

基于 IGS 超快星历的 GPS 钟差线性预报分析

郑作亚^{①②③}, 卢秀山^{②③}, 阳凡林^{②③}

(^①中国测绘科学研究院 大地测量与地球动力学研究所,北京 100039; ^②海岛(礁)测绘技术国家测绘局重点实验室, 山东青岛 266510; ^③山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266510)

【摘要】本文在分析 IGS 超快星历卫星钟差的基础上,首先分析分别采用线性模型和二次多项式模型,利用实际观测值得到的预报值与 IGS 提供的超快预报值进行比较分析。在此基础上,利用实际观测的超快卫星钟差拟合得到线性模型分别预报一天和后两天的钟差,分别利用第一天和第二天的实际钟差观测资料拟合得到的线性模型预报第三天的卫星钟差,并与 IGS 最终钟差产品进行比较分析。得出一些有益的结论与同行商榷。

【关键词】IGS; 超快星历; GPS 钟差预报; 线性模型

【中图分类号】P228

【文献标识码】A

【文章编号】1009-2307(2009) 06-0048-03

1 引言

目前,国际 GPS 服务组织(IGS)的几个数据分析中心已经具备提供高精度的 GPS 卫星星历的能力。但都是事后处理结果。IGS 星历产品采用 SP3 格式给出 15min 等时间间隔点上的卫星坐标和卫星钟差,坐标参考基准属于 ITRF 参考框架。其提供的卫星轨道和卫星钟差产品包括^[1]:超快速星历产品(Ultra-Rapid)、快速星历产品(Rapid)和最终产品(Final)3种,它们在精度、时延、更新率和采样率方面是不同的,如表1所示。

表1 GPS 卫星星历和卫星钟差产品质量指标

产品名称	精度	时延	更新率	采样率
超快速星历产品 (外推部分)	轨道 ~10cm 卫星钟差 ~5ns	实时	6h	15min
超快速星历产品 (实测部分)	轨道 <5cm 卫星钟差 ~0.2ns	3h	6h	1min
快速产品	轨道 <5cm 卫星钟差 0.1ns	17h	每天	15min 5min
最终产品	轨道 <5cm 卫星钟差 <0.1ns	13天	每周	15min 5min

从表中可以看出,IGS 提供的卫星最终星历产品,轨道精度能够达到 5cm,卫星钟差的精度优于 0.1ns,这种精度的卫星钟差和轨道,完全能够满足厘米级精度的单点定位要求,但是这个产品要 13 天后才能获取,不能满足实时单点定位的要求。但是由于星载 GPS 卫星钟差预报精度较低,IGS 目前不能提供实时外推的精密卫星钟差。因此,精密的卫星钟差仍然是技术实时应用瓶颈,在 GPS 实时精密单点

定位中,目前常用的 GPS 卫星钟差实时提供的方法是由超快速星历的实际观测值来预报后一天的卫星钟差值,因为超快速星历的实际观测值部分 IGS 网站会日常提供。本文以 2006 年 8 月 14、15 和 16 日的超快卫星钟差资料为例,在分析超快速星历卫星钟差的基础上,首先分析分别采用线性模型和二次多项式模型,利用实际观测值得到的预报值与 IGS 提供的超快预报值进行比较分析。在此基础上,利用实际观测的超快卫星钟差分别预报一天和后两天的钟差,分别利用第一天的观测值和第二天的观测值预报第三天的卫星钟差,并与 IGS 最终钟差产品进行比较分析。

2 IGS 超快星历卫星钟差情况及其预报分析策略

下面从 IGS 网站上取 2006 年 8 月 14 日的 PRN-1、PRN-4、PRN-16 和 PRN-28 等卫星钟差产品为例,分析卫星钟差的最终值、实际观测部分超快钟差信息和预报部分超快钟差信息等之间的关系。如下图 1-4 中自上而下,第一个子图为卫星钟差的最终值、卫星钟差超快产品中的实际观测部分和预报部分信息,第二个子图为实际观测值与最终产品的差值,第三个子图为预报部分与最终产品的差值。

1) 超快速星历卫星钟差

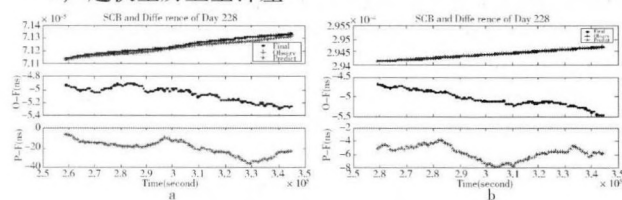


图1 PRN-1(a)和 PRN-4(b)卫星钟差最终值、观测值和预报值及其残差

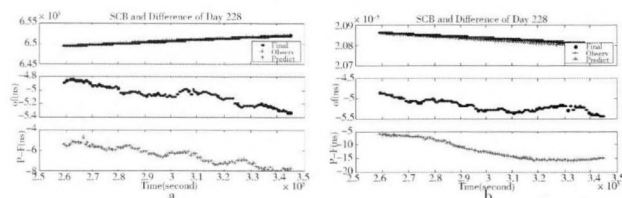
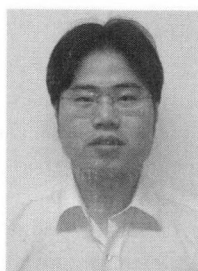


图2 PRN-16(a)和 PRN-28(b)卫星钟差最终值、观测值和预报值及其残差

从图1图2中可以看出,实际观测部分的卫星超快钟差与最终值之间的差值 1ns 以内,但是预报部分的卫星超



作者简介:郑作亚(1978-),男,博士,副教授,分别于1999年、2002年获山东科技大学工学学士、硕士学位,2005年3月获中国科学院研究生院天体测量与天体力学理学博士学位,主要从事:GNSS 定位/定轨与导航及其应用,空间大地测量和地球动力学方面的研究。

E-mail: caszyy@gmail.com

收稿日期:2009-09-18

基金项目:国家自然科学基金(40904001);中国博士后科学基金项目(20080440049);国家测绘局重点实验室基金项目(2009A01)

快钟差与最终值之间的差值超过 5ns，因此，卫星钟差超快产品中，实际观测卫星钟差的精度远远大于预报部分的精度，基于这个现状，我们尝试了以实际观测卫星钟差为原始数据，分别构建线性模型和二次多项式模型进行卫星钟差预报。

2) 预报分析策略

目前，已经有许多学者和专家深入研究了提高卫星钟差精度的方法和手段^[2-4]，并且取得了显著效果，JPL 已经可以提供 30s 的卫星钟差产品，现在常用的钟差预报模型主要有：线性模型、二阶多项式模型和高阶多项式模型，其中又以二阶多项式最为常用，通过分析表明^[5-8]：利用二次多项式模型进行卫星钟差预报存在一定的局限性。从二次多项式模型公式可以看出，卫星钟差是时间函数，其误差积累会随着预报时间的延长而增大。另外，二次多项式模型易受多项式拟合的阶数和已知（观测）数据的个数等人为因素的影响。IGS 的超快预报星历是由 8 个数据处理中心在各自算法基础上加权平均得到的^[9]。

作者在分析了线性模型、二次多项式模型以及附有指数系数的灰色模型基础上，较深入分析了线性模型、二次多项式模型的超快星历卫星钟差预报，预报策略为：

- ①首先分别采用线性模型和二次多项式模型利用第一天 PRN-1、PRN-4、PRN-16、PRN-28 卫星的观测资料预报后两天的 GPS 卫星钟差，并与超快星历中的卫星钟差进行比较分析；
- ②利用第一天的钟差观测资料分别预报后面第二天、第三天的卫星钟差，并与超快星历中提供的最终卫星钟差值进行比较分析；
- ③分别利用第一天的和第二天的超快星历卫星钟差观测值预报第三天的卫星钟差，并与超快星历中提供的最终卫星钟差值进行比较分析；
- ④利用第一天和第二天的超快星历卫星钟差观测值资料作为原始值，利用线性模型预报第三天的卫星钟差，并与超快星历中提供的最终卫星钟差值进行比较分析。

3 利用第一天观测资料分别预报后两天的钟差精度分析

同样以 2006 年 8 月 14 日的 PRN-1、PRN-4、PRN-16、PRN-28 等卫星的观测资料为例，分析 IGS 提供的超快钟差预报产品、线性预报值以及二次多项式预报值与最终值的残差，并进行精度分析。

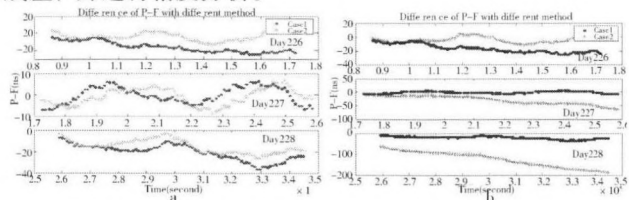


图 3 PRN-1 卫星的线性模型和二次拟合模型预报与超快星历中预报钟差的比较

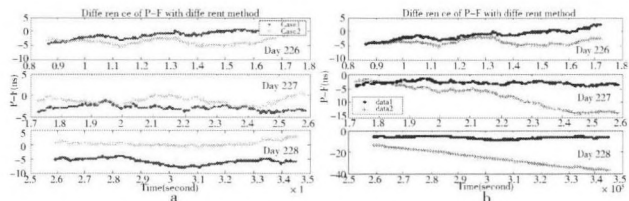


图 4 PRN-4 卫星的线性模型和二次拟合模型预报与超快星历中预报钟差的比较

图 3 至图 6 中，case1 表示 IGS 提供超快卫星钟差预报值与最终值的差值，图 a 中 case2 表示线性预报值与最终值

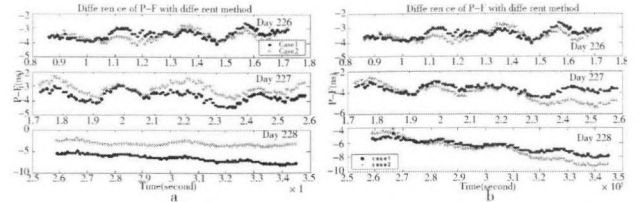


图 5 PRN-16 卫星的线性模型和二次拟合模型预报与超快星历中预报钟差的比较

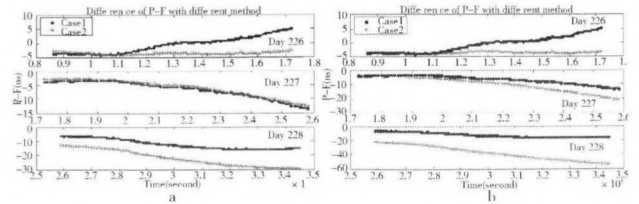


图 6 PRN-28 卫星的线性模型和二次拟合模型预报与超快星历中预报钟差的比较

的差值，图 b 中 case2 表示二次多项式预报值与最终值的差值。

表 2 部分卫星超快星历、线性模型和二次拟合模型预报残差统计

	PRN-1			PRN-4		
	Day 226	Day 227	Day 228	Day 226	Day 227	Day 228
超快星历	21.9247	3.9460	27.7844	2.5640	3.4698	6.8488
线性	8.3891	4.7875	21.4627	4.6918	2.1116	1.1722
二次	7.9326	44.8457	164.8305	4.5871	11.6616	44.1853
	PRN-16			PRN-28		
超快星历	3.6932	4.0137	7.3213	3.3994	9.4970	15.4803
线性	3.8616	3.5256	3.6957	4.1122	9.0569	27.8530
二次	3.8640	4.8267	8.4280	4.0021	15.2759	48.0587

从上述图 3 至图 6 和表 2 中可以看出，以超快星历中第一天的实际观测卫星钟差值作为原始数据，在第一天的拟合中，线性模型和二次多项式模型预报精度相当，并且与超快星历产品中预报部分的精度相近，但是随着预报时间的增长，第二天、第三天的二次多项式模型预报精度明显降低，而线性模型预报精度相对比较稳定，一直与超快星历产品中预报部分的精度相近，而且部分卫星的第二天、第三天线性预报精度高于超快星历产品中预报部分的精度。基于这样的分析，下面我们以前线性预报模型为基础，分析不同原始资料、预报不同时间长度等值的预报精度。

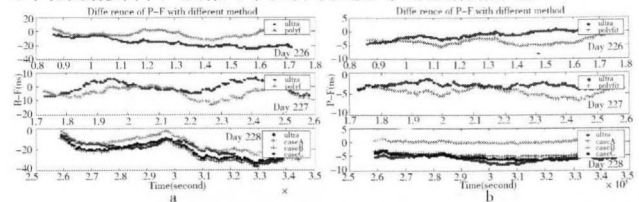


图 7 PRN-1 (a) 和 PRN-4 (b) 卫星钟差分别用第一天和第二天预报第三天的钟差情况

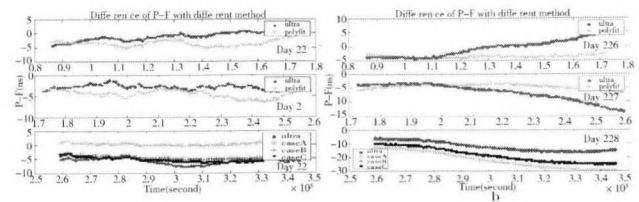


图 8 PRN-16 (a) 和 PRN-28 (b) 卫星钟差分别用第一天和第二天预报第三天的钟差情况

4 分别利用前两天观测资料预报第三天钟差精度分析

表 3 分别用第一天和第二天预报第三天的钟差预报情况统计

	PRN-1			PRN-4		
	Case A	Case B	Case C	Case A	Case B	Case C
Day 226	Day 227	Day 226 - 227	Day 226	Day 227	Day 226 - 227	Day 228
Day 228	Day 228	Day 228	Day 228	Day 228	Day 228	Day 228
超快星历	27.7844	27.7844	27.7844	6.8488	6.8488	6.8488
线性	21.4627	31.5842	29.0228	1.1722	5.1533	6.0899
	PRN-16			PRN-28		
超快星历	7.3213	7.3213	7.3213	15.4803	15.4803	15.4803
线性	3.6957	7.0422	6.5790	27.8530	15.7024	23.3813

图 7 图 8 中, ultra 表示超快卫星钟差预报值; polyfit 表示线性拟合; case A 表示用第一天卫星钟差观测资料拟合得到的线性模型预报第三天的情况; case B 表示用第二天卫星钟差观测资料拟合得到的线性模型预报第三天的情况; case C 表示用前两天卫星钟差观测资料拟合所得模型预报第三天的情况。

从图 7、图 8 和表 3 中可以看到, 三种预报情况从预报精度而言没有明显的规律性^[10], 但是采用前两天的卫星钟差观测资料拟合得到的线性模型比较稳定, 但精度没有明显改善, 整体而言, 采用前一天资料得到的线性模型预报后一天的钟差值, 预报精度略高。但是, 总的来说, 利用线性模型和二次多项式模型预报 24h 以后的钟差值, 预报精度都比较低, 仅能满足一般导航和低精度定位要求。

5 结束语

在 GPS 实时精密单点定位中, 能否得到高精度的卫星钟差外推或预报值仍然是精密单点定位技术实时应用的关键技术, 对于 GPS 卫星钟差的预报问题, 已经有很多学者提出一些预报或外推方法, 得到一些有益的成果, 本文在超快钟差产品基础上, 以 2006 年 8 月 14、15 和 16 日的超快卫星钟差资料为例。首先, 分析超快卫星钟差产品中实际观测部分和预报部分的精度情况(与最终产品比较), 表明: 实际观测部分的卫星超快钟差与最终值之间的差值 1ns 以内, 但是预报部分的卫星超快钟差与最终值之间的差值超过 5ns, 卫星钟差超快产品中, 实际观测卫星钟差的精度远远大于预报部分的精度; 其次, 分析分别采用线性模型和二次多项式模型, 利用实际观测值得到的预报值与 IGS 提供的超快预报值进行比较分析, 得出随着预报时间的增长, 第二天、第三天的二次多项式模型预报精度明显降低, 而线性模型预报精度相对比较稳定, 一直与超快星历产品中预报部分的精度相近; 最后, 利用实际观测的超快卫星钟差分别预报后一天和后两天的钟差, 分别利用第一天的

观测值和第二天的观测值预报第三天的卫星钟差, 并与 IGS 最终钟差产品进行比较分析, 得出预报精度没有明显的规律性, 但是采用前两天的卫星钟差观测资料拟合得到的线性模型比较稳定, 但精度没有明显改善, 整体而言, 采用前一天资料得到的线性模型预报后一天的钟差值, 预报精度略高。但是, 总的来说, 利用线性模型和二次多项式模型预报 24h 以后的钟差值, 预报精度都比较低, 仅能满足一般导航和低精度定位要求。

参考文献

- [1] Guochang Xu. GPS Theory, Algorithms and Applications [Z]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003.
- [2] V Broderbauer, R Weber. Results of Modeling GPS Satellite Clocks [J]. *osterr. Z. Vermess. Geoinfo.* 2003, 91(1): 38-47.
- [3] A I Dounis, P Tiropanis, D Tseles, et al. A comparison of Grey Model and Fuzzy Predictive Model for Time series [J]. *International Journal of Computational Intelligence*, Volume 2 Number 3, 2005 ISSN, 1304-4508.
- [4] <http://igsch.jpl.nasa.gov/components/prods.html> [EB/OL].
- [5] 郑作亚, 陈永奇, 卢秀山. 灰色模型修正及其在实时 GPS 卫星钟差预报中的应用研究 [J]. *天文学报*, 2008, 49(3).
- [6] 郑作亚, 卢秀山. 几种 GPS 卫星钟差预报方法比较及精度分析 [J]. *山东科技大学学报(自然版)*, 2008, 27(4).
- [7] 郑作亚, 党亚民, 卢秀山, 等. 利用 IGS 超快星历中观测资料预报卫星钟差初步分析 [J]. *测绘科学*, 2010, 35(2).
- [8] Zuoya ZHENG, Yongqi CHEN, et al. Primary Analysis of GPS Satellite Clock Bias Prediction with Observations from IGS Ultra-rapid Products [R]. FIG2007, 7-12, May, Hong Kong.
- [9] ZHENG Zuoya, CHEN Yongqi, LU Xiushan, An Improved Grey Model and its Application Research on the Prediction of Real-time GPS Satellite Clock Errors [J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2009, 33(1).
- [10] 徐维梅. 精密单点定位中 GPS 卫星钟差内插与预报研究 [D]. 青岛: 山东科技大学硕士论文, 2009-07.
- [11] 郑作亚, 徐维梅, 卢秀山. 基于递推遗忘因子最小二乘法的 GPS 卫星钟差预报 [R]. 全球华人定位导航协会年会(ITMGNSS 2009), 北京, 2009-08-07 ~ 09.

Analysis on GPS satellite clock error linear prediction from IGS ultra-rapid products

Abstract: Based on the analysis on IGS ultra-rapid satellite clock error, we compare the predictions predicted by linear model and quadratic polynomial model to the predictions from IGS ultra-rapid product, and then, predict the succeeding day and the next two-days with linear model fitted by observed satellite clock error from IGS ultra-rapid product, at the same time, predict the third day's satellite clock error with linear model fitted by the front continuous two-days observed ones from IGS ultra-rapid product, at last, we get some helpful conclusions to discuss with relative scholar.

Key words: IGS; ultra-rapid ephemeris; GPS; clock error prediction; linear model

ZHENG Zuo-ya^{①②③}, LU Xiu-shan^{②③}, YANG Fan-lin^{②③} (①Institute of Geodesy and Geodynamics, Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China; ②Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef of SBSM, Qingdao 266510, China; ③Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)