

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2020-02-0094-07

基于软件接收机的卫星双向时间频率传递

武文俊^{1,2,3}, 姜萌^{1,2,3}, 王翔^{1,2}, 张继海^{1,2}, 广伟^{1,2,3}, 董绍武^{1,2,3}

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国科学院 时间频率基准重点实验室, 西安 710600;
3. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 101048)

摘要: 卫星双向时间频率传递是目前最准确的远距离时间比对方式之一。多年以来, 卫星双向一直是利用硬件调制解调器来开展工作。在国际时间频率咨询委员会卫星双向工作组的组织下, 全球主要时间实验室于 2016 年发起了基于软件接收机的卫星双向时间比对试验。2016 年 8 月, 中国科学院国家授时中心与德国物理技术研究院开通了第一条欧亚间基于软件接收机的卫星双向时间比对链路。通过对基于软件接收机的卫星双向时间比对进行测试与标定, 结果表明: 该时间比对方式的频率相对稳定度和时间稳定度分别可以达到 $1 \times 10^{-15}/d$ 和 1 ns, 其链路总不确定优于 1.6 ns。最后将该链路基于硬件调制解调器的卫星双向时间比对进行比较验证, 二者结果互为一致。

关键词: 协调世界时; 时间比对; 卫星双向; 软件接收机

Two-way satellite time and frequency transfer based on software defined receiver

WU Wen-jun^{1,2}, JIANG Meng^{1,2,3}, WANG Xiang^{1,2}, ZHANG Ji-hai^{1,2},
GUANG Wei^{1,2,3}, DONG Shao-wu^{1,2,3}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101048, China)

Abstract: The two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT) is one of the most accurate and precise methods for remote clocks. The traditional TWSTFT is operated on hardware modem. In 2016, all the major time laboratories in the world launched the TWSTFT study based on software defined receiver (SDR) under the organization of Consultative Committee for Time and Frequency Work Group on TWSTFT (WGTWSTFT). The first Euro-Asia SDR TWSTFT link was built up between the National Time Service Center (NTSC), Chinese Academy of Sciences and Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). Test and calibration were implemented on the NTSC-PTB SDR link. It is shown that the relative frequency instability and time

收稿日期: 2019-10-29; 接受日期: 2020-01-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11703030; 11473029)

作者简介: 武文俊, 男, 副研究员, 主要从事时间与频率研究。

instability can reach to 1×10^{-15} (1day) and 1ns, respectively; its total uncertainty is less than 1.6 ns. The traditional and SDR TWSTFT links were compared with each other and it's found that they are consistent with each other.

Key words: coordinated universal time (UTC); time comparison; two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT); software defined receiver

0 引言

当前, 国际标准时间是协调世界时 (coordinated universal time, UTC), 而远距离时间比对是协调世界时产生过程中的重要环节^[1]。在协调世界时的归算中, 卫星双向时间频率传递 (two-way satellite time and frequency transfer, TWSTFT) 和 GNSS (global navigation satellite system) 时间频率传递是现阶段远距离时间传递的两种主要技术手段, 世界主要时频实验室都具备这两种时间比对的能力^[2]。自 1999 年 TWSTFT 正式应用于 UTC 的计算以来, 它在国际标准时间的产生中就一直发挥着极其重要的作用, 现它已成为国际权度局 (BIPM) 计算协调世界时的首要时间比对方法。中国科学院国家授时中心 (NTSC) 于 1998 年与日本国家信息与通信技术研究所 (NICT) 开通了国内第一条 TWSTFT 链路, 并于 2002 年 1 月将其数据成功应用于 UTC 的计算。传统的卫星双向时间频率传递一直主要利用德国 Timetech 公司的卫星时间和距离测量设备 (satellite time and ranging equipment, SATRE) 来完成信号的编码和解调^[3]。为改善卫星双向时间比对性能, 2016 年 1 月, 国际时间频率咨询委员会卫星双向时间频率传递工作组发起了基于软件接收机 (software defined receiver, SDR) 的全球性 TWSTFT 试验, 该试验成功地利用软件接收机的方法对 TWSTFT 伪码扩频信号进行了解扩解调^[4-5]。与 SATRE 硬件接收机卫星双向时间比对相比, SDR 操作简单、增加了数据采样率、降低了成本, 并且在某些卫星双向时间比对链路上还提高了时间比对结果的精度^[6]。中国科学院国家授时中心积极参与该试验, 2016 年 8 月与德国物理技术研究院 (PTB) 开通了第一条欧亚间基于软件接收机的 TWSTFT, 并取得了良好的试验结果。

1 基本原理

卫星双向时间比对过程中由于信号路径上的高度对称性使得其各类误差大部分被抵消, 从而获得了高精度的两地时间差。基于 SDR 的卫星双向时间比对过程与基于 SATRE 的卫星双向时间比对相似, 笔者将详细描述前者的原理及系统组成。

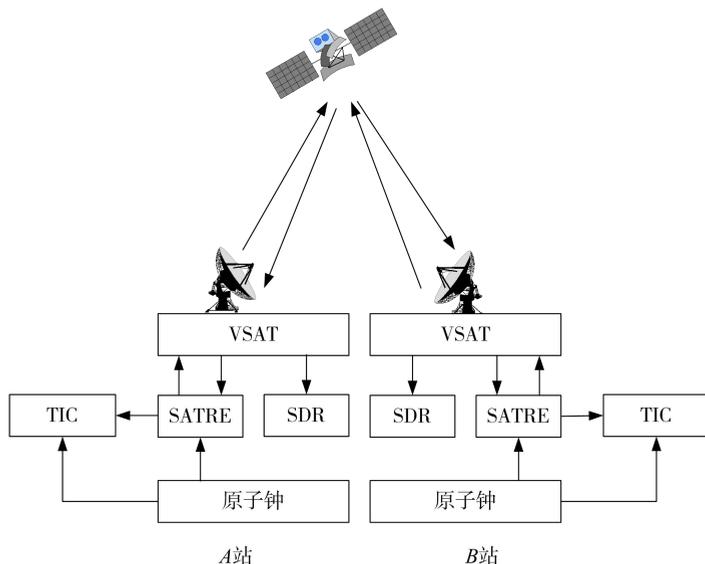
1.1 原理

卫星双向时间频率传递基本原理是在地面站 A 使用发射机将本地原子钟的时间信号经伪随机码调制, 通过甚小口径终端天线 (VSAT) 将调制的扩频信号发射给卫星, 经卫星转发器把 A 站的时间信号转发至地面, 地面站 B 接收经卫星转发的 A 站的时间信号, 解调信号后并与 B 站的原子钟信号相比较, 从而测量 A 站传到 B 站信号的传递时延。在 A 站发射信号的同时, B 站以同样方式发射信号被 A 站接收^[7]。通过两站数据交换, 去除各种误差项后即可获得两地原子钟间的高精度钟差。

1.2 系统组成

在不改变基于 SATRE 的卫星双向比对工作的基础上, 加入 SDR, 与 SATRE 共用发射机, 天线系统接收到的信号由下变频器处理后分两路输入 SATRE 接收通道和 SDR。每个地面站都配备有原子钟、VSAT、

SATRE、软件接收机和时间间隔计数器等设备,具体组成如图 1 所示。原子钟将产生的 1 PPS 信号送至发射机后首先与伪随机码进行 BPSK 调制,然后再将调制好的信号调制到载波上,最后生成 70 MHz 的中频信号并作为发射机的输出信号。将 70 MHz 的中频信号输入上变频器进行变频,然后对上变频后的调制信号通过固态功率放大器 (SSPA) 进行功率放大后,通过 VSAT 终端发射向卫星。卫星接收到来自地面站的信号后,通过透明转发器对信号实现上行频率到下行频率的转换并转发向地面。TWSTFT 对 A 站收到卫星转发的信号后,由 VSAT 终端接收,通过低噪声放大器 (LNA) 处理,信号输入下变频器,将信号还原为 70 MHz 的中频信号。然后将还原的 70 MHz 的中频信号分别输入 SATRE 接收通道和 SDR,二者分别对 1 PPS 中频信号实现解扩解调,从而实现发射站到接收站的时延测定。



注: VAST 为甚小口径终端天线, TIC 为时间间隔计数器, SATRE 为卫星时间和距离测量设备, SDR 为软件接收机

图 1 基于 SATRE 和 SDR 的 TWSTFT 系统组成图

1.3 算法

卫星双向时间频率传递过程中 A 站时延测量的读数为

$$T_A = T_{TSA} - T_{TSB} + T_{TXB} + T_{SGUB} + T_{STUB} + T_{SIUB} + T_{SCUB} + T_{SPTB} + T_{SGDA} + T_{STDA} + T_{SIDA} + T_{SCDA} + T_{RXA} \quad (1)$$

B 站时延测量的读数为

$$T_B = T_{TSB} - T_{TSA} + T_{TXA} + T_{SGUA} + T_{STUA} + T_{SIUA} + T_{SCUA} + T_{SPTA} + T_{SGDB} + T_{STDB} + T_{SIDB} + T_{SCDB} + T_{RXB} \quad (2)$$

式 (1) 和 (2) 中: T_{TSk} ($k=A, B$) 为钟面时刻; T_k 为时延测量的读数; T_{TXk} 为发射通道时延; T_{RXk} 为接收通道时延; T_{SGUk} 为信号几何路径上行时延; T_{SGDk} 为信号几何路径下行时延; T_{STUk} 为对流层上行时延; T_{STDk} 为对流层下行时延; T_{SIUk} 为电离层上行时延; T_{SIDk} 为电离层下行时延; T_{SPTk} 为通过转发器的卫星时延; T_{SCUk} 为上行链路的 Sagnac 效应校正; T_{SCDk} 为下行链路的 Sagnac 效应校正。

根据式 (1) 和 (2) 整理得到 A 站和 B 站钟差, 如下式所示:

$$\begin{aligned} T_{TSA} - T_{TSB} = & 0.5 \times [T_A - T_B] + 0.5 \times [T_{SPT} - T_{SPTB}] - 0.5 \times [T_{SCDA} - T_{SCUA}] + 0.5 \times [T_{SCDB} - T_{SCUB}] + \\ & 0.5 \times [T_{SGUA} - T_{SGDA}] - 0.5 \times [T_{SGUB} - T_{SGDB}] + 0.5 \times [T_{STUA} - T_{STDA}] - 0.5 \times [T_{STUB} - T_{STDB}] - \\ & 0.5 \times [T_{SIUA} - T_{SIDB}] + 0.5 \times [T_{SIUB} - T_{SIDB}] + 0.5 \times [T_{TXA} - T_{RXA}] - 0.5 \times [T_{TXB} - T_{RXB}] \end{aligned} \quad (3)$$

目前, 国际上主要使用 Ku 频段的电磁波来进行卫星双向时间频率传递。由于当前卫星双向时间比

对的精度为 0.5 ns，无线电波在 Ku 波段工作时，式（3）中的时间比对两站几何路径时延、对流层时延和电离层时延在几十皮秒甚至几皮秒的量级，数据处理时完全可以忽略，而 Sagnac 效应对于固定的两地面站，它有准确的计算公式可以求解。当时间比对双方同用一个卫星转发器时，卫星转发器时延也可以相互抵消。当两站使用不同转发器时，该项需要考虑，属于卫星硬件时延。TWSTFT 互相比对两站的硬件时延需要准确标定^[8]。

2 基于 SDR 的 TWSTFT 试验结果

中国科学院国家授时中心和德国物理技术研究院分别负责中国和德国国家标准时间的产生和发播^[9-10]。经过积极协调，中国 NTSC 和德国 PTB 分别在 2016-07-20/07-30 和 2016-08-01/08-19 期间完成了软件接收机的安装与调试。

2.1 NTSC与PTB设备配置

NTSC 和 PTB 都是国际原子时的重要参与单位，二者时间比对链路的基线长度约为 7 800 km，如图 2 所示，其 SDR 部分主要硬件设备配置情况见表 1。

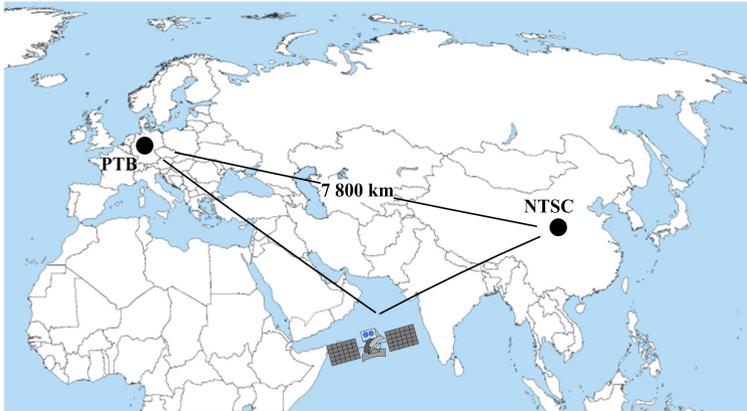


图 2 NTSC-PTB 时间比对链路

表 1 NTSC 和 PTB 设备配置表

序号	主要设备名	NTSC	PTB
1	A/D 采样器	USRP N210	USRP N210
2	CPU	Intel I5-4570	Intel Xeon E5-1600
3	硬盘	2 TB	250 GB
4	内存	16 GB	16 GB
5	GPU 处理器	Nvidia Tesla K20	Nvidia Tesla K40c

2.2 测试结果

自 2016 年 8 月 20 日开始，NTSC 和 PTB 之间利用俄罗斯的 AM22 通信卫星成功实现了基于 SDR 的 TWSTFT 时间比对。在试验中，地面观测站和卫星之间的上下行频率分别采用 Ku 波段的 14.26 GHz 和 10.96 GHz，基带部分的伪随机码的码速率为 2.5 兆码片/s。

图 3 是从约化儒略日 57 650（2016-09-19）~57 659（2016-09-28）期间的中德 SDR 卫星双向时间比对的结果，其中纵坐标 UTC（PTB）-UTC（NTSC）为中德时间差。从图 3 可以看出，NTSC-PTB 之

间基于 SDR 的卫星双向时间比对结果是连续稳定的,但它具有明显的周日变化的特点,这与传统的 SATRE 卫星双向时间比对特征一致。图 4 给出了 NTSC-PTB 链路基于 SDR 卫星双向时间比对的修正 Allan 方差 (MVAR) 和时间偏差 (TDEV)。从图 4 可以看出,该链路的频率相对稳定性和时间稳定度分别可以达到 $1 \times 10^{-15}/1 \text{ d}$ 和 1 ns 。

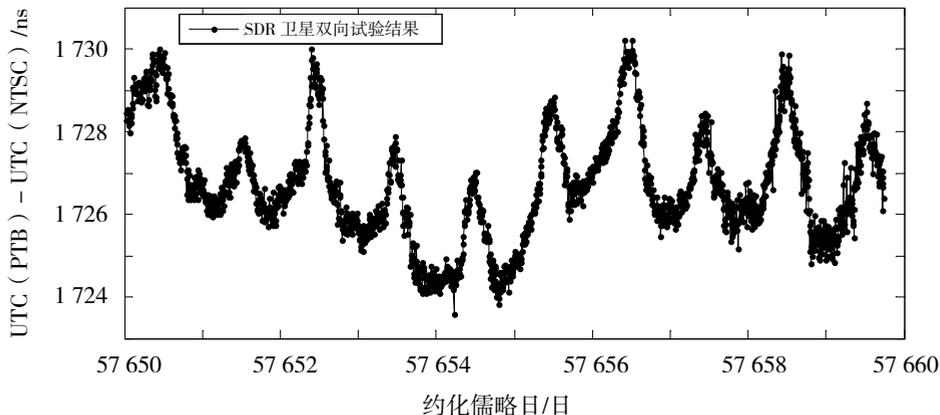


图 3 基于 SDR 的 TWSTFT 试验结果

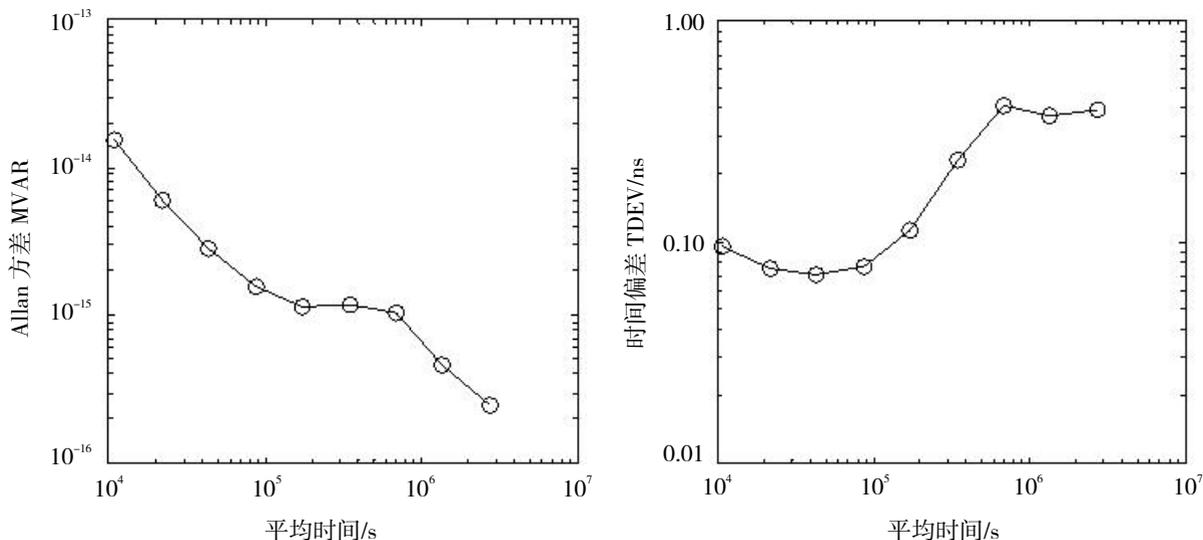


图 4 基于 SDR 卫星双向的修正 Allan 方差和时间偏差

2.3 基于 SDR 的 TWSTFT 标定及其不确定度分析

时间比对链路标定是当前时间比对中不确定度中的主要组成部分^[11]。在国际权度局的组织下,2016 年 7 月 NTSC 和 PTB 之间基于 SATRE 的卫星双向时间比对链路进行过标定,其标定不确定度为 $1.5 \text{ ns}^{[11-12]}$ 。通过公式 (4) 利用已标定的 SATRE 卫星双向链路对基于 SDR 的 TWSTFT 进行整体标定。在式 (4) 中, $[\text{UTC}(\text{PTB}) - \text{UTC}(\text{NTSC})]_{\text{SATRE}}$ 为已扣除硬件时延的时间差,而 $[\text{UTC}(\text{PTB}) - \text{UTC}(\text{NTSC})]_{\text{SDR}}$ 中包含两站之间的时间差和整个 SDR 卫星双向时间比对的设备内部时延。由式 (4) 可得,标定值 C 的结果如图 5 所示。

$$C = [\text{UTC}(\text{PTB}) - \text{UTC}(\text{NTSC})]_{\text{SATRE}} - [\text{UTC}(\text{PTB}) - \text{UTC}(\text{NTSC})]_{\text{SDR}} \quad (4)$$

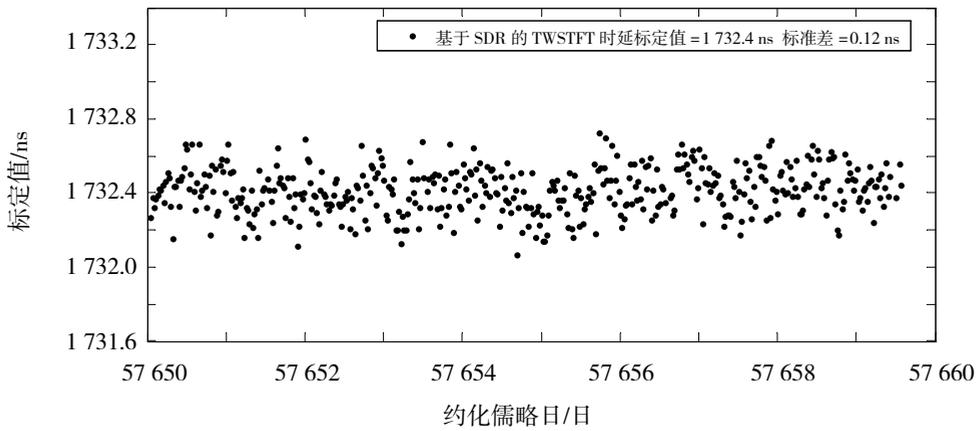


图 5 SATRE 双向对 SDR 双向标定结果

本次标定的不确定度采用全球 SDR 卫星双向试验中的不确定度处理方法^[6]，其中 SDR 卫星双向 A 类不确定度为 0.2 ns，SATRE 卫星双向的总不确定度为 SDR 卫星双向链路的 B 类不确定度，见表 2 所示。基于 SDR 的卫星双向比对链路不确定度优于 1.6 ns，表 2 中 U_A 、 U_B 和 U 分别为 A 类、B 类和总不确定度。

表 2 基于 SDR 的 TWSTFT 不确定度预算表

序号	链路名称	U_A /ns	U_B /ns	U /ns
1	SATRE 双向链路	0.50	1.50	1.58
2	SDR 双向链路	0.20	1.58	1.59

3 与 SATRE 卫星双向比对链路的比较验证

基于 SATRE 的卫星双向时间比对链路一直是 BIPM 计算 UTC 的首选国际时间比对方式。自 2016 年 9 月开始，通过 SATRE 进行 NTSC 与 PTB 之间的 TWSTFT 已经正式成为 UTC 计算中的一条正式链路。因此，以 SATRE 卫星双向链路为参考，将基于 SDR 的卫星双向与其进行比较验证，其结果见图 6 和图 7。图 6 是 SATRE 和 SDR 的时间比对结果，图 7 为两种时间比对结果之差。由图 6 和图 7 可以看出，基于 SATRE 和 SDR 的两条卫星双向时间比对链路的结果几乎是完全一致的。

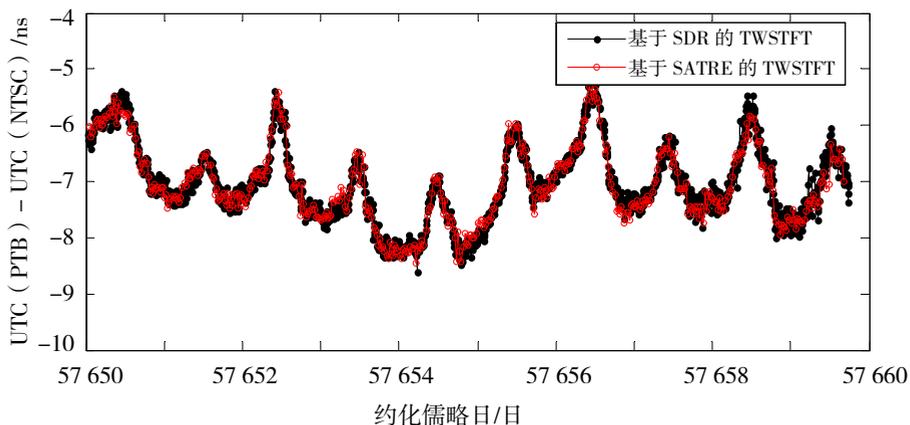


图 6 基于 SATRE 和 SDR 的 TWSTFT 比较

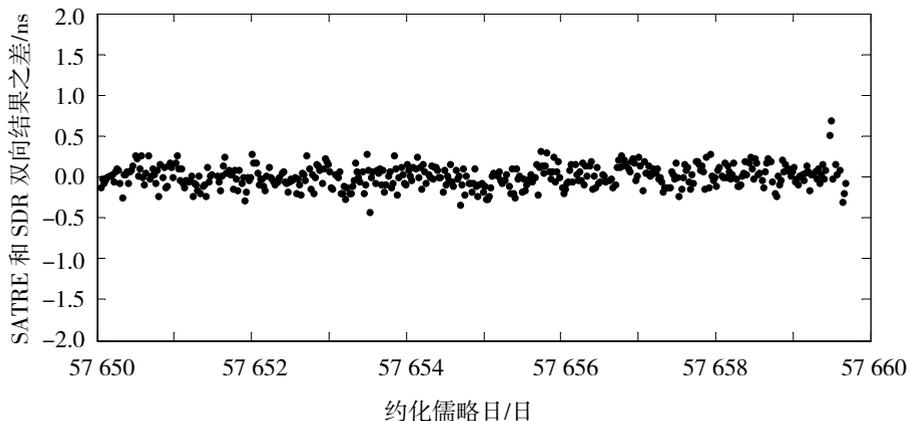


图 7 SATRE 和 SDR 的 TWSTFT 的结果之差

4 结语

时间比对是国际标准时间产生过程中必不可少的环节之一。在国际时间频率委员会卫星双向工作组的组织与协调下,中国科学院国家授时中心与德国物理技术研究院利用 AM22 卫星开通了欧亚间首条基于软件接收机的卫星双向时间比对链路,并于 2016 年 8 月开始成功获得了试验的结果。通过实验表明,基于 AM22 卫星的时间比对链路的频率相对稳定性和时间稳定性分别可以达到 $1 \times 10^{-15}/\text{d}$ 和 1 ns。利用硬件调制解调器卫星双向链路对基于软件接收机的卫星双向时间比对链路进行了标定和验证,其总不确定度优于 1.6 ns,二者结果相互一致。基于软件接收机卫星双向时间比对链路的实现,为国际时间比对工作开拓了一种可靠的新方式。在一些几百到二三千千米距离较短的其他国际试验中,它还提高了时间比对的短期稳定性。利用其他卫星开展中德之间 SDR 卫星双向时间比对的性能还有待进一步验证评估。2020 年 2 月,国际权度局已经将基于软件接收机的卫星双向时间频率传递正式纳入了国际标准时间的归算。

参考文献:

- [1] 宋会杰,董绍武,屈俐俐,等. 基于 Sage 窗的自适应 Kalman 滤波用于钟差预报研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1809–1816.
- [2] 陈婧亚,许龙霞,李孝辉. 接收机位置误差对 GNSS 定时的影响分析[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(6): 1458–1465.
- [3] Timetech. SATRE Modem User's Manual[K]. 2015.
- [4] HUANG Y J, FUJIEDA M, TAKIGUCHI H, et al. Stability improvement of an operational two-way satellite time and frequency transfer system[J]. Metrologia, 2016, 53(2): 881–890.
- [5] JIANG Z H, ZHANG V, PARKER T E, et al. Accurate TWSTFT time transfer with indirect links[C] // Proceedings of the 48th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, [S.], 2017: 243–255.
- [6] JIANG Z H, ZHANG V, HUANG Y J, et al. Use of software-defined radio receivers in two-way satellite time and frequency transfers for UTC computation[J]. Metrologia, 2018, 55(5): 685–698.
- [7] JIANG Z H. Toward TWSTFT network time transfer[J]. Metrologia, 2008, 45(6): 6–11.
- [8] 武文俊. 卫星双向时间频率传递的误差研究[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2012.
- [9] 董绍武,屈俐俐,袁海波,等. NTSC守时工作: 国际先进、贡献卓绝[J]. 时间频率学报, 2016, 39(3): 129–137.
- [10] BAUCH A, WEYERS S, PIESTER D, et al. Generation of UTC(PTB) as a fountain-clock based on time scale[J]. Metrologia, 2012, 49(3): 180–188.
- [11] EXERTIER P, SAMAIN E, COURDE C, et al. Sub-ns time transfer consistency: a direct comparison between GPS CV and T2L2[J]. Metrologia, 2017, 53(6): 1395–1401.
- [12] 武文俊,张虹,广伟,等. 利用AM22进行国际卫星双向时间频率传递[J]. 时间频率学报, 2017, 40(3): 155–160.