

Satellite Orbit and Clock Error Correction Model Research Based on Broadcast Ephemeris

Mao Li^{1,2}, Junping Chen², Congwei Hu¹, Xiao Yin¹

1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai, China

2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, Shanghai, China

1. limao.tju@gmail.com, 2. junping.chen@shao.ac.cn, 3. cw.hu@tongji.edu.cn, 4. yinxiaotongji@163.com

Abstract: To analyze the broadcast ephemeris error, GPS broadcast ephemeris is compared with the precise ephemeris. The results show that all GPS satellites broadcast ephemeris' orbit errors have a linear correlation with time in a short term (1 hour). Taking into account the linear correlation and based on the broadcast ephemeris, a model is proposed to correct the satellite orbit and clock bias error using the multi-epoch observations from the ground stations (IGS stations). The analyses show that the maximum error in this correction model does not exceed 0.5m. Theoretically, this model can improve the accuracy of the geometric orbit determination results. Furthermore, it can also provide a reference for COMPASS wide area augmentation system's satellite orbit and clock error correction.

Keywords: Broadcast ephemeris error; Correction model; Geometric orbit determination

基于广播星历的卫星轨道及钟差改正模型研究

李茂^{1,2}, 陈俊平², 胡丛玮¹, 尹潇¹

1. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海, 中国, 200092

2. 中国科学院上海天文台, 上海, 中国, 200030

1. limao.tju@gmail.com, 2. junping.chen@shao.ac.cn, 3. cw.hu@tongji.edu.cn, 4. yinxiaotongji@163.com

【摘要】通过对GPS广播星历与精密星历的比较分析,结果表明所有GPS卫星在短期内(1小时),广播星历卫星轨道误差与时间近似满足线性相关的关系。考虑到这一线性关系,提出了一种以广播星历为基础,利用地面测站(IGS基准站)的多历元观测数据进行卫星轨道及钟差改正的模型。利用线性关系进行拟合后的最大误差不超过0.5m,并且依据这一线性关系理论上可提高以地面观测值为基础的几何法定轨结果的精度,也可北斗广域差分系统的卫星轨道及钟差的改正提供参考。

【关键词】广播星历误差;改正模型;几何法定轨

1 引言

广播星历是一种由卫星导航系统提供给用户计算卫星位置信息的实时预报星历,根据跟踪站观测资料确定后,拟合成星历参数定期上传至卫星。文献[1-2]分别对近年来的GPS广播星历轨道的精度进行了长期的统计分析。经过多年的发展,现阶段的GPS广播星历的轨道精度已经达到2m,钟差精度达到10ns左右^[2-3]。但目前这一精度仍然无法满足精密定位的需求。GPS可利用精密星历实现精密定位,对于现阶段不提供精密星历的COMPASS卫星系统,则需要考虑其他方法进行卫星轨道及钟差改正。COMPASS卫星系统的广播星历与GPS系统具有一定的相似性^[4],通过对于GPS的卫星轨道及钟差改正研究可为北斗系统提供指导。

不同于直接利用每组GPS广播星历作为观测值进行广播星历改正^[5],几何定轨法利用地面跟踪网的观测数据进行定轨^[6]。该方法不依赖于任何力学模型,不需要进行数值积分。其设计原理简单,但传统的几何法求算精度较差,不能有效提高广播星历的精度。

基于上述背景,本文通过对GPS广播星历的误差分析,得出广播星历误差与时间(短期)存在的关系。考虑到这一关系,以地面测站观测值和几何定轨法为基础,推导了利用广播星历改正卫星轨道及钟差的计算公式,明确这一改正模型的设计流程与计算方法。

2 广播星历误差分析策略

IGS精密星历提供了15min等间隔的卫星位置,其位置精度已优于5cm,因此可将IGS精密星历的卫星位置视作真值,广播星历与事后精密星历卫星位置的差

资助信息:中科院百人计划;国家高技术研究发展计划(863计划,2013AA122402);国家自然科学基金(11273046,40974018);上海市科学技术委员会(12DZ2273300,13PJ1409900)

值即为GPS广播星历的轨道误差。需要明确的是,IGS精密星历的提供的是卫星质心的位置信息,因此需要进行到卫星天线相位中心的改正,NGA(National Geospatial-Intelligence Agency)提供了相对IGS更高精度的天线改正^[7]。本文利用NGA提供的结果进行天线相位中心改正。

IGS精密星历同时也提供了卫星钟差,但为了保证钟差的准确性,采用CODE中心精密钟差文件作为真值与广播星历比较,两者的差值即为GPS广播星历的钟误差。

由于利用几何定轨法进行改正模型构建的需要,在对卫星轨道误差进行分析时,不需旋转到卫星轨道坐标系的径向(R)、切向(T)、法向(N)三个方向进行分析。

3 广播星历轨道及钟误差分析

为了较为全面反映所有GPS卫星的星历差异。依次在GPS星座的6个轨道面上各取1颗卫星进行分析,其中3颗BLOCK IIA卫星(PRN01、PRN03、PRN08),3颗BLOCK IIR卫星(PRN16、PRN18、PRN21)。

3.1 单天广播星历误差分析

计算2013-08-31单天的广播星历误差在WGS-84坐标系下X、Y、Z方向上的分量及钟差dt。以PRN21卫星为例,绘制了广播星历的误差曲线图(见图1)。图中,横轴表示小时数,纵轴代表轨道误差值,单位为m。其他卫星广播星历误差大致符合这一误差曲线。

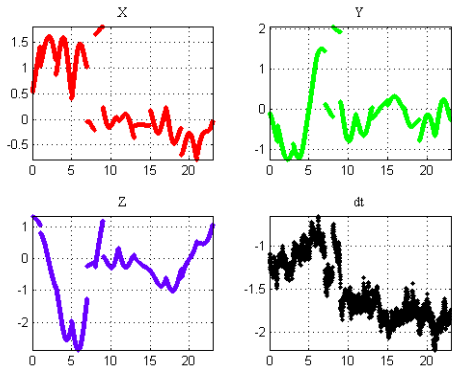


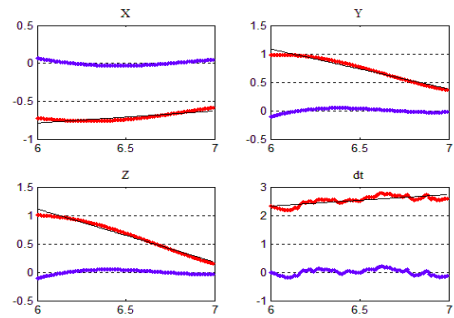
Figure 1. Single-day Broadcast Ephemeris Orbit and Clock Error of PRN21

图1 PRN21卫星的单天广播星历轨道及钟误差曲线

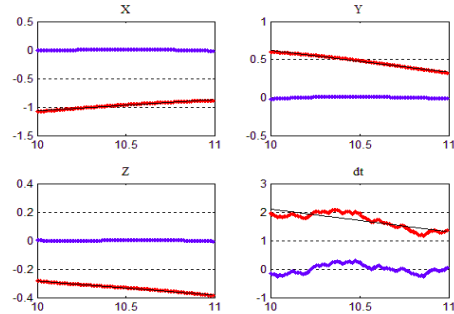
图1表明,在误差曲线的X、Y、Z方向的局部表现出一定的线性关系。

3.2 短期内广播星历误差拟合

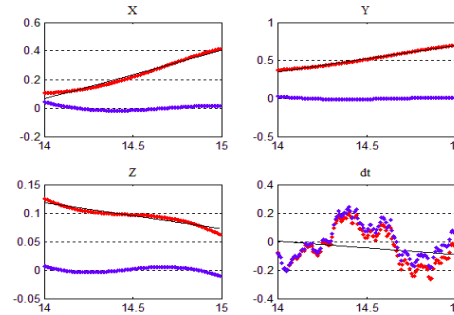
为验证前文提及的线性关系,针对选取的六颗GPS卫星进行短期的误差分析,通过不同时间段的误差曲线的比较,在整点时间间隔为1h时表现出较强的线性关系。以PRN03、PRN21的6:00-7:00,10:00-11:00,14:00-15:00,18:00-19:00四个时段为例,绘制了广播星历误差线性拟合曲线(见图2)。图中,横轴单位为小时,纵轴单位为m。红线表示广播星历误差曲线;黑线表示对该段广播星历误差进行线性拟合的结果;蓝线表示拟合值(黑线)与广播星历误差(红线)的差值。



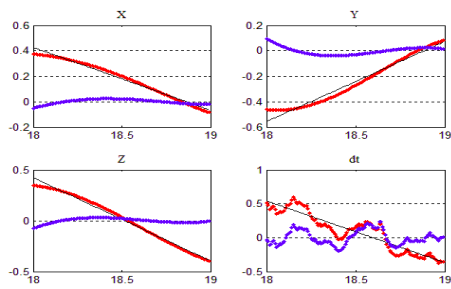
(a) PRN03 (Block IIA) 06:00-07:00



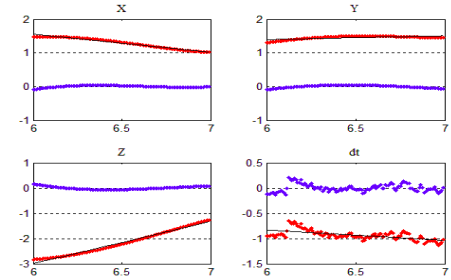
(b) PRN03 (Block IIA) 10:00-11:00



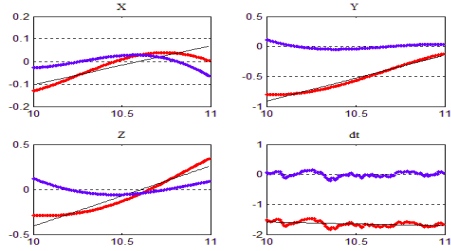
(c) PRN03 (Block IIA) 14:00-15:00



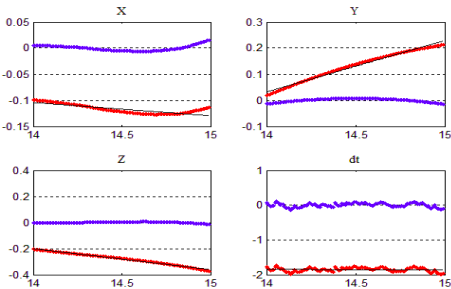
(d) PRN03 (Block IIA) 18:00-19:00



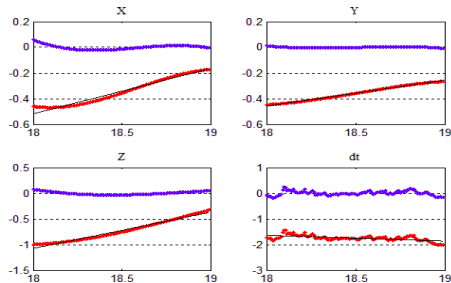
(e) PRN21 (Block IIR) 06:00-07:00



(f) PRN21 (Block IIR) 10:00-11:00



(g) PRN21 (Block IIR) 14:00-15:00



(h) PRN21 (Block IIR) 18:00-19:00

Figure 2. Broadcast Ephemeris Error Linear Fitting and Fitting Error in Two Periods of PRN02 and PRN21

图2 PRN02、PRN21 四个时段广播星历误差的线性拟合及拟合的误差

通过对所有卫星各个时段(1h为一个时段)进行比较分析,在短期内进行线性拟合,其拟合后的误差均不超过0.5m,且线性拟合的最大误差均出现在钟差上。现以PRN21卫星为例,分析短期内进行线性拟合后的广播星历误差,绘制了单天的广播星历轨道及钟误差曲线(见图3)。

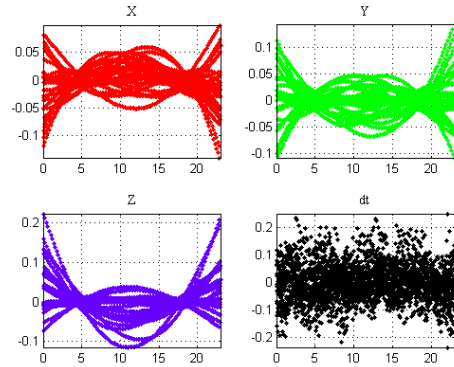


Figure 3. Single-day Broadcast Ephemeris Orbit and Clock Error of PRN21 after Short-term Fitting

图3 拟合后的PRN21卫星的单天广播星历轨道及钟误差曲线

通过对图1与图3的误差结果进行比较,拟合后的广播星历误差有明显提高。误差最大值从2m减小到0.2m。为了全面反映短期内对广播星历进行线性拟合的精度。统计了这6颗卫星全天进行线性拟合误差,并绘制各卫星广播星历拟合的RMS的分布图(见图4)。

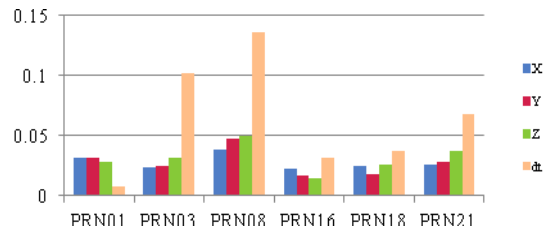


Figure 4. Single-day Broadcast Ephemeris Linear Fitting RMS Statistics

图4 单天广播星历误差线性拟合的RMS统计(单天结果由24个小时的拟合结果得到)

由于PRN03、PRN08属于搭载铯钟的卫星,短期稳定性表现较差,所有RMS结果表现较差。从统计的结果来看,进行线性拟合的误差的RMS不超过0.15m。

4 轨道及钟差改正模型的建立

由前一节可知,短期内广播星历误差线性拟合误差较小。因此可利用地面IGS测站的多历元观测数据,并结合几何法定轨建立轨道及钟差改正模型。图5为

几何法定轨原理图。

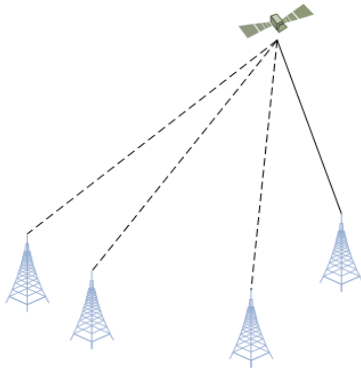


Figure 5. Geometric Orbit Determination Schematics

图5 几何法定轨原理示意图

与地面单点定位类似，几何法的观测方程为（观测值以伪距为例）：

$$P = r + c(dt_r - dt_s) + I + T + \varepsilon_p \quad (1)$$

其中， P 为伪距观测值； dt_r 为接收机钟差； dt_s 为卫星钟钟差； I 为电离层延迟改正； T 为对流层延迟改正； ε_p 为多路径及其他误差； r 为几何距离。且有

$$r^2 = (x_s^i - x_r^i)^2 + (y_s^i - y_r^i)^2 + (z_s^i - z_r^i)^2 \quad (2)$$

(x_r^i, y_r^i, z_r^i) 为测站坐标， (x_s^i, y_s^i, z_s^i) 为卫星坐标。

对于观测方程(1)式中的一些待定值可采用如下方式进行处理：

- (1) CODE 中心提供的 5s 的钟差文件(卫星钟差 5s 一组，接收机钟差 5min 一组)，接收机钟差在该历元时刻精度高，因此可用于进行接收机钟差 dt_r 的固定；
- (2) IGS 中心的 SINEX 文件提供了高精度的 IGS 测站坐标 (x_r^i, y_r^i, z_r^i) 信息；
- (3) 采用双频观测值的无电离层组合可消去电离层延迟；
- (4) 采用萨斯塔莫宁模型等对流层模型可有效消去对流层延迟的影响。

利用上述处理策略可推算卫星坐标及钟差。

需要注意的是，当利用观测文件的观测值反算卫星坐标时，对于同一卫星，不同测站的观测值对应着该卫星的不同发射时刻。为解决这一问题，文献[6]采用高采样率（采样间隔为 1s）观测数据，利用滑动拉式插值的方法得到卫星在同一发射时刻到各测站的外推观测值。由于外推伪距观测值精度不高、接收机钟差未准确固定等原因，得到的卫星位置及钟差结果并不理想。

不理想。

由于广播星历提供了较高精度的卫星位置及钟差，可将广播星历求得各测站观测值对应的卫星信号发射时刻的卫星位置 $(\bar{x}_s^i, \bar{y}_s^i, \bar{z}_s^i)$ 及卫星钟差 \bar{dt}_s 作为初值。每个测站对应的卫星信号发射时刻均利用广播星历求解卫星位置及钟差初值，多个时刻不同观测值叠加进行求解，可解决不同测站对应的发射时刻不统一的问题。广播星历求得的初值后，求解的目标转变为各卫星信号发射时刻的改正量 $(\Delta x_s^i, \Delta y_s^i, \Delta z_s^i, \Delta dt_s^i)$ ，依据上一节分析得出的结论，可在短期内建立各历元间改正量的线性关系进行求解。

则(2)式即为：

$$r^2 = (x_{s_0}^i + \delta_{x_s}^i - x_r^i)^2 + (y_{s_0}^i + \delta_{y_s}^i - y_r^i)^2 + (z_{s_0}^i + \delta_{z_s}^i - z_r^i)^2 \quad (3)$$

其中，

$$\delta_{x_s}^i = \delta_{x_s^0} + a_x \cdot t_i \quad (4)$$

t_i 为卫星发射时刻相对于前一历元时刻的时间

差；对于短期内(1小时)，采用相同的线性模型，则 $\delta_{x_s^0}$ 及 a_x 为未知定值，故短期内(1小时)求解的未知数为：

$$(\delta_{x_s^0}, \delta_{y_s^0}, \delta_{z_s^0}, \delta_{dt_s^0}, a_x, a_y, a_z, a_{dt})^T \quad (5)$$

采用这一观测模型，可利用地面测站的多历元（1小时）的观测数据叠加进行上述8个参数的求解。否则，则需要采用常规解法，针对各个单历元分别进行卫星位置及钟差未知数的求解。理论上讲，若进一步采用相位观测值，利用这一改正模型可大大提高卫星轨道及钟差精度。

5 结语

本文通过对广播星历的轨道误差及钟差分析，并对短期内(1h)的误差进行线性拟合，拟合最大误差不超过0.5m，拟合效果较好。以广播星历作为初值求解卫星轨道及钟差时，可规避不同测站对应的发射时刻不统一的问题。通过考虑短期内(1h)的线性关系进行求解时，未知数数目大大减小的同时，利用多历元的观测值增加观测值数目，可提高卫星位置及钟差结果的精度，进而改正卫星轨道及钟差。这一改正模型的建立，为北斗广域差分系统的卫星轨道及钟差的改正模型的建立提供了指导。

References (参考文献)

[1] LI Zhenghang, DING Wenwu, LI zhao. Error Analysis of Orbit Determined by GPS Broadcast

- Ephemeris[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(1): 50-54.
李征航, 丁文武, 李昭. GPS广播星历的轨道误差分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2008(01): 50-54.
- [2] GUO Fei, ZHANG Xiaohong, LI Xingxing, HU Quan. Precision Analysis on Orbit and Clock of GPS Satellites Broadcast Ephemeris. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(5): 589-592.
郭斐, 张小红, 李星星等. GPS系列卫星广播星历轨道和钟的精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009(05): 589-592.
- [3] Liu Weiping, Hao Jinming, Li Zuohu. Solution Method and Accuracy analysis of Position and Velocity from Broadcast Ephemeris. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(2): 144-147.
刘伟平, 郝金明, 李作虎. 由广播星历解算卫星位置、速度及精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2010(02): 144-147.
- [4] China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document, Open Service Signal (Version 2.0), 2013
- [5] Wang Jiexian, Zhu Wenyao, Shi Yimin, Qu Feng. Improvement of GPS Broadcast Ephemerides Used for Long Baseline and Multi-session Relative Positioning. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1997, 26(2): 140-147.
王解先, 朱文耀, 施一民等. GPS长距离和多测段定位中广播星历的改进方法[J]. 测绘学报, 1997, 26(2): 140-147.
- [6] Zhi Suiqiang. Research on Real-Time Orbit Determination for Navigation Satellite. PLA Information Engineering University, 2012.
智遂强. 导航卫星实时定轨相关技术研究[D]. 解放军信息工程大学, 2012.
- [7] Liang Heng, Grace Xingxin Gao, Todd Walter et al. GPS Signal-in-Space Anomalies in the Last Decade. Proceedings of the ION GNSS 2010, 2010.