

文章编号: 1001- 2486(2010) 02- 0023- 04

星地距离变化对星地双向时间比对的影响及改正^{*}

王 威, 魏立栋, 范国清

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 星地时间同步是卫星导航系统的关键技术, 星地双向时间比对能有效提高星地时间同步的精度。在分析了星地距离变化对星地双向时间比对可引起百纳秒量级误差后, 提出了前后历元观测数据差分改正方法, 通过数学仿真验证该方法能达到纳秒量级精度。

关键词: 星地双向时间比对; 星地钟差; 卫星导航系统

中图分类号: P228 **文献标识码:** A

The Influence and Correction of Satellite-to-ground Range Variation on Two-way Time Comparison between Satellite and Ground Station Clocks

WANG Wei, WEI Li-dong, FAN Guo-qing

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Satellite and ground station time synchronization is the key technology of navigation satellite system. Two-way time comparison method between satellite and ground station clocks can improve the accuracy of satellite and ground station time synchronization effectively. By analyzing the influence of satellite-to-ground station range variation on two-way time comparison, which is the source of hundred nanoseconds error, a method of observe data differential correction was presented. Numerical simulation performed later shows that this method can reach the level of nanosecond precision.

Key words: two-way time comparison between satellite and ground station clocks; bias between satellite and ground station clocks; navigation satellite system

完成导航卫星钟面时与导航系统时的时差测量与计算的方法称为导航卫星时间同步技术。导航卫星时间同步误差直接关系到用户定位精度, 是卫星导航的关键技术^[1]。星地双向时间比对法具有测量数据效率高, 时差测量及修正与卫星位置基本无关, 大气附加延迟残差小等优点^[2]。由于卫星与地面站分别以对秒信号的检测时刻作为时间比对的采样点, 当卫星相对地球高速运动时, 星地间信号传播的路径一般不同^[3], 建立准确的数学模型对信号传播路径差进行修正是取得高精度时间比对最有效方法, 但是很多文献却直接忽略这些误差^[4-7]。对于电离层延迟、对流层延迟等具有对称抵消特性的误差项, 将其忽略对时间同步精度的影响有限, 但是, 对于信号传播几何路径不对称引起的误差, 将其忽略会引起百纳秒量级的时间比对残差。本文对信号传播几何路径不对称误差进行了分析, 提出了一种利用前后历元观测数据差分改正的算法, 仿真计算表明该方法可以有效改正信号传播几何路径不对称引起的误差。

1 星地双向时间比对原理

星地双向时间比对采用“互发互收”的工作方式^[2,8]。地面站 A 与卫星 S 在同一钟面时刻 i 向对方发送各自的时间基准信号 (A_i 和 S_i 脉冲), 同时等待接收来自对方的时基信号。卫星 S 将收到地面站 A 的时基信号 S_{A_i} 作为星上同步终端精密测时单元的起始脉冲, 将星钟的下一个时基脉冲 S_{i+1} 作为终止脉冲, 测得时间间隔 T^S ; 地面站 A 将收到的卫星 S 的时基信号 A_{S_i} 作为地面站同步终端精密测时单元的起

* 收稿日期: 2009- 10- 21

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2007AA12Z307)

作者简介: 王威 (1963-), 男, 教授, 博士生导师。

始脉冲,将站钟的下一个时基脉冲 A_{i+1} 作为终止脉冲,测得时间间隔 T_A ,星地双向时间比对时序如图 1 所示。

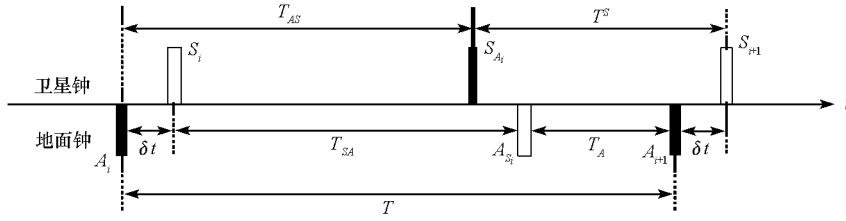


图 1 星地双向时间比对时序图

Fig. 1 The timing diagram of two-way time comparison between satellite and ground clocks

假设卫星时钟与地面站时钟间存在钟差 δ , 时基信号自地面站发射至卫星接收(上行)的传播时延为 T_{AS} , 自卫星发射至地面站接收(下行)的传播时延为 T_{SA} , 通过图 1 可得

$$T_{AS} + T^S = T_{SA} + T_A + 2\delta \quad (1)$$

因此

$$\delta = \frac{T^S - T_A}{2} + \frac{T_{AS} - T_{SA}}{2} \quad (2)$$

式(2)即为星地双向时间比对解算公式。其中 T^S 和 T_A 作为观测量可以直接获得, T_{AS} 和 T_{SA} 是信号在传播路径上的时延, 不能精确测量, 只能通过建立模型予以改正。上/下行信号传播时延的数学模型如下

$$\begin{aligned} T_{AS} &= \tau_{AS}^d + \tau_{AS}^{ro} + \tau_{AS}^{on} + \tau_A^r + \tau_S^R \\ T_{SA} &= \tau_{SA}^d + \tau_{SA}^{ro} + \tau_{SA}^{on} + \tau_S^r + \tau_A^R \end{aligned} \quad (3)$$

将上式带入式(2)得

$$\delta = \frac{T^S - T_A}{2} + \frac{(\tau_A^r + \tau_S^R) - (\tau_S^r + \tau_A^R)}{2} + \frac{(\tau_{AS}^{ro} - \tau_{SA}^{ro}) + (\tau_{AS}^{on} - \tau_{SA}^{on})}{2} + \frac{\tau_{AS}^d - \tau_{SA}^d}{2} \quad (4)$$

上两式中 τ_A^r 、 τ_A^R 和 τ_S^r 、 τ_S^R 分别为地面站和卫星时间同步设备的发射信道与接收信道时延^[2,9], 可通过设备零值标校确定, 对于其漂移部分可通过控制同步设备环境温度、增加时差测量信道滤波器带宽等手段抑制^[2]。

τ_{AS}^{ro} 和 τ_{SA}^{ro} 分别为上行信号和下行信号在传播路径上由对流层效应引起的附加延迟, 可通过对流层延迟改正模型计算得到。考虑到双向法上行信号和下行信号的传播路径具有对称性, 对流层时延通过上下行两条路径相减能够得到很好的消除, 它引起的不对称部分一般不再考虑^[10]。

τ_{AS}^{on} 和 τ_{SA}^{on} 分别为上行信号和下行信号在传播路径上由电离层效应引起的附加延迟, 受传播路径和信号频率的共同影响。考虑到双向法上行信号和下行信号的传播路径具有对称性, 当上下行信号频率相差不大时(例如下行频率为 1.26GHz, 上行信号频率为 1.34GHz), 差分后电离层时延残余小于 1ns, 是否需要改正该项误差可根据精度需求而定, 改正模型可参见文献[10]。

τ_{AS}^d 和 τ_{SA}^d 分别为上行信号和下行信号的星地自由空间传播时延, 目前有两种处理方法, 方法一是采用迭代算法精确计算 τ_{AS}^d 和 τ_{SA}^d ^[10], 这种方法计算钟差的精度可达百皮秒量级, 但是必须已知卫星位置, 计算复杂; 方法二认为上、下行信号传播时间接近, 信号频率接近, τ_{AS}^d 和 τ_{SA}^d 差值很小, 可以近似相等^[7-10], 这种方法计算简单, 计算钟差精度可达百纳秒量级。

可见, 在 τ_A^r 、 τ_S^R 、 τ_S^r 和 τ_A^R 等参数可以标定, τ_{AS}^{ro} 和 τ_{SA}^{ro} 可以抵消, τ_{AS}^{on} 和 τ_{SA}^{on} 影响不大的情况下, 决定钟差解算精度的主要因素就是 τ_{AS}^d 和 τ_{SA}^d 。处理 τ_{AS}^d 和 τ_{SA}^d 的两种方法各有优劣, 如何扬长避短, 既具有前者的精度, 又具有后者的简便, 是个值得探索的问题。

2 星地距离变化的影响及改正

为方便讨论, 假设 τ_A^r 、 τ_S^R 、 τ_S^r 、 τ_A^R 、 τ_{AS}^{ro} 、 τ_{SA}^{ro} 、 τ_{AS}^{on} 和 τ_{SA}^{on} 等参数通过各种方法已经确定, 不妨都设为零, 因而, 式(4)可写为

$$\delta = \frac{T^S - T_A}{2} + \frac{\tau_{AS}^d - \tau_{SA}^d}{2} \quad (5)$$

按照前述方法二 τ_{AS}^d 和 τ_{SA}^d 近似相等的假设, 则有

$$\delta \approx \frac{T^S - T_A}{2} \quad (6)$$

在此种假设下, 解算钟差时必然引入误差 ε :

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(\tau_{AS}^d - \tau_{SA}^d \right) \quad (7)$$

假设卫星 S 与地面站 A 之间距离为 $R(t)$, 距离变率为 $R'(t)$ 。

t_0 时刻, S 向 A 发出时基信号, 经历时延 $\tau_{sa} = R(t_0)/C$ 后, 信号到达 A , $R(t_0)$ 表示下行信号传播距离, C 为光速。

t_0 时刻, A 也向 S 发出时基信号, 经历时延 $\tau_{as} = R(t_0 + \tau_{as})/C$ 后, 信号到达 S , $R(t_0 + \tau_{as})$ 表示上行信号传播距离。

上/下行信号传播距离存在以下近似关系:

$$R(t_0 + \tau_{as}) \approx R(t_0) + R'(t_0) \cdot \tau_{as} \quad (8)$$

即

$$\tau_{as} - \tau_{sa} = \frac{R(t_0 + \tau_{as}) - R(t_0)}{C} \approx \frac{R'(t_0) \cdot \tau_{as}}{C} \quad (9)$$

因此, 在方法二假设下, 时间比对的信号路径传播延迟误差为

$$\varepsilon = \frac{R'(t_0) \cdot \tau_{as}^d}{2C} \quad (10)$$

以某地面站 P (地固坐标系中坐标为: $-2\ 160\ 038.96\text{m}$, $4\ 383\ 291.37\text{m}$, $4\ 085\ 391.67\text{m}$) 对某颗 MEO 导航卫星 S (历元 2008-5-1 00:00:00 惯性坐标系中的位置、速度为: 0m , $-15\ 839\ 074.33\text{m}$, $-22\ 620\ 542.43\text{m}$, 3799.26m/s , 43.58m/s , 62.24m/s) 进行时间同步观测为例, 在观测期间 (2008-5-1 01:56:09 ~ 2008-5-1 09:36:09) 计算星地间几何距离 $R(t)$ 和几何距离的变率 $R'(t)$, 以及信号传播时延 $\tau(t)$, 利用式 (10) 计算星地间几何距离的变率引入的理论误差 ε 。星地距离 $R(t)$ 以及 ε 随时间变化曲线如图 2 所示。

可见随着星地距离的变化, ε 也随之变化, 变化规律与卫星相对地面的飞行状态相关: 在时刻 4:54:04 之前, 卫星接近地面站飞行, 理论误差为负, 并逐渐增加到 0; 在时刻 4:54:04 之后, 卫星远离地面站飞行, 理论误差为正, 并逐渐增大。理论误差绝对值在几百纳秒以内。如此大的误差对卫星导航系统来说是不能忍受的, 必须对 ε 进行改正。

设想如果能够利用观测数据计算得到 ε 或 ε 的估计值 $\hat{\varepsilon}$, 那么就能达到对误差进行改正的目的:

$$\delta \approx \frac{T^S - T_A}{2} + \hat{\varepsilon} \quad (11)$$

前已述及星地双向时间比对法具有测量数据效率高的优势, 每秒钟都可获得一组观测数据, 利用前后历元观测数据差分即可计算星地间几何距离变率 R' , 进而可计算得到 ε , 从而对钟差进行改正。

由图 1 可得

$$T^S = T + \delta - T_{AS} \quad (12)$$

$$T_A = T - \delta - T_{SA}$$

其中 T 代表一个秒脉冲周期。两式相加得

$$T_{AS} + T_{SA} = 2T - (T^S + T_A) \quad (13)$$

考虑到前文对各参数的假设, 进一步由式 (13) 可得星地间自由空间传播延迟:

$$\tau^d = T - \frac{T^S + T_A}{2} \quad (14)$$

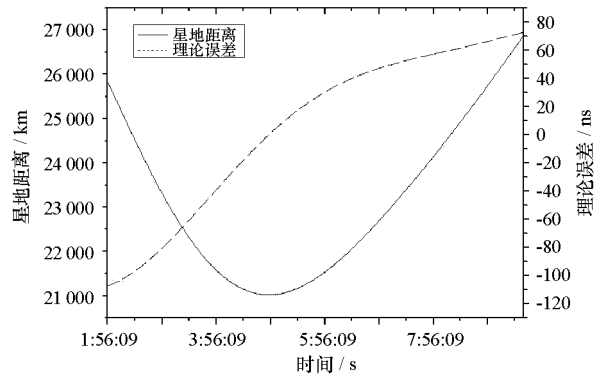


图 2 星地距离及 ε 的时变曲线

Fig. 2 Time variation chart of satellite-to-ground range and ε

因此,星地距离近似为

$$R = C \cdot \tau^d \quad (15)$$

由相邻时间 i 和 $i+1$ 的两组星地距离差分可得星地距离变率为

$$R \approx \frac{C(\tau_{i+1}^d - \tau_i^d)}{T} \quad (16)$$

星地距离变化引入误差的改正值为

$$\varepsilon = \frac{(\tau_{i+1}^d - \tau_i^d) \cdot \tau_i^d}{2T} \quad (17)$$

将式(17)带入式(11)就得到利用前后历元观测数据差分改正星地双向时间比对的计算公式:

$$\hat{\alpha} \approx \frac{T^S - T_A}{2} + \frac{(\tau_{i+1}^d - \tau_i^d) \cdot \tau_i^d}{2T} \quad (18)$$

差分改正方法会增加 T^S 、 T_A 测量噪声对钟差计算精度的影响,但考虑到 T^S 、 T_A 的测量噪声量级较小,一般为零点几个纳秒^[11],相对于方法二的百纳秒量级误差可以忽略不计。

3 仿真验证

同样以前述卫星与地面站为例,仿真生成卫星和地面站各自的时间比对观测数据。观测数据的仿真原理与一般 GPS 信号模拟器中理论数据的仿真原理相同^[12]。分别采用两种钟差计算方法计算星地钟差,一种是基于方法二的假设按公式(6)计算钟差,将理论钟差(即仿真观测数据时添加的理论钟差)减去计算得到的钟差得图 3(a);第二种采用前后历元观测数据差分改正算法(式(18))计算钟差,将理论钟差减去计算得到的钟差得图 3(b)。

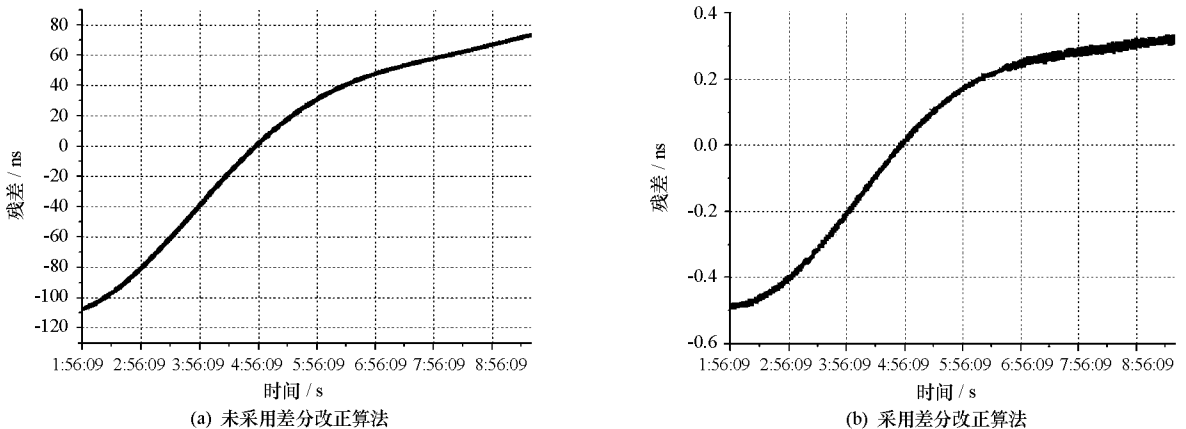


图 3 星地双向时间比对钟差残差

Fig. 3 Residual error of two-way time comparison between satellite and ground clocks

从图 3 可以看出未做差分改正的钟差残差为百纳秒量级,而经过差分算法改正的钟差残差仅为纳秒量级,改正效果显著提高。特别注意到图 3(a) 的残差与图的理论误差具有同样的量级和变化趋势,说明未采用差分改正算法得到的钟差残差与理论上由星地距离变化引起的钟差残差在量级和变化趋势上相符,也说明采用差分改正算法可以显著降低由星地距离变化引入的钟差残差。图 3(b) 中残差的变化趋势仍旧与卫星相对地面站的飞行状态相关,这也说明了建立在诸多假设基础上的差分改正法不能完全消除由星地距离变化引入的误差。

4 结论

本文从星地双向时间比对的原理出发,探讨了一种利用前后历元观测数据差分改正信号传播几何路径不对称误差的新方法,经过理论推导和仿真验证,证明该方法有效可行。该改正算法可满足卫星导航系统预时间同步和快速时间同步的需求,算法简便有效,具有一定的工程使用价值。

(下转第 45 页)

(3) 压力对复合材料吸湿及吸湿试样的剪切强度有明显的影响: 压力升高, 抑制了树脂基体的溶胀, 延缓了 GF/E-51 试件吸湿由 Fick 扩散到非 Fick 扩散的转变, 减轻了溶胀对剪切强度影响。浸泡 60d 后, 剪切强度保留率基本达到平衡, 但在 5atm/30℃水中试件剪切强度保留率比在 1atm/30℃条件下的高 3.97%、比在 1atm/50℃条件下的高 5.17%。

参考文献:

- [1] 陈新文, 许凤和. T300/5405 复合材料吸湿特性研究[J]. 材料工程, 1999(5): 6-8.
- [2] 詹茂盛, 张继华. 单束纤维增强树脂基复合材料的热老化性能研究[J]. 塑料, 2004, 33(4): 62-68.
- [3] 吕小军, 张琦, 马兆庆, 等. 湿热老化对碳纤维/环氧树脂基复合材料力学性能影响研究[J]. 材料工程, 2005, 11: 50-53.
- [4] Carter H G, Kibler K G. Langmuir-type Model for Anomalous Moisture Diffusion in Composite Resins[J]. Compos. Mater., 1978, 12: 118-131.
- [5] Gurtin M E, Yatomi C. On a Model for Two Phase Diffusion in Composite Materials[J]. Compos. Mater., 1979, 13: 126-130.
- [6] Roy S, Xu W X, Park S J, et al. Anomalous Moisture Diffusion in Viscoelastic Polymers: Modeling and Testing[J]. Appl. Mech, 2000, 67: 391-396.
- [7] Springer G S. Moisture Content of Composites Under Transient Condition[J]. Journal of Composite Materials, 1977, 11: 107-122.
- [8] Springer G S. Environmental Effects on Composite Materials[M]. Technomic Publishing Co., 1981.
- [9] 詹茂盛, 张继华. 环氧树脂和双马树脂的热老化及弯曲性能研究[J]. 航空材料学报, 2005, 25(3): 37-44.
- [10] 赵妍嫣, 姜绍通. 羟乙基纤维素与聚丙烯酸钠接枝共聚及其溶胀行为[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4): 101-103.
- [11] 刘建华, 赵亮. 盐雾环境对玻璃纤维增强树脂基复合材料力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2007, 24(3): 18-22.
- [12] 杨亚文. 碳纤维环氧树脂复合材料的吸湿行为[J]. 机械制造, 2005, 43(486): 71-72.
- [13] Botelho E C, Pardini L C, Rezende M C. Evaluation of Hygrothermal Effects on the Shear Properties of Carbon Composites[J]. Materials Science and Engineering A, 2007: 452-453.
- [14] Chiou P, Bradley W L. Effects of Seawater Absorption on Fatigue Crack Development in Carbon/epoxy EDI Specimens[J]. Composites, 1995, 26: 869-876.

(上接第 26 页)

参考文献:

- [1] 谭述森. 导航卫星双向伪距时间同步[J]. 中国工程科学, 2006, 8(12): 70-74.
- [2] 张锁熊. 导航定位星座的时间同步[J]. 电光系统, 2003(1): 3-8.
- [3] 陈祝明, 郭廷源, 江朝抒. 一种 MEO 卫星星地时间同步的新方法[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(1): 33-35, 39.
- [4] 王岗, 李莘, 吴春邦. 星地双向时间比对技术中伪距及其时刻的处理方法[J]. 空间电子技术, 2007(2): 35-39, 56.
- [5] 秦显平, 崔先强, 霍立业. 星地时间比对的原理及实现[J]. 测绘科学与工程, 2006, 26(3): 9-11, 16.
- [6] 钟兴旺, 陈豪. 卫星运动对星间双向法时间同步的影响分析与校正[J]. 中国空间科学技术, 2007(6): 54-58.
- [7] 谭述森. 卫星导航定位工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 163-177.
- [8] Hanson D W. Fundamentals of Two Way Time Transfer by Satellite[R]. Proc. IEEE Freq. Cont. Symp., 1989: 174-178.
- [9] Lee A B, Smith A L, Blair C F. The Accuracy of Two-way Satellite Time Transfer Calibrations[C]//36th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, 2005.
- [10] 刘利, 韩春好. 卫星双向时间比对及其误差分析[J]. 天文学进展, 2004, 22(3): 219-226.
- [11] 张伦. 星地时间同步技术研究[D]. 西安电子科技大学, 2008: 20-25.
- [12] 韩保民, 欧吉坤, 曲国庆. GPS 观测数据的模拟研究[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2005, 30(3): 246-250.