

卫星双向与单向载波联合的北斗星载钟短稳评估方法*

龚航¹, 杨文可¹, 刘增军¹, 刘虎², 王飞雪¹
(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073;
2. 63889 部队, 河南孟州 454750)

摘要: 卫星导航系统评估星载钟稳定度通常需要大型地面监测网的观测数据和复杂的钟差确定算法, 不能基于单站观测数据实现。论文在分析利用单站观测数据评估星载钟短稳方法的基础上, 提出了一种相对容易实现的联合卫星双向载波测距值与 GNSS 单向载波观测值的星载钟短稳评估方法。该方法通过卫星双向载波测距确定星地几何距离, 基于消除星地几何距离的 GNSS 接收机载波相位观测值估算卫星相对钟差, 进而实现其短稳评估。利用北斗系统观测数据进行了有效性验证, 并与复杂钟差确定算法以及利用平滑广播星历的方法(SBE法)进行了对比, 本文方法与复杂钟差确定算法计算的结果相符, 在 1000s 平滑间隔内与 SBE 法结果一致, 相对误差小于 10%, 1000s 以上好于 SBE 法。

关键词: 北斗卫星导航系统; 星载原子钟; 短期稳定度; 卫星无线电测距; 载波相位

中图分类号: TN967.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2013)03-0158-06

Estimation method of BDS on-board clock short-term stability combining satellite two-way with one-way carrier ranging

GONG Hang¹, YANG Wenke¹, LIU Zengjun¹, LIU Hu², WANG Feixue¹

(1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Unit 63889, Mengzhou 454750, China)

Abstract: Usual estimation method of satellite on-board clock short-term stability demands continuous observation of large ground monitoring network and complex algorithm, which is not suitable for single station observation. Based on an analysis of the short-term frequency stability estimation method of satellite on-board clock using observation from one single station, a simpler method combining satellite two-way carrier ranging with GNSS one-way carrier phase observation is proposed. This method is based on GNSS carrier phase observation eliminating geometric distance between satellite and receiver, which is determined by satellite two-way carrier ranging. Performance of this method is evaluated by using BDS data. The estimation result agrees well with result of complex algorithm, and is very close to the smoothed broadcast ephemeris method (SBE method) for average time of 1 ~ 1000 seconds with relative error less than 10%, but better than SBE method for average time above 1000 seconds.

Key words: BeiDou Navigation Satellite System (BDS); on-board clock; short-term stability; satellite radio ranging; carrier phase

卫星导航系统中星载钟的短期稳定度参数对于卫星钟差建模仿真以及钟差预报等应用具有重要意义。GPS 系统对卫星钟稳定度评估的基本方法是利用 IGS 的精密钟差产品, 目前仅限于 GPS、GLONASS 系统, 不适用于北斗(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)和 Galileo 系统。另一方面, 解算卫星钟差通常采用的精密定轨与时间同步方法(记为 ODTS 法)需要大型地面监测网的连续观测和复杂的钟差确定算法, 无法基于单个监测站的观测数据实现。文献[1-2]对几种单站评估方法进行了分析比较, 其中基于精密星历的方法并不适用于现阶段的北斗系统, 基于载波相位拟

合的方法结果过于乐观, 基于平滑广播星历的方法具有相对较高的评估精度, 并且能够较好地适用于现阶段的北斗系统, 但是由于星地几何距离由预报的广播星历计算, 存在一定误差。

本文在文献[1]的研究基础上提出一种适用于北斗系统的联合卫星双向载波实时测距值和 GNSS 单向载波观测值的星载钟短稳单站评估方法。

1 SRR 方法原理

1.1 单站评估方法

文献[1]中给出了基于单个监测站数据估算

* 收稿日期: 2013-02-26

基金项目: 中国第二代卫星导航系统重大专项(GFZX0301020211)

作者简介: 龚航(1984—), 男, 江苏沛县人, 博士研究生, E-mail: gonghang@nudt.edu.cn;

王飞雪(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: wangfeixue365@sina.com

相对卫星钟差的方法:针对评估星载钟短稳的应用需求,只对卫星钟差的相对值进行各种延迟误差修正,选择观测噪声较小的载波相位观测量构建以接收机时钟为基准的卫星钟差:

$$\Delta t = \frac{1}{c}(\varphi\lambda - d) + \Delta\varepsilon_\varphi \quad (1)$$

其中 φ 为 GNSS 接收机载波相位观测值, d 为卫星与接收机的几何距离, ε_φ 为各种延迟误差修正后的残差。

利用 GNSS 接收机可以获得较高采样率的载波相位观测值 φ , 只要确定卫星与接收机的几何距离 d , 由(1)式即可获得高采样率的卫星钟差, 进而实现对其短稳的评估。在这种情况下, 只需接收机时钟的稳定度高于卫星钟的稳定度, 而这是一个较容易满足的条件, 地面钟的稳定度可以比星载钟高一个数量级以上。

另一方面, 虽然频率稳定度评估只需估计卫星钟差的相对值, 可以不用解算载波相位整周模糊度, 但是计算频率稳定度要求钟差数据连续, 特别是对于较长平滑间隔稳定度的评估, 需要观测数据连续时间更长。载波相位的周跳会影响观测数据的连续性并引入偏差, 因此必须首先对载波相位进行周跳探测与修复。为了保证频率稳定度的评估精度, 完全消除周跳的影响, 对载波相位周跳探测与修复的精度需要达到 1 周。

1.2 周跳探测与修复方法

通常的载波相位周跳探测与修复方法可以归为几类: 差分法、多项式拟合法、滤波法和各种组合法等^[3]。其中探测与修复精度能够达到 1 周的方法有: 星间差分法、电离层残差法和多项式拟合法。星间差分法在动态条件下难以探测出较小的周跳, 并且不适合本文单站单星的观测条件; 电离层残差法是目前探测能力较强的一种方法, 但是对于一些特殊的周跳组合难以探测出来, 并且对于双频系统在两个频点同时发生周跳时只能探测到周跳而无法修复, 需联合其他方法; 多项式拟合法比较适合采样率较高的静态观测条件, 满足本文要求。本文采用基于载波相位及其变化率的多项式拟合法对观测值进行周跳探测与修复^[3]。

周跳前后载波相位不再是连续函数, 但其变化率(多普勒观测值)是连续函数。周跳前后载波相位观测值及载波相位变化率符合如下多项式模型:

$$\varphi = \begin{cases} a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 & \text{周跳前} \\ a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + \Delta N & \text{周跳后} \end{cases} \quad (2)$$

$$\dot{\varphi} = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 \quad (3)$$

式中, φ 为以周为单位的载波相位观测值, ΔN 为周跳数, a_i 为拟合多项式的系数。

选取 5 个历元的载波相位及其变化率作为观测值探测周跳, 假设前 4 个历元的载波相位没有周跳, 探测第 5 个历元是否存在周跳。依此有如下误差方程:

$$F = AX + V$$

其中,

$$F = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_3, \dot{\varphi}_4, \dot{\varphi}_5]^T$$

$$X = [a_0, a_1, a_2, a_3, \Delta N]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & t_1^3 & 0 \\ 1 & t_2 & t_2^2 & t_2^3 & 0 \\ 1 & t_3 & t_3^2 & t_3^3 & 0 \\ 1 & t_4 & t_4^2 & t_4^3 & 0 \\ 1 & t_5 & t_5^2 & t_5^3 & 1 \\ 0 & 1 & 2t_1 & 3t_1^2 & 0 \\ 0 & 1 & 2t_2 & 3t_2^2 & 0 \\ 0 & 1 & 2t_3 & 3t_3^2 & 0 \\ 0 & 1 & 2t_4 & 3t_4^2 & 0 \\ 0 & 1 & 2t_5 & 3t_5^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

利用最小二乘法解得

$$X = (A^T A)^{-1} A^T F \quad (6)$$

由拟合残差的中误差可以确定周跳判断的门限为

$$\varepsilon = 3\sigma = 3 \sqrt{(F - AX)^T (F - AX)} \quad (7)$$

若由(6)式解得的 $|\Delta N| > \varepsilon$, 则说明第 5 个历元的载波相位观测值存在周跳, 其周跳估值为 ΔN , 并依此对周跳进行修复。

1.3 SRR 方法原理

北斗系统的 GEO 卫星上安装有用于站间时间同步的 C 波段转发器^[4], 对于这些卫星存在与卫星激光测距(SLR)原理^[5]类似的星地几何距离观测手段, 即利用站间时间同步的自发自收比对数据可以计算出卫星与监测站的星地几何距离^[4]。

这种方法实现原理如图 1 所示, 北斗系统的某些监测站并址安装有卫星双向时间同步设备(发射和接收设备分别记为 TW 发射机和 TW 接收机), 通过 GEO 卫星与其他监测站进行卫星双向时间同步。与 SLR 原理类似, TW 接收机在接收其他站的测距信号时, 可以同时接收到经 GEO 转发的本站发射的测距信号。由于卫星直接对测

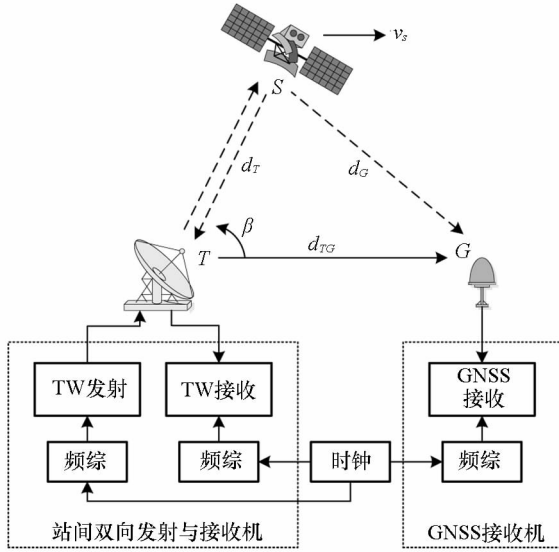


图 1 卫星双向与单向载波联合的评估方法原理

Fig. 1 Principle of estimation method combining satellite two-way with one-way carrier ranging

距信号进行变频转发, TW 接收机测得的伪距中并不包含卫星与监测站的钟差, 从而可以根据信号从 TW 发射机经 GEO 转发再到 TW 接收机的往返时间间隔计算出卫星与 TW 接收机之间的距离 d_T 。

由于监测站的 GNSS 接收机与 TW 接收机距离较近, 并且相对位置固定, 如果 TW 接收机与 GNSS 接收机采用相同的时钟, 即可由 d_T 计算出卫星与 GNSS 接收机的星地几何距离 d_G , 进而利用(1)式计算出以接收机时钟为基准的卫星钟差, 实现对卫星钟短稳的评估。类似 SLR, 这种利用卫星双向测距信号测量星地距离的方法本文记为卫星无线电测距 (Satellite Radio Ranging) 方法, 为便于描述, 基于这种测距进行卫星钟短稳评估的方法本文简记为 SRR 法。

由(1)式可知, 星地几何距离的测量精度直接影响星地相对钟差的估计精度。TW 接收机可以获得伪距和载波相位两种观测量, 载波相位测量精度远高于伪距测量精度, 并且周期模糊对于短稳评估不会造成影响, 因此选择 TW 接收机的载波相位观测量进行卫星双向测距。与 GNSS 单向数据处理要求类似, 双向载波相位观测数据同样需要首先对周跳进行探测与修复。以下分析利用 TW 接收机的双向载波观测量计算卫星与 GNSS 接收机星地几何距离的方法。

2 星地几何距离确定方法

采用扩频测距体制, TW 发射机的发射信号为

$$s_T(t) = a_1 x(t) \sin[2\pi(f_T + \Delta f_i)t + \theta_i] \quad (8)$$

其中, a_1 为发射信号幅度, $x(t)$ 为调制的扩频码, f_T 为标称上行发射载波频率, Δf_i 为上行发射载波频偏, θ_i 为初相。由于数据调制对测距不会造成影响, (8) 式中没有考虑在信号中调制的数据。

卫星收到上行发射信号 $s_T(t)$ 后, 将载波频率变频为 f_R 后转发。这样 TW 接收机接收到的射频信号为

$$s_R(t) = a_2 x(t - \tau_{g1} - \tau_{g2}) \sin[2\pi(f_T + \Delta f_i - f_{SL})(t - \tau_{p2}) - 2\pi(f_T + \Delta f_i)\tau_{p1} + 2\pi f_{d1}\tau_{p1} + 2\pi f_{d2}\tau_{p2} + \theta_i - \theta_s] \quad (9)$$

其中, a_2 为接收信号幅度, f_{d1} , f_{d2} 分别为上下行发射信号的载波多普勒, τ_{g1} , τ_{g2} 分别为上下行码传播延迟 (群延迟), τ_{p1} , τ_{p2} 分别为上下行载波传播延迟 (相延迟), f_{SL} 为卫星将 f_T 变频为 f_R 时的本振频率, θ_s 为该本振的初相。

TW 接收机在收到卫星转发的 $s_R(t)$ 后, 首先将其下变频为中频信号, 再进行载波跟踪和伪码相关等处理。经过射频前端处理后的中频信号为

$$s_{IF}(t) = a_2 x(t - \tau_{g1} - \tau_{g2}) \sin[2\pi(f_T + \Delta f_i - f_{SL} - f_{RL})t - 2\pi(f_T + \Delta f_i - f_{SL})\tau_{p2} - 2\pi(f_T + \Delta f_i)\tau_{p1} + 2\pi f_{d1}\tau_{p1} + 2\pi f_{d2}\tau_{p2} + \theta_i - \theta_s - \theta_r] \quad (10)$$

其中, f_{RL} 为 TW 接收机将 f_R 下变频为 f_{IF} 时的本振频率, θ_r 为该本振的初相, 由于

$$\begin{cases} f_{SL} = f_T - f_R + \Delta f_s \\ f_{RL} = f_R - f_{IF} + \Delta f_r \end{cases} \quad (11)$$

其中 Δf_s , Δf_r 分别为卫星转发变频及 TW 接收机下变频时的本振频偏, 所以 TW 接收机接收到的中频信号为

$$s_{IF}(t) = a_2 x(t - \tau_{g1} - \tau_{g2}) \sin[2\pi(f_{IF} + \Delta f_i - \Delta f_s - \Delta f_r)t - 2\pi(f_R + \Delta f_i - \Delta f_s - f_{d2})\tau_{p2} - 2\pi(f_T + \Delta f_i - f_{d1})\tau_{p1} + \theta_i - \theta_s - \theta_r] \quad (12)$$

TW 接收机经过载波环、码环跟踪锁定以后会恢复出与 $s_{IF}(t)$ 同频同相的本地载波信号, 标称中频信号的载波相位减去本地恢复信号的载波相位即为 TW 接收机的载波相位测量值。扣除 θ_i , θ_s , θ_r 等常数项以后的载波相位测量值满足:

$$N + \varphi = -\int_0^t (\Delta f_i - \Delta f_s - \Delta f_r) dt + (f_R + \Delta f_i - \Delta f_s - f_{d2})\tau_{p2} + (f_T + \Delta f_i - f_{d1})\tau_{p1} \quad (13)$$

其中

$$\begin{cases} f_{d1} = \frac{v_s}{c}(f_T + \Delta f_i) \\ f_{d2} = \frac{v_s}{c}(f_R + f_{d1} + \Delta f_i - \Delta f_s) \\ \tau_{p1} = d_T + s - \tau_{i1} + \tau_{ir} \\ \tau_{p2} = d_T - s - \tau_{i2} + \tau_{ir} \end{cases} \quad (14)$$

(14)式中, d_T 为卫星与 TW 接收机的星地几何距离, s 为 Sagnac 效应引入的时延(上下行 Sagnac 效应大小相等符号相反^[6]), τ_{i1} 、 τ_{i2} 分别为上下行载波的电离层延迟, τ_{ir} 为对流层引入的传播延迟, v_s 为卫星相对 TW 接收机的运动速度。

由(13)、(14)式可以根据 TW 接收机载波相位测量值计算出卫星与 TW 接收机的星地几何距离:

$$d_T = \frac{1}{k_1} \left[(N + \varphi) + \int_0^t (\Delta f_i - \Delta f_s - \Delta f_r) dt - k_2 s + k_3 \tau_{i1} + k_4 \tau_{i2} - k_1 \tau_{ir} \right] \quad (15)$$

式中

$$\begin{cases} k_1 = \left(1 - \frac{v_s}{c}\right)(f_T + f_R + 2\Delta f_i - \Delta f_s) - \left(\frac{v_s}{c}\right)^2 (f_T + \Delta f_i) \\ k_2 = \left(1 - \frac{v_s}{c}\right)(f_T - f_R + \Delta f_s) - \left(\frac{v_s}{c}\right)^2 (f_T + \Delta f_i) \\ k_3 = \left(1 - \frac{v_s}{c}\right)(f_T + \Delta f_i) \\ k_4 = \left(1 - \frac{v_s}{c}\right)(f_R + \Delta f_i - \Delta f_s) - \left(\frac{v_s}{c}\right)^2 (f_T + \Delta f_i) \end{cases} \quad (16)$$

(16)式中, Δf_s 的稳定度即为待评估的卫星钟的稳定度。分析可知,虽然在计算 TW 星地几何距离时耦合了 Δf_s 的影响,但是由于星载铷钟的频率准确度至少为 10^{-11} 量级,稳定度高于 10^{-12} ,对于 C 波段转发器而言,卫星转发本振频率假设为 2GHz,那么这时 Δf_s 最大只有 0.02Hz,相比 f_T 、 f_R 是一个非常小的量,因此在计算 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 时可以忽略 Δf_s 的影响,地面钟 Δf_i 、 Δf_r 的影响更小,同理可以忽略。另外(15)式中的积分项为星地频偏的影响,对于单站评估方法可根据(1)式归入星地钟差,在计算 d_T 时可以不考虑这一项。

这样,在不考虑整周模糊以及 Δf_s 、 Δf_i 、 Δf_r 影响的情况下,由(15)、(16)式即可解出卫星与 TW 接收机的星地几何距离 d_T 。

利用(1)式求解卫星钟差最终需要求出卫星与 GNSS 单向接收机的几何距离 d_G ,在已经测出 d_T 的前提下,可以通过对 d_T 进行归心改正计算出 d_G 。

利用(15)式计算的 d_T 存在周期模糊,不能直接利用余弦定理求解 d_G 。可以首先根据卫星 S、TW 接收机天线 T、GNSS 接收机天线 G 的几何关系求出 d_G 与 d_T 的差,作为对 d_T 的归心改正量,最终计算出 d_G 。如图 1 中所示,根据余弦定

理,有

$$\begin{cases} |\vec{SG}|^2 = |\vec{TS}|^2 + |\vec{TG}|^2 - 2|\vec{TS}||\vec{TG}|\cos\beta \\ d_G - d_T = |\vec{SG}| - |\vec{TS}| \end{cases} \quad (17)$$

式中 β 为卫星 S、TW 接收机天线 T、GNSS 接收机天线 G 的夹角。由此最终可以求出归心改正后的卫星与 GNSS 接收机的星地几何距离 d_G 为

$$d_G = d_T + (|\vec{SG}| - |\vec{TS}|) \quad (18)$$

3 SRR 方法实现流程

综合以上讨论,联合卫星双向载波测距值和 GNSS 单向载波观测值评估星载钟短稳的 SRR 方法实现流程如图 2 所示。

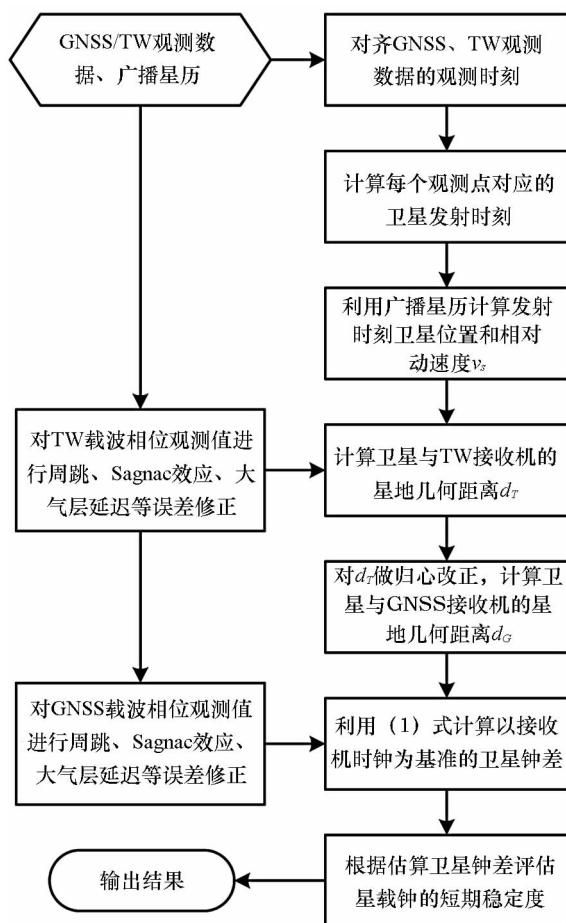


图2 SRR 方法实现流程

Fig. 2 Flow chart of SRR method

4 验证实验与结果分析

由于目前无法获得北斗系统的精密钟差作为验证手段,并且除了文献[7]给出了利用 ODTS 方法获得的 2012 年 2 月部分卫星的 100s 以上稳定度结果外,目前尚无公开发表的北斗系统星载钟短稳结果。本文利用北斗系统相距约 3000km 的监测站 01 和 03 同一时段的观测数据开展实验,

对两个站利用 SRR 法的评估结果进行相互验核, 同时将文献[7]给出的结果作为对比参考。这两个站都并址安装有站间双向接收机和 GNSS 监测接收机, 两种接收机采用同源的时钟, 时钟参考来自经 BDT 驯服的氢钟, 因此接收机时钟的稳定度优于星载钟, 按(1)式计算的星地钟差可以用于卫星钟短稳的评估。

实验观测时间段为 BDT 2012-12-02 00:00:00 至 2012-12-03 00:00:00, 以 B1、B3 频点载波相位观测量构建无电离层组合观测量对卫星 SV01 的星载钟短稳进行评估, 对比监测站 01 和 03 的结果如图 3 所示(文献[7]的结果扣除了卫星钟频漂, 为了与其比较, 图 3 的结果中扣除了频漂)。

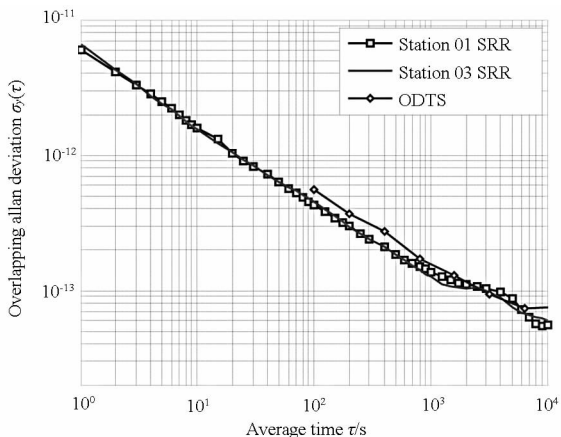


图 3 监测站 01 和 03 的 SRR 法评估结果对比

Fig. 3 Estimation result comparison between station 01 and station 03 by SRR method

由图 3 可以看出, 利用本文方法获得的 01 和 03 站的计算结果一致, 10 000s 平滑间隔内相对误差小于 10%; 在 100s 以上与文献[7]给出的 2012 年 2 月的结果基本相符, 相对误差小于 20%。由于不是同一时间段的数据对比, 结果存在一定偏差, 但是在一定程度上可以说明本文方法的有效性。

将本文方法与文献[1]中利用平滑广播星历的评估方法(简记为 SBE 法)做进一步对比, SBE 法也是基于(1)式原理, 利用广播星历获得卫星位置, 进而求出星地几何距离, 计算卫星位置时通过对广播星历的平滑消除星历更新引起轨道跳变的影响^[1]。分别利用 SRR 法和 SBE 法基于相同时间段监测站 01 的观测数据对 SV01 星载钟短稳的评估结果如图 4 所示(图中结果未扣除频漂)。

由图 4 可以看出, 利用本文方法与 SBE 法计算的结果在平滑间隔 1000s 内基本一致, 相对误

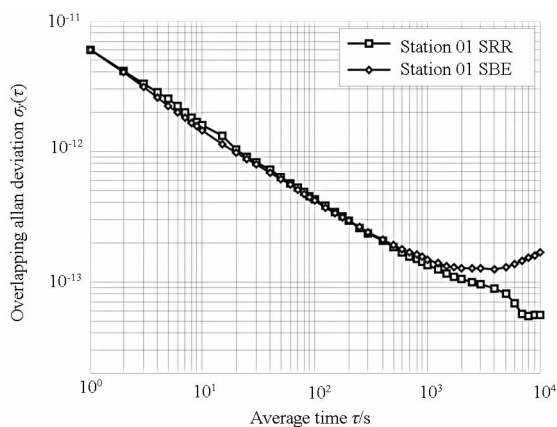


图 4 SRR 法与 SBE 法的评估结果对比

Fig. 4 Estimation result comparison between SRR method and SBE method

差小于 10%, 1000s 以上好于 SBE 法。分析可知, 由于 SBE 法消除星地几何距离是基于预报的广播星历, 本文方法利用的是实时测得的反映实际星地几何距离变化的双向载波测距值, 相比 SBE 法计算的星地几何距离更接近真实值, 而广播星历的预报误差主要为缓变量, 造成 SBE 法估计的频率稳定度在平滑间隔较大时出现偏差。

利用本文方法目前可以对北斗卫星 SV01、SV03 进行评估, 给出同样时间段这两颗卫星星载钟短稳的评估结果, 如图 5 所示(为了反映星载铷钟的频漂特性, 图中结果没有扣除频漂影响)。

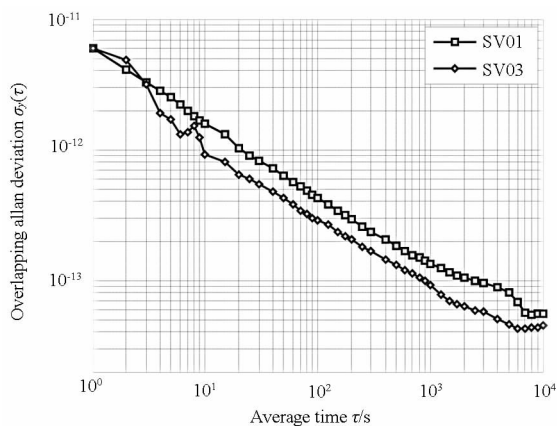


图 5 北斗 SV01、03 星载钟短稳评估结果

Fig. 5 Frequency stability of BDS SV01 and SV03 on-board clocks

由图 5 可以看出, 目前北斗的 SV01、SV03 两颗卫星的星载钟稳定度特性基本一致, 统计平均特性如表 1 所示, 100 ~ 10 000s 的结果与文献[7]给出的结果一致。

表1 北斗 SV01、SV03 星载钟短稳平均特性

Tab.1 Average frequency stability of BDS SV01 and SV03 on-board clocks

平滑时间(s)	SRR 法	ODTS 法 ^[7]
1	5.9×10^{-12}	/
10	1.3×10^{-12}	/
100	3.6×10^{-13}	5×10^{-13}
1000	1.2×10^{-13}	2×10^{-13}
10000	5.3×10^{-14}	7×10^{-14}

5 结束语

本文提出了一种适用于北斗系统的联合卫星双向载波测距值和 GNSS 单向载波观测值的星载钟短稳评估方法,利用北斗观测数据进行了验证,与复杂钟差确定算法计算的结果相符,在 1000s 平滑间隔内与 SBE 法的结果一致,1000s 以上好于 SBE 法。本文方法能够实时监测星载钟的短期稳定度特性,可用于北斗系统 GEO 卫星钟的完好性监测。

参考文献 (References)

- [1] Gong H, Yang W K, Wang Y, et al. Comparison of short-term stability estimation methods of GNSS on-board clock [C]//Lecture Notes in Electrical Engineering, v160 LNEE, p503 - 513, Proceedings of the 3rd China Satellite Navigation Conference. Berlin; Springer, 2012.
- [2] Delporte J, Boulanger C, Mercier F. Straightforward estimations of GNSS on-board clocks [C]//Proceedings of 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency

Control Symposium and European Frequency and Time Forum. San Francisco, California, USA.

- [3] 范建军. GNSS 三频精密测量定位系统的数据处理理论与方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2007.
FAN Jianjun. Study on data processing theory and method of precise surveying and positioning in GNSS three carrier system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [4] Yang X H, Ma L M, Sun B Q, et al. The method of time synchronization based on the combination of COMPASS GEO pseudo-range and two-way data[C]//Proceedings of 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum. San Francisco, California, USA.
- [5] 路晓峰, 贾小林, 杨志强. 利用 SLR 和 GPS 双频相位平滑伪距资料测定导航卫星钟差[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008. 33: 237 - 240.
LU Xiaofeng, JIA Xiaolin, YANG Zhiqiang. Determination of navigation satellite clock bias using SLR and GPS dual frequency phase-smoothed pseudo-range data [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33: 237 - 240. (in Chinese)
- [6] Bauch A, Piester D, Fujieda M, et al. Directive for operational use and data handling in two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT) [R]. Bureau International des Poids et Mesures, Rapport BIPM - 2011/ 01, 2011.
- [7] 韩春好, 刘利, 蔡志武, 等. 北斗星载原子钟时间同步与在轨性能评估[R]. 第三届中国卫星导航学术年会特邀报告, 广州, 2012.
HAN Chunhao, LIU Li, CAI Zhiwu, et al. Time synchronization and in-orbit performance assessment of Compass on-board clocks [R]. Invited presentation of 3rd China Satellite Navigation Conference, Guangzhou, China, 2012. (in Chinese)