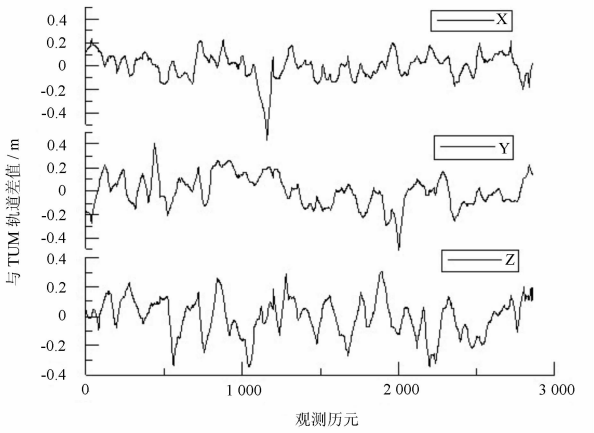


图 4 内插 15 分钟间隔的卫星钟差对 CHAMP 卫星定轨的结果

Fig. 4 Results of the CHAMP orbit determination using the result from 15 min clock bias interpolation

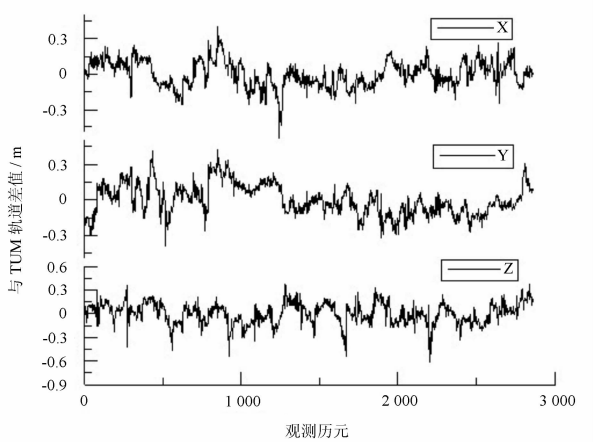


图 5 内插 5 分钟间隔的卫星钟差对 CHAMP 卫星定轨的结果

Fig. 5 Results of the CHAMP orbit determination using the result from 5 min clock bias interpolation

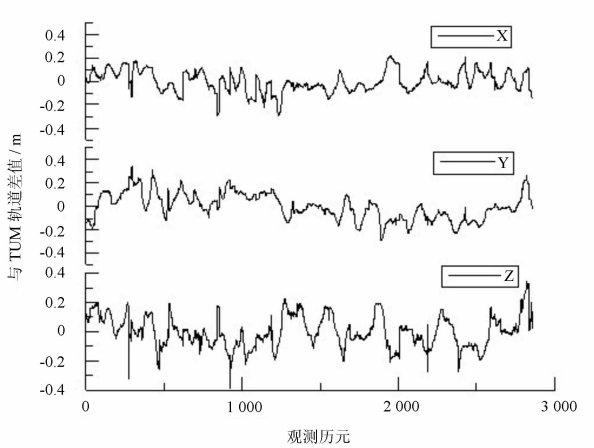


图 6 根据 IGS 站估计的结果对 CHAMP 卫星定轨的结果

Fig. 6 Results of the CHAMP orbit determination using clock bias by estimation of IGS

5 结论

本文通过具体算例比较多种精密卫星钟差插值方法的优缺点,并验证插值误差对低轨卫星定轨精度的影响,可得到如下结论:

1) GPS 卫星钟呈现高频率抖动,但在 GPS 接收机采样间隔内(例如 30 s)其变化是平稳的,从卫星钟变化的这一特性而知,可以利用一般 GPS 地面跟踪站的观测数据估计 30 s 间隔的 GPS 卫星钟差,然后用多项式拟合或内插的方法再将精密卫星钟差插值到用户所需间隔。

2) 用内插和拟合得到的高采样率的卫星钟差精度可达 0.15 ~ 1.5 ns,因此可应用于精密单点定位。在插值卫星钟差时,内插方法明显优于拟合方法,而且在内插方法中样条函数内插最为优异。

3) 从不同方法插值的卫星钟差对低轨卫星定轨的结果可以看出,根据 IGS 站估计的 30 s 定轨结果最好,根据 5 分钟内插 30 s 钟差定轨结果次之,而根据 15 分钟插值结果定轨最差。

4)利用地面 GPS 跟踪站观测数据估计 GPS 卫星钟差,精度可达 0.1 ~0.3 ns,将其应用于 CHAMP 卫星定轨时,定轨精度优于 10 cm 。

References

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.

1 Liu Jingna and Ye Shirong. GPS precise point using undifferenced phase observation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan Univeysity, 2002,27(3): 234 ~240. (in Chinese)

2 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.

2 Liu Dajie and Tao Benzao. Practical methods of surveying data processing[M]. Beijing : Publishing House of Surveying and Mapping ,2000. (in Chinese)

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.

3 Han Baomin and Ou Jikun. Precise point positioning based on undifferenced GPS data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan Univeysity, 2003,28(4):409 – 412. (in Chinese)

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

4 Zhou Zhongmo, Yi Jiejun and Zhou Qi. Measurement principle and application of GPS satellite[M]. Beijing: Press of Surveying and Mapping,1999. (in Chinese)