

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2019-04-0284-08

基于软件接收机技术的卫星 双向时间传递性能分析

张虹^{1,2}, 董绍武^{1,2}, 袁海波^{1,2}, 武文俊^{1,2}

(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)

摘要: 卫星双向时间传递 (TWSTFT) 是目前 UTC 实现的主要技术手段, 可以实现的比对精度为 0.2~0.3 ns。它的主要不确定度源是日变化 (周日效应), 周日效应在极端情况下峰峰值可以达到 2 ns。为了减少周日效应的影响, 开始了将 SDR 接收机应用于 TWSTFT 的前沿研究。通过分析比较基于 SDR 技术卫星双向时间比对和传统卫星双向时间比对两种时间比对技术的工作原理和比对结果, 验证基于 SDR 技术的双向时间比对的性能, 为 SDR 双向时间比对链路将来成为 UTC/TAI 计算提供参考。初步结果表明: 基于 SDR 技术的卫星双向时间比对的性能较传统双向比对有一定的提高, 尤其是短基线时间传递比较明显, 时间不确定度 (10 ks 内) 达到 0.1 ns, 较传统双向链路提高了 44.9%。

关键词: 软件接收机技术; 卫星双向时间比对; 时间不确定度

Analysis of the performance of SDR TWSTFT

ZHANG Hong^{1,2}, DONG Shao-wu^{1,2}, YUAN Hai-bo^{1,2}, WU Wen-jun^{1,2}

(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)

Abstract: Two way satellite time and frequency transfer (TWSTFT) is a primary technique for UTC realization at present, and its time transfer accuracy is up to 0.2 to 0.3 ns. The dominant source of its uncertainty is the daily variations (diurnals), whose peak-to-peak amplitude could be up to 2 ns in extreme cases. In order to reduce the impact of the diurnals, a pilot study of the application of SDR receivers in TWSTFT was done. To study the performance of SDR TWSTFT, the difference of the principle and the time transfer result between SDR TWSTFT and traditional TWSTFT is analyzed. Our research work aims to provide a reference for using the SDR TWSTFT as the UTC/TAI link in the future. In our research, the SDR TWSTFT shows a performance that is better than that of the traditional TWSTFT. In the short-baseline case the SDR shows an obvious improvement. The time variance of SDR TWSTFT (within 10 000 seconds) has been reduced to 0.1 ns, which is 44.9% better than the traditional TWSTFT.

收稿日期: 2019-04-19; 接受日期: 2019-06-03

作者简介: 张虹, 女, 副研究员, 主要从事高精度时间同步研究。

Key words: software receiver technology; two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT); time uncertainty

0 引言

21 世纪以来, 高精度时间比对链路是全世界 70 多个地方守时实验室所保持的地方原子时产生国际原子时 (TAI) 的必要途径之一。目前, 高精度比对手段主要包括卫星双向时间比对 (TWSTFT)、GPS 精密单点定位 (GPS PPP)、GPS 共视 (GPS CV)、GPS 全视等。在众多时间比对手段中, TWSTFT 是目前最高精度的时间比对手段之一^[1-2]。TWSTFT 的时间不确定度 (10 ks 内) 达到 0.2~0.3 ns^[3]。随着喷泉钟等基准钟越来越多地应用于守时工作中, 全世界的守时能力大大提高, 因此需要更高精度的时间比对手段与之适应。TWSTFT 的主要不确定度源是周日效应, 周日效应在极端情况下峰峰值达到 2 ns^[4-5]。减少周日效应带给 TWSTFT 的影响是研究的热点问题^[6]。中华电信 (TL) 时间实验室黄毅军等人^[7-8]在 TL 与日本情报与技术研究所 (NICT) 的卫星双向比对实验中发现, 将软件接收机 (SDR) 技术应用于 TWSTFT 中可以减少比对中的周日效应。2016 年 2 月国际权度局 (BIPM) 在 CCTF TWSTFT 工作组会议上决定, 在国际链路上开展基于软件接收机 (SDR) 的 TWSTFT 的试验性研究^[9]。从 2016 年 7 月至今, 亚洲、欧洲、美洲 12 个实验室相继将软件接收机安装到传统双向时间传递系统中并与传统的卫星双向时间比对系统并行开展了欧亚、欧美、亚太间远程时间比对。在 CCTF 双向工作组会议上部分实验室分享了 SDR 双向比对数据, Z. Jiang 和黄毅军^[7-8, 10]也曾经分析比较部分实验室的 SDR 双向和传统双向结果, 但是都没有结合工作机理进行分析比较。

通过分析比较基于 SDR 技术的卫星双向时间比对 (后面简称“SDR 双向”) 和传统卫星双向时间比对 (后面简称“传统双向”) 两种时间比对技术的工作原理和比对结果数据, 验证 SDR 双向时间比对的性能, 为 SDR 双向时间比对链路将来成为 UTC/TAI 计算链路提供佐证。

1 卫星双向时间比对

卫星双向时间比对技术是远距离的时间实验室之间进行钟差测量的重要方法之一, 该技术在实现过程中, 根据接收设备不同分为传统双向和 SDR 双向。传统双向使用了 SATRE modem 作为接收机实现信号解调, 数据结果已经被用于国际原子时计算, 是国际认可的高精度时间传递方法。SDR 双向使用软件接收机进行信号解调和滤波, 目前在国际时间实验室已经开展了相关实验。下面详细分析以上两种时间比对方法的工作原理。

1.1 基于 SATRE modem 的传统卫星双向时间比对

传统卫星双向时间比对的工作原理是参加时间比对的两个地面站 1 和 2 同时发送本地原子钟信号到卫星, 并接收对方地面站发来的信号, 如图 1 所示^[11-12]。在地面站 1 本地原子钟信号经调制、上变频、功率放大后发射给卫星, 经卫星转发器把 1 站的原子钟信号转发给地面站 2。地面站 2 接收经卫星转发的 1 站原子钟信号, 经低噪放大、下变频、解调后与 2 站的原子钟信号作比较, 用计数器记录结果 T_{12} , 如公式 (1) 所示。在 1 站发射信号的同时, 2 站也以同样方式发射本地原子钟信号给 1 站, 因此在 1 站也用计数器记录结果 T_{21} , 如公式 (2) 所示。通过互联网数据交换, 在计数器读数中扣除卫星转发时延、Sagnac 效应时延、上下行路径时延、发射接收时延等各项误差后即可获得 1 和 2 两个地面站原子钟间的钟差, 如公式 (3) 所示^[13]。

$$T_{T12} = T_{TS2} - T_{TS1} + T_{TX1} + T_{SPU1} + T_{SCU1} + T_{SPT1} + T_{SPD2} + T_{SCD2} + T_{RX2}, \quad (1)$$

$$T_{T11} = T_{TS1} - T_{TS2} + T_{TX2} + T_{SPU2} + T_{SCU2} + T_{SPT2} + T_{SPD1} + T_{SCD1} + T_{RX1}, \quad (2)$$

式(1)和(2)中, $T_{T_{ik}}$, ($k=1, 2$, 下面相同)表示 k 站以本地 1 PPS 信号作为计数器开门信号, 接收到对方站 1 PPS 信号作为关门信号获得的计数器读数; $T_{T_{sk}}$ 表示 k 站钟面时刻, 具体指调制解调器发出 1 PPS 信号的时刻; $T_{T_{Xk}}$ 表示 k 站发射时延, 包括调制解调器时延; $T_{S_{PUk}}$ 表示 k 站信号上行时延; $T_{S_{CUk}}$ 表示 k 站上行路径中 Sagnac 效应时延; $T_{S_{PTk}}$ 表示 k 站信号通过卫星转发器的时延; $T_{S_{PDk}}$ 表示 k 站信号下行时延; $T_{S_{CDk}}$ 表示 k 站下行路径中 Sagnac 效应时延; $T_{R_{Xk}}$ 表示 k 站接收时延, 包括调制解调器时延。根据公式(1)和(2)计算可得 1 站和 2 站的钟差, 如下所示:

$$T_{TS1} - T_{TS2} = 1/2[T_{T11}] - 1/2[T_{T12}] + 1/2[T_{SPT1} - T_{SPT2}] - 1/2[T_{SCD1} - T_{SCU1}] + 1/2[T_{SCD2} - T_{SCU2}] + 1/2[T_{SPU1} - T_{SPD1}] - 1/2[T_{SPU2} - T_{SPD2}] + 1/2[T_{TX1} - T_{RX1}] - 1/2[T_{TX2} - T_{RX2}], \quad (3)$$

式(3)中, $1/2[T_{T11}]$ 表示 1 站计数器读数, $1/2[T_{T12}]$ 表示 2 站计数器读数, $1/2[T_{SPT1} - T_{SPT2}]$ 表示 1 站和 2 站信号卫星转发时延差, $1/2[T_{SCD1} - T_{SCU1}]$ 表示 1 站的上/下行 Sagnac 效应时延差, $1/2[T_{SCD2} - T_{SCU2}]$ 表示 2 站的上/下行 Sagnac 效应时延差, $1/2[T_{SPU1} - T_{SPD1}]$ 表示 1 站上/下行时延差, $1/2[T_{SPU2} - T_{SPD2}]$ 表示 2 站上/下行时延差, $1/2[T_{TX1} - T_{RX1}]$ 表示 1 站发射/接收时延差, $1/2[T_{TX2} - T_{RX2}]$ 表示 2 站发射/接收时延差。

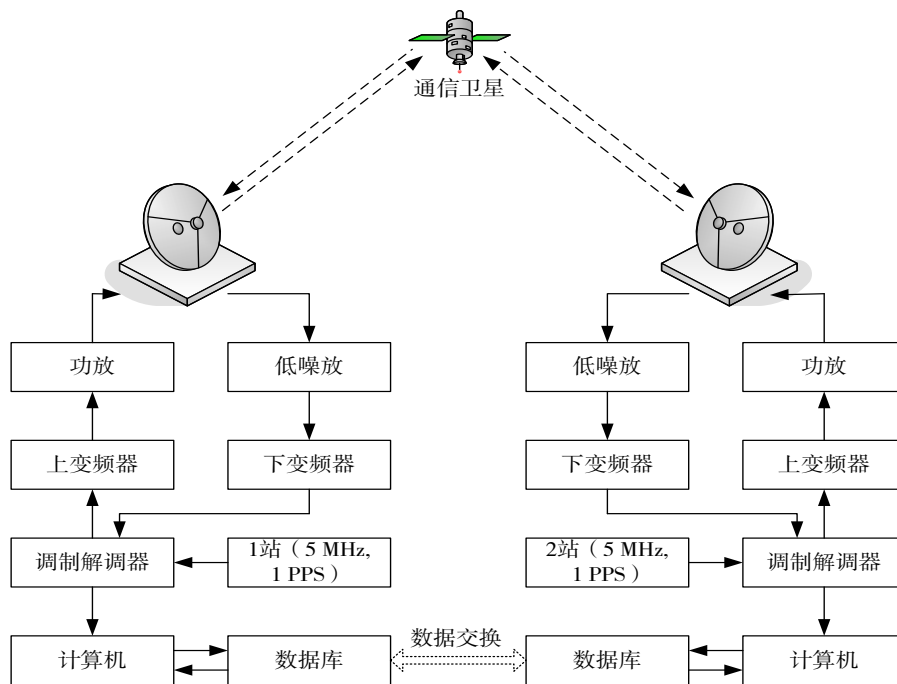


图 1 卫星双向比对原理

目前传统卫星双向比对中用到的接收设备是德国 Timetech 公司生产的 SATRE 调制解调器。它有一个发射通道, 2 个或 3 个接收通道。

1.2 基于软件接收机 (SDR) 的卫星双向时间比对

软件接收机的思想是以硬件平台为依托, 通过软件编程来实现接收机的功能, 软件接收机较传统接收机 (SATRE 调制解调器) 功能多, 灵活性更高。用于卫星双向时间比对中的软件接收机采用了基于 FPGA 的软件无线电外设 USRP N210, 与计算机通过以太网连接, 使得普通计算机能像高带宽的软件无

线电设备一样工作。USRP N210 面板图和内部结构分别如图 2 和图 3 所示，USRP N210 主要由高性能信号转换器（A/D 转换器和 D/A 转换器）、互联网接口、射频接口等和可编程处理器件（FPGA）组成^[14]。其中信号转换器的采样率范围 100~400 ms/s 且有 14 比特或 16 比特的分辨率，高采样率与分辨率保障了信号恢复时的保真率，大线性动态范围减少了互调失真，可以在强干扰背景下接收弱信号，信号处理带宽达到 100 MHz。FPGA 完成基带信号的处理，比如信号的调制解调，各种抗干扰、自适应均衡算法的实现。



图 2 USRP N210 面板图

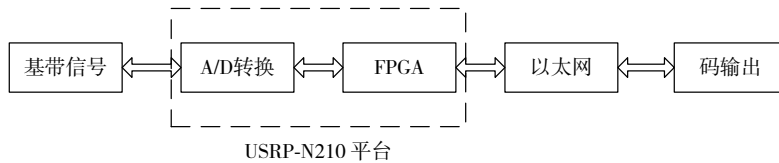


图 3 USRP N210 内部结构图

SDR 双向是在传统双向的基础上完成，工作原理与传统双向相似。上行发射部分与传统双向完全相同，如图 4 所示。下行接收部分用软件接收机代替了传统 SATRE，经过接收单元下变频器处理后的中频信号接入软件接收机的输入端，在软件接收机中完成信号模数转换、解调、滤波等过程，在软件接收机的输出端再接入带通滤波器，最后得到本地主钟信号与对方站主钟信号的差，通过互联网数据交换得到两地钟差。SDR 双向时间比对数据处理算法与传统双向的时间比对算法相同。

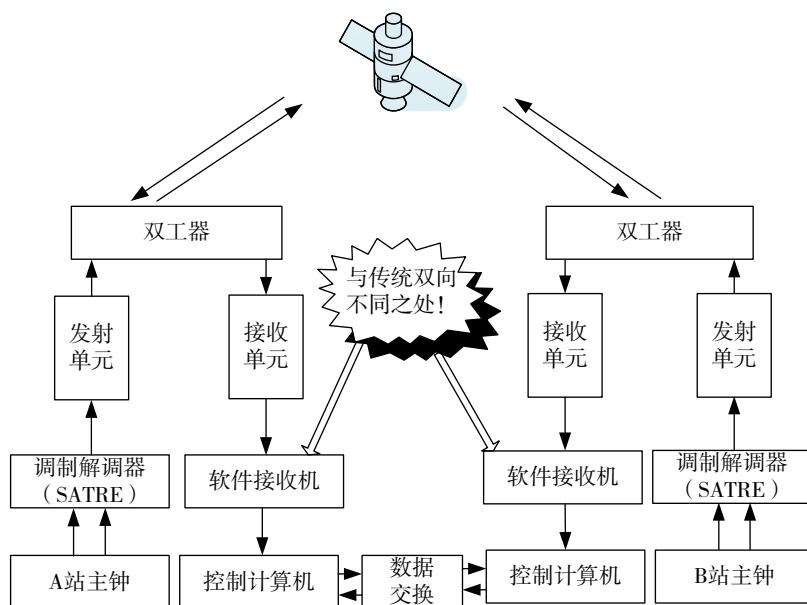


图 4 基于 SDR 双向比对原理图

1.3 SDR 双向与传统 SATRE 双向时间比对过程比较分析

1.2 节描述了基于软件接收机的卫星双向比对的过程，它与传统接收机实现卫星双向比对的过程仅是下行链路的差异，主要表现在信号解调过程、数字滤波和自适应均衡等。软件接收机主要采用了现场可编程门阵列（FPGA）技术，利用 FPGA 完成基带信号的处理，完成信号的解调、滤波等。它利用了 FPGA 的灵活性，在编程时使用了最优组合解调方法和恒包络技术，主要是围绕充分节省频谱和高效率的利用频带展开，恒包络技术能适应信道的非线性，减小信道对所传信号的影响，保持较小的频谱占用率。

在 FPGA 中使用了级联积分梳状（CIC）滤波器，CIC 滤波器是多速率滤波器，在数字系统中主要用于实现大采样率变化的数字滤波，在数字下变频中用于处理采样率远大于信号带宽的信号。CIC 滤波器主要实现 CIC 抽取器和 CIC 插值器，对输入信号用级联的 N 个单位幅度矩阵窗进行滤波的低通相应。CIC 滤波器响应是梳状滤波器部分，积分部分和过采样（对于插值）和降采样（对于抽取）的组合，提高了 CIC 滤波器的硬件实现效率。采用多级 CIC 滤波器级联的办法降低了旁瓣电平，基本实现了理想的低通滤波器。因此 SDR 双向时间比对精度理论上应该优于传统双向时间比对精度。

另外，传统双向时间比对的接收设备 SATRE modem 仅有 2~3 个接收通道，因此同一时刻只能同时接收 2 或者 3 个台站的信号，换句话说，同时段只能跟 2~3 个台站进行时间比对。一般情况下，多台站进行比对时，采用分时段两两台站进行比对，如果是奇数台站进行比对时，任何一个时间段总有一个台站在空闲，这样以来实际比对时间较卫星频段租用时间至少缩短了一半。而 SDR 双向时间比对中软件接收机可以同时接收 6 个台站甚至更多数据，这样每个台站都可以全时段与其他台站进行比对。所以 SDR 双向相对传统 SATRE 双向，实际比对时间增加了至少一倍。众所周知，卫星租赁费是卫星双向时间比对正常运转的大费用支出，约每个月每兆带宽 5~10 万人民币。因此利用 SDR 双向时间比对提高了无线电资源的利用率，节省了卫星租赁费用。

2 比对结果分析

从 2016 年 7 月至今国际上 70 多个时间实验室中，开展 SDR 双向时间比对的时间实验室有 12 个，他们分别是：欧洲实验室 PTB（德国）、OP（法国）、SU（俄罗斯）、IT（印度）、CH（瑞士）、AOS（波兰），亚洲实验室 NTSC（中国西安）、NIM（中国北京）、TL（中国台北）、NICT（日本）、KRIS（韩国），和美洲实验室 NIST（美国）。12 个实验室之间分别开展了欧洲与欧洲之间、欧亚之间、欧美之间传统 SATRE 双向和 SDR 双向时间比对。中国科学院国家授时中心（NTSC）于 2016 年 7 月开始欧亚 SDR 双向比对。

2.1 钟差结果

将相同地面站间相同时间段两种时间比对方法（传统双向与 SDR 双向）得到的钟差结果进行比较，理论上两种手段得到的比对结果应该一致^[10]，它们都表征了两个地面站主钟信号的相位差，钟差曲线的光滑程度表征了时间比对的精度。

如图 5、图 6、图 7、图 8、图 9 分别是 OP 与 PTB、NTSC 与 PTB、SU 与 PTB、OP 与 NIST、TL 与 NICT 间的时间比对结果，图（a）是传统双向比对结果，图（b）是 SDR 双向得到的比对结果。

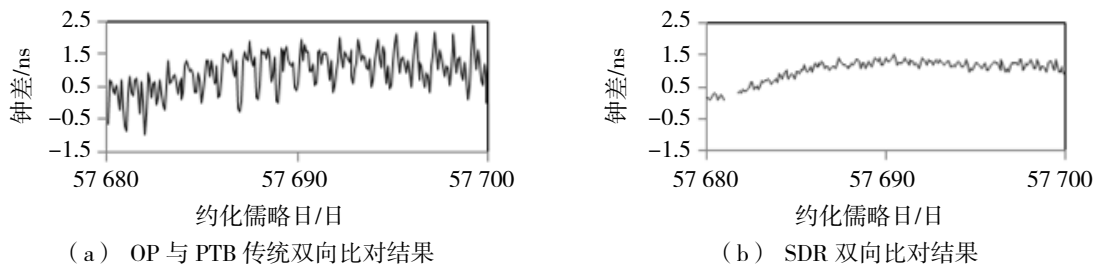


图 5 OP 与 PTB 传统双向和 SDR 双向比对结果

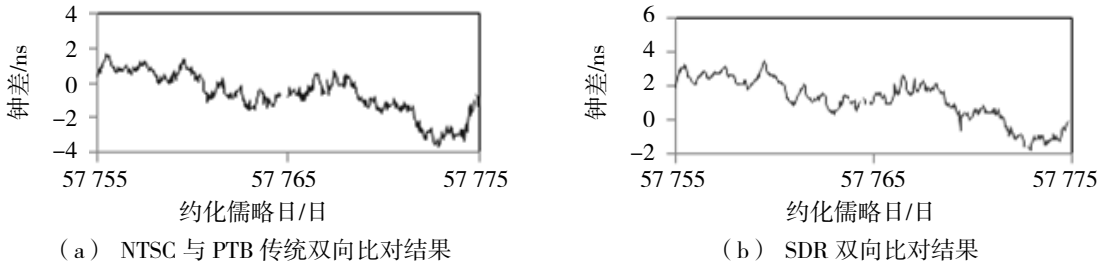


图 6 NTSC 与 PTB 传统双向和 SDR 双向比对结果

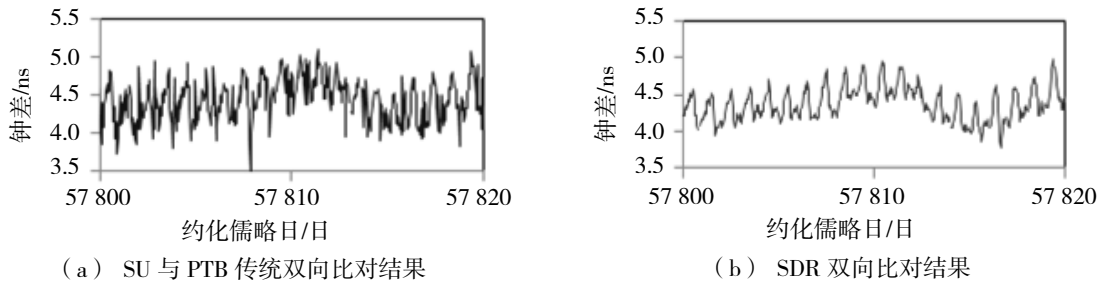


图 7 SU 与 PTB 传统双向和 SDR 双向比对结果

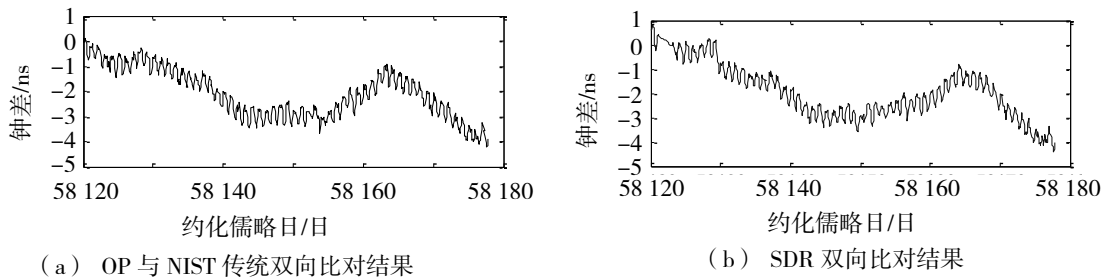


图 8 OP 与 NIST 的传统双向和 SDR 双向比对结果

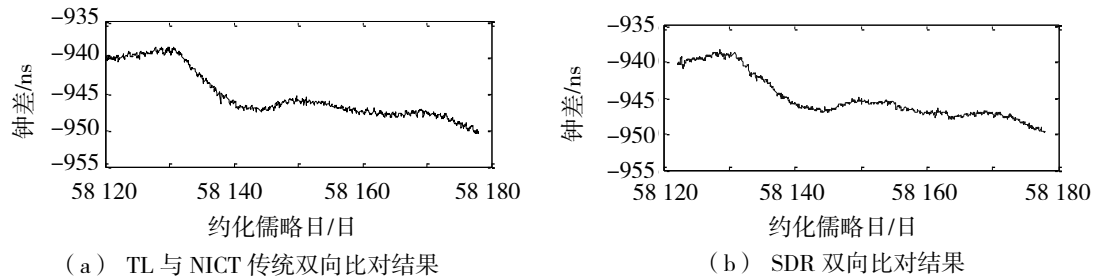


图 9 TL 与 NICT 的传统双向和 SDR 双向比对结果

从图 5 至图 9 可以看出：SDR 双向链路状态良好，与传统 SATRE 双向结果曲线保持一致；从大部分图中可以看出 SDR 双向比对精度明显优于传统 SATRE 双向的比对精度；从图 5、图 7、图 8 可以看

出传统 SATRE 双向比对结果中存在明显的周日变化,而在 SDR 双向比对结果中周日变化大大减小了,比对精度也提高了。

图 6 表示的 NTSC 与 PTB 间的时间比对和图 8 表示的 OP 与 NIST 之间的时间比对与其他几幅图的情况略有不同,主要原因是他们之间的距离都超过了 7 000 km,属于长基线的时间比对。在时间传递过程中受到传播路径上的各种因素影响,因此即使将 SDR 技术应用于双向链路中,链路噪声仍然没有太明显的变化。下面从时间方差结果分析比较两种比对技术的性能。

2.2 时间方差结果

时间方差也称为时间 Allan 方差,在时域上表征测量数据离散程度的稳定度^[15],表达式为:

$$\sigma_x(\tau) = \sqrt{(\tau^2/3) \cdot \text{Mod}\sigma_y^2(\tau)}, \quad (4)$$

式(4)中, $\sigma_x(\tau)$ 表示时间方差, $\sigma_y^2(\tau)$ 表示 Allan 方差的平方, τ 表示采样间隔。

根据公式(4)计算两种比对手段比对结果的时间方差,这里选取采样间隔为 10 ks,结果见表 1 所示。从表中可以看出,SDR 双向的时间方差都优于传统双向的时间方差,尤其是两站间距离较短的时间传递链路更为明显,7 条链路平均改善程度达到 44.9%。

表 1 时间方差 ($\tau=10$ ks 的时间方差) 比较

链路名称	两站距离/km	TDEV SDR TW/s	TDEV 传统 TW/s	SDR 较传统 改善程度
OP-PTB	<1 000	9.50×10^{-11}	3.50×10^{-10}	72.86%
IT-PTB	<1 000	1.40×10^{-10}	6.00×10^{-10}	76.67%
TL-NICT	<1 000	2.76×10^{-11}	1.05×10^{-10}	73.70%
SU-PTB	<2 000	8.80×10^{-11}	1.50×10^{-10}	41.33%
NTSC-PTB	>7 000	1.40×10^{-10}	1.60×10^{-10}	12.50%
OP-NIST	>7 000	9.00×10^{-11}	1.12×10^{-10}	19.64%
NIST-PTB	>8 000	9.00×10^{-11}	1.10×10^{-10}	18.18%

2.3 小结

2.1 节中比较了国际上不同地域(欧洲之间、欧亚之间和亚洲之间)的主要时间实验室之间基于两种接收机(软件接收机和 SATRE 调制解调器)的卫星双向比对钟差数据,从比较结果可以看出基于软件接收机的数据与基于传统接收机的数据曲线趋势保持一致,数据值保持一致(图 6 未扣除系统差)。2.1 节中用到的基于传统接收机的数据来自于 BIPM 网站,都是可靠的,除图 9 中的数据外都是用于国际原子时的数据。因此证明了基于软件接收机的数据也是可靠的。

2.2 节比较了这些链路基于两种接收机获得的钟差的时间方差(时间间隔取 10 ks),从比较结果可以看出基于软件接收机的数据结果较传统接收机获得的结果稳定性更好,尤其是在短基线的时间传递中更明显。

3 结语

国际原子时性能的提高,时间传递链路的性能改善是一个重要的支撑。为了解决周日变化对传统双向的影响,国际上开展了 SDR 双向的试验性研究。本文从理论上分析了 SDR 双向时间比对提高比对精度的原因,又结合实验数据从钟差结果和时间方差结果分析 SDR 双向较传统双向的性能变化。初步结

果表明 SDR 双向较传统双向时间比对性能有一定提高，这一结果将作为 SDR 双向链路纳入国际原子时计算的应用参考，对提高守时工作有重要意义。

参考文献：

- [1] BIPM. BIPM Circular T 351[DB/OL]. (2017-04-07)[2019-03-21]. <ftp://ftp2.bipm.org/pub/tai/Circular-T/cirhtml/cirt.351.html>.
- [2] BIPM. TWSTFT Calibration Guidelines for UTC Time Links V2016[DB/OL]. (2016-01-07)[2019-03-21]. <ftp://tai.bipm.org/TFG/TWSTFT-Calibration/Guidelines>.
- [3] JIANG Z, CZUBLA A, NAWROCKI J, et al. Comparing a GPS time link calibration with an optical fibre self calibration with 200 ps accuracy [J]. *Metrologia*, 2015, 52(2): 384–391.
- [4] TSENG W H, LIN S Y, FENG K M, et al. Improving TWSTFT short-term stability by network time transfer[J]. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 2010, 57(1): 161–167.
- [5] ZHANG V, PARKER T, ZHANG S. A study on reducing the diurnal in the Europe-to-Europe TWSTFT links[C]//30th European Frequency and Time Forum (EFTF), York: EFTF 2016 Local Organising Committee, 2016.
- [6] TSENG W H, FENG K M, LIN S Y, et al. Sagnac effect and diurnal correction on two-way satellite time transfer[J]. *IEEE transaction on instrumentation and measurement*, 2010, 60(7): 2298–2303.
- [7] HUANG Y J, TSENG W H, LIN S Y, et al. TWSTFT results by using software-defined receiver data[C]//30th European Frequency and Time Forum (EFTF), York: EFTF 2016 Local Organising Committee, 2016.
- [8] JIANG Z, HUANG Y J, TSENG W H, et al. Experience of TWSTFT SDR-BIPM Analysis[K]. BIPM TM260.
- [9] JIANG Z, HUANG Y J. Implementation of SDR TWSTFT in UTC Computation[K]. BIPM Technical Memorandum, TM267 2017.
- [10] TSENG W H, FENG K M, LIN S Y, et al. Sagnac effect and diurnal correction on two-way satellite time transfer[J]. *IEEE transaction on instrumentation and measurement*, 2010, 60(7): 2298–2303.
- [11] 李志刚, 杨旭海, 施浒立, 等. 转发器式卫星轨道测定新方法[J]. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2008, 38(12): 1711–1722.
- [12] 李志刚, 李焕信, 张虹. 双通道终端进行卫星双向时间比对的归算方法[J]. *陕西天文台台刊*, 2002, 25(2): 81–89.
- [13] I ITU radio communication sector 2015 the operational use of two-way satellite time and frequency transfer employing PN codes Recommendation[S]. ITU-R TF, 2015: 1153–1156.
- [14] 杨小牛. 软件无线电原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001: 95.
- [15] ALLAN D W. Statistics of atomic frequency standards[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1996, 54(2): 221–230.