

DOI: 10. 19650/j.cnki.cjsi.J1905616

基于软件接收机和间接链路的卫星双向时间比对性能分析*

王威雄^{1,2,3}, 董绍武^{1,2,4}, 武文俊^{1,2,4}, 王翔^{1,2}, 高喆^{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;
3. 中国科学院大学 北京 100049; 4. 中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049)

摘要:为改善卫星双向时间比对(TWSTFT)中的周日效应并探究其成因,利用当前 ABS-2A 卫星的亚欧国际双向时间比对的冗余性,选取不同时段不同基线长度的卫星双向时间比对链路进行分析。首先将硬件 SATRE TWSTFT 结果与软件接收机 SDR TWSTFT 进行比较,然后将 SATRE TWSTFT 和以亚欧不同实验室为中继站得到的间接 TWSTFT 结果进行对比分析,最后以完全独立于 TWSTFT 的 GPS 精密单点定位(PPP)时间比对为参考,对上述计算结果进行性能评估。结果表明,SDR TWSTFT 对亚欧以及亚洲 SATRE TWSTFT 时间偏差指标(TDEV)平均增益因子为 1.75 左右。以德国物理技术研究院为中继站的中国科学院国家授时中心和中国计量科学研究院之间的间接链路对直接链路的时间偏差平均增益因子为 1.22。

关键词: 卫星双向时间比对;冗余链路;软件接收机;间接链路;周日效应

中图分类号: TH714 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 160.75

Performance analysis of two-way satellite time and frequency transfer based on SDR receivers and indirect links

Wang Weixiong^{1,2,3}, Dong Shaowu^{1,2,4}, Wu Wenjun^{1,2,4}, Wang Xiang^{1,2}, Gao Zhe^{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;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: It needs to reduce the daily variation (diurnal) in the two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT) and explore the reasons. Using the redundancy of the current Asia-Europe international two-way time comparison network via ABS-2A satellite, TWSTFT links of different baseline lengths at different periods are selected. Firstly, the satellite time and ranging equipment (SATRE) TWSTFT results with the software-defined radio (SDR) receivers TWSTFT results are compared. Then, with different laboratories in Asia and Europe as a relaying laboratory, the results of SATRE TWSTFT direct and indirect links are compared. Finally, the GPS precise point positioning (PPP) time comparison, which is independent of TWSTFT, is used as a reference to evaluate the performance of the aforementioned results. Experimental results show that the average gain factor of SDR TWSTFT for Asia-Europe and Asia SATRE TWSTFT time deviation (TDEV) is around 1.75. For the baseline of National Time Service Center (NTSC) and National Institute of Metrology (NIM), the gain factor of TDEV is 1.22 for the indirect link via Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB).

Keywords: two-way satellite time and frequency transfer; redundant links; software-defined radio; indirect links; diurnal

0 引言

目前国际标准时间协调世界时(coordinated universal

time, UTC)是由国际权度局(bureau international des poids et mesures, BIPM)利用全球各守时实验室的 500 多台原子钟通过国际时间比对网统一归算产生^[1]。在时间比对网中,各守时实验室与中心节点实验室德国物理技

术研究院 (PTB) 之间建有多种时间比对链路, 这些链路互为冗余。卫星双向时间比对 (two-way satellite time and frequency transfer, TWSTFT) 是目前最准确的远距离时间比对技术之一, 从 1999 年起就用于 UTC 的计算, 目前全球主要守时实验室都通过硬件卫星时间和距离测量设备 (satellite time and ranging equipment, SATRE) 进行双向时间比对^[2]。然而实际比对过程中发现在亚洲和欧洲内部, 亚欧以及欧美之间的大多双向链路比对结果中都出现了明显的周日效应, 周日效应是卫星双向时间比对的主要不确定度误差源, 且目前对于其成因还没有确切的定论^[3]。

为减小周日效应对 TWSTFT 的影响, 2016 年, BIPM 的 Jiang 等^[4]利用第三站桥接建立间接链路的方式对欧洲内部双向链路的周日效应进行了研究, 发现当用距离较远的美洲实验室作为中继站时, 欧洲内部双向链路的周日效应会得到明显改善; 同年 2 月, BIPM 和国际时频咨询委员会 (CCTF) 卫星双向工作组共同开展了基于软件接收机 (software-defined radio, SDR) 的卫星双向时间比对的试点研究, 并在当时参与试验的亚洲和欧洲洲际内链路以及亚欧和欧美洲际间链路得到了比 SATRE 双向更好或至少相当的性能^[5]。基于全球性实验结果, 2017 年, 第 21 届 CCTF 大会正式通过了将 SDR TWSTFT 用于 UTC 计算的建议书^[6]。

目前对 SDR TWSTFT 和间接 TWSTFT 的研究主要集中在欧洲内部以及欧美链路之间, 且亚欧守时实验室在 2018 年 3 月通过俄罗斯的 ABS-2 A 卫星重新建立了 Ku 波段的卫星双向时间比对链路。本文根据目前的亚欧双向时间比对网, 对亚洲洲际内及亚欧洲际间的 SDR TWSTFT 和第三站桥接的间接 TWSTFT 链路进行分析, 并根据比对结果对 TWSTFT 中周日效应的成因进行探究。

1 卫星双向时间比对原理

目前亚欧卫星双向时间比对链路以 1 Mcps/s 码速率, 在卫星转发器带宽 1.7 MHz 下正常运行。

1.1 硬件 SATRE 和软件 SDR TWSTFT 原理

TWSTFT 利用地球同步通信卫星 (geosynchronous earth orbit, GEO) 转发地面两个守时实验室的主钟时间信号, 如图 1 所示。在地面站 1, 将与本地时钟同步的伪随机码 (pseudorandom noise, PRN) 信号通过二进制相移键控 (binary phase-shift keying, BPSK) 形式调制到 Ku 波段的载波频率上, 由甚小口径终端 (very small aperture terminal, VSAT) 发射到卫星, 经卫星的透明转发器转发到地面站 2, 地面站 2 接收到经卫星转发的 1 站的时间信号, 解调后与本地的时钟信号相比较, 同时地面站 2 进行

与地面站 1 相同的操作, 通过两站数据交换, 得到两地间的高精度钟差。每个参与双向比对的实验室都有特定的伪随机码用于信号发射。目前配置下 SATRE TWSTFT 和 SDR TWSTFT 共用 SATRE 发射通道, 发射信号都由 SATRE 的硬件发射通道产生。而接收通道分别进行配置, 天线接收到的信号由下变频器处理后分两路, 一路输入 SATRE 硬件接收通道进行解调, 另一路输入 SDR 软件接收机通道, 经信号放大和滤波、A/D 转换后再进行处理。因此, SDR TWSTFT 和 SATRE TWSTFT 可以分别独立地得到发射站与接收站的信号传输时间, 两者互为冗余^[7]。

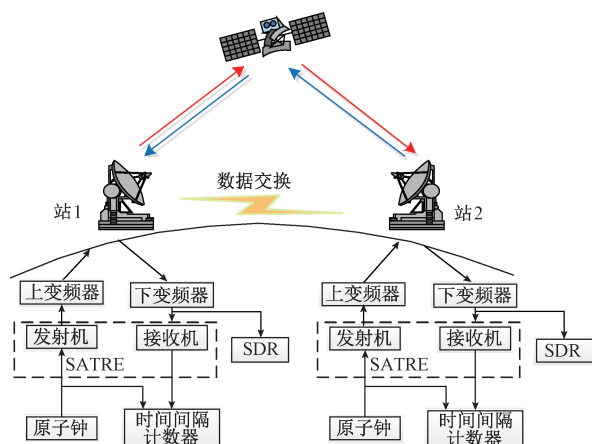


图 1 卫星双向时间比对原理

Fig.1 The principle of TWSTFT

站 1 和站 2 时间尺度间的差值计算公式如式 (1) 所示:

$$T_1 - T_2 = 0.5 \times (T_{TW1} + T_{CALR1} + T_{ESDVAR1} - T_{TW2} - T_{CALR2} - T_{ESDVAR2}) + T_{REFDLY1} - T_{REFDLY2} \quad (1)$$

式中: T_k 为本地时间尺度, k 表示站 1、2, 下同; T_{TWk} 为本地实验室测得的信号到达时延; T_{CALRk} 为双向比对中的标定时延; $T_{ESDVARk}$ 为卫星双向链路标定后的地面站时延变化; $T_{REFDLYk}$ 为本地时间参考点到双向设备的时延。

1.2 间接 TWSTFT 原理

间接链路是指以某个地面站为中继站, 分别计算另外两个地面站与中继站的双向时间比对结果后, 抵消掉中继站的钟差后, 间接获得两站之间的钟差^[8], 原理如图 2 所示。地面站 A 和地面站 B 之间为直接链路, 地面站 C 为中继站, 用 $(A - B)^{AC} = (A - C) + (C - B)$ 表示地面站 A 和地面站 B 之间以地面站 C 为中继站的间接链路, 例如, 以 PTB 为中继站, 中国科学院国家授时中心 (NTSC) 和中国计量科学研究院 (NIM) 之间的间接链路可表示为 $(NTSC - NIM)^{PTB} = (NTSC - PTB) + (PTB - NIM)$ 。

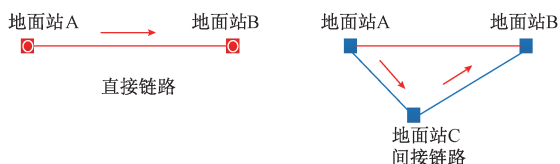


图2 间接双向时间比对原理

Fig.2 The principle of indirect TWSTFT

2 冗余链路的性能改善方法

目前参与 UTC 计算的时间比对链路主要有 TWSTFT 和通过 GNSS 导航系统的时间比对链路,在两站之间同时有多种时间比对链路的情况下,它们互为冗余。2010 年以前,只有 TWSTFT 和 GPS 时间比对链路中的一种用于 UTC 的计算。从 2010 年开始,利用时间比对链路的冗余性,SATRE TWSTFT 和 GPS 精密单点定位(precise point positioning, PPP)时间比对的融合开始用于 UTC 计算中^[9]。下文主要对 TWSTFT 的冗余链路展开讨论。

统计学中一般认为直接测量总是优于间接测量,因为多余的测量会带来新的不确定度分量,但这只适用于测量不确定度服从正态分布的情况下,卫星双向时间比对中的周日效应比测量噪声对链路稳定性影响更大,因此开展间接链路对直接链路周日效应的改善很有必要。另外,卫星双向时间比对网是高度冗余的,对于有 N 个节点实验室的 TWSTFT 网络,相互之间会有 $N(N-1)/2$ 条时间比对链路,而一般只有 $N-1$ 条链路会被用于 UTC 的计算,且该 $N-1$ 条 UTC 链路都可以通过剩余的 $N-2$ 条非 UTC 链路通过中继站间接链路的方式得到,再加上 SDR 双向链路,卫星双向时间比对网中的冗余链路更多。如何充分利用冗余链路以提高 TWSTFT 的稳定性和可靠性也是当前国际研究热点之一^[10]。以亚欧双向时间比对网为例,比对网中共有 6 个节点实验室,两两节点之间的双向链路共有 15 条,其中 5 条是目前的 UTC 计算链路,当前亚欧双向时间比对网的状态如图 3 所示,点划线为 UTC 计算链路,实线为非 UTC 计算链路。

GPS PPP 时间比对是与 TWSTFT 完全独立的技术,其不受周日效应的影响,它的统计不确定度可以达到 0.3 ns ^[11-12]。因此,本文用 GPS PPP 时间比对作为 SATRE 和 SDR TWSTFT 以及间接链路的参考,将同一基线的 SATRE、SDR 以及间接 TWSTFT 的结果与 GPS PPP 时间比对结果作差(double clock difference, DCD),由于是相同基线,所以用 DCD 可以消除两地原子钟性能对不同链路时间比对结果的影响。用 DCD 结果的标准差 σ 作为两种链路一致性的评价标准, σ 越小,则两种链路一致性越好。用时间偏差(time deviation, TDEV) σ_x 评估在不同时间间隔 τ 不同时间比对链路的稳定性,相同时间的 σ_x 越小,链路越稳定。并且用式(2)或式(3)的增益因子 c 来表示一

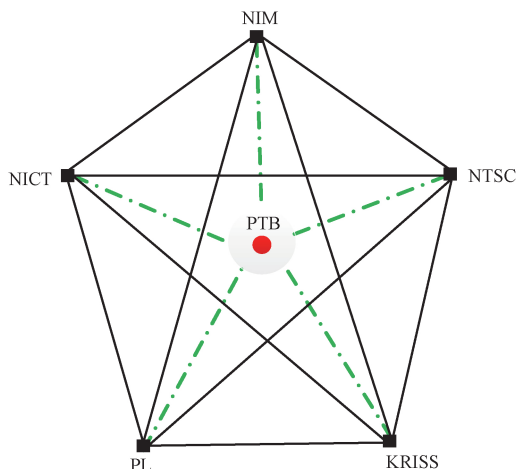


图3 当前亚欧双向时间比对网状态

Fig.3 Status of the Asia-Europe TWSTFT network

种时间比对链路相对于另一种的改善程度^[13]。

$$c_1 = \frac{\sigma(y_1)}{\sigma(y_2)} \quad (2)$$

$$c_2 = \frac{\sigma_x(y_1)}{\sigma_x(y_2)} \quad (3)$$

式(2)和式(3)中, $\sigma(y_1)$ 和 $\sigma(y_2)$ 表示不同时间比对链路 GPS PPP DCD 结果的标准差, $\sigma_x(y_1)$ 和 $\sigma_x(y_2)$ 表示不同时间比对链路的时间偏差。

3 比对结果与分析

试验选取不同时段不同基线长度的双向时间比对链路来分析 SDR TWSTFT 和间接 TWSTFT 链路的性能。本文利用 BIPM 发布的时间公报(T 公报)一个月的数据进行分析。

3.1 链路校准

时间比对链路时延标定是时间比对链路加入 UTC 计算的基本条件。国际上主要通过 GPS 移动校准站和卫星双向移动校准站对时间比对链路进行校准^[14-15]。当没有校准站对链路进行直接校准时,可以采用已校准链路对待校准链路进行校准。该试验利用已校准的 GPS PPP 链路对 SATRE 和 SDR TWSTFT 以及间接链路进行校准。具体方法是两站之间的 GPS PPP 链路对待校准双向链路采用同源信号,分别独立进行测量,得到 GPS PPP 时间比对结果和 TWSTFT 结果后作差,差值即为单次校准值。为平均测量噪声,一般选择采用 7 d 的数据进行解算,求取平均值即为校准值 C ,公式如式(4)所示。

$$C = \text{Link}(\text{PPP}) - \text{Link}(\text{TWSTFT}) = [\text{UTC}(k_1) - \text{UTC}(k_2)]_{\text{PPP}} - [\text{UTC}(k_1) - \text{UTC}(k_2)]_{\text{TW}} \quad (4)$$

式中: k_1, k_2 为待校准链路的实验室; C 为校准值; $[UTC(k_1) - UTC(k_2)]_{PPP}$ 为已校准链路的 GPS PPP 时间比对结果; $[UTC(k_1) - UTC(k_2)]_{TW}$ 为被校准链路的卫星双向时间比对结果。

3.2 基于 SDR 的 TWSTFT 性能分析

为方便数据传输,国际时频咨询委员会卫星双向工作组规定 SDR TWSTFT 的数据格式与 SATRE TWSTFT 的数据格式类似,都遵从国际电联 ITU-R TF.1153.4 建议书。SDR TWSTFT 采样率为每秒一个测量数据,每 300 s 的测量时段做一次二次曲线拟合,取该时段中点值作为标准点进行 TWSTFT^[16]。选取亚洲洲际内基线 NTSC-NIM2018 年 7 月~8 月(MJD58316-MJD58345)以及亚欧基线日本情报通信研究机构(NICT)-PTB2019 年 3 月~4 月(MJD58556-MJD58585)的 SDR 和 SATRE TWSTFT 数据进行解算,比对结果如图 4 和 5 所示。

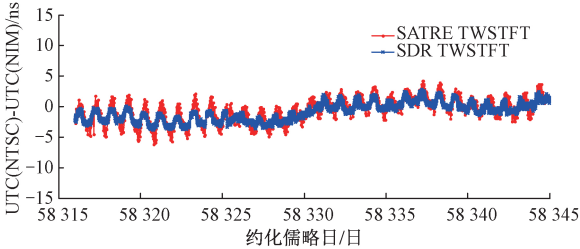


图 4 NTSC-NIM 链路卫星双向时间比对结果
Fig.4 The TWSTFT results for NTSC-NIM link

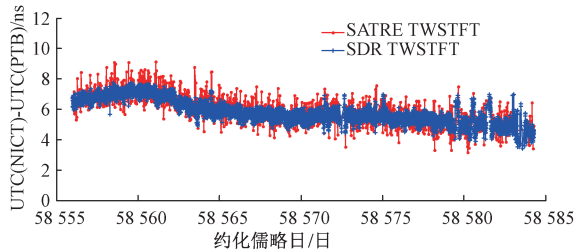


图 5 NICT-PTB 链路卫星双向时间比对结果
Fig.5 The TWSTFT results for NICT-PTB link

由图 4 和 5 可以看出,无论是亚洲洲际内链路还是亚欧洲际间链路,SDR TWSTFT 对 SATRE TWSTFT 的周日效应和短期稳定度都有明显改善,但 SDR 卫星双向比对结果中仍有残余的周日效应。NTSC-NIM 链路相比 NICT-PTB 链路有更明显的周日效应,这是因为 NTSC 和 NIM 都处于 ABS-2 A 卫星波束覆盖区域的边缘地带,因此有更多的不利因素会影响 NTSC-NIM 链路的时间比对性能,比如更低的信号接收功率以及更强的测量噪声等。图 6 和 7 所示分别为 NTSC-NIM 链路和 NICT-PTB 链路

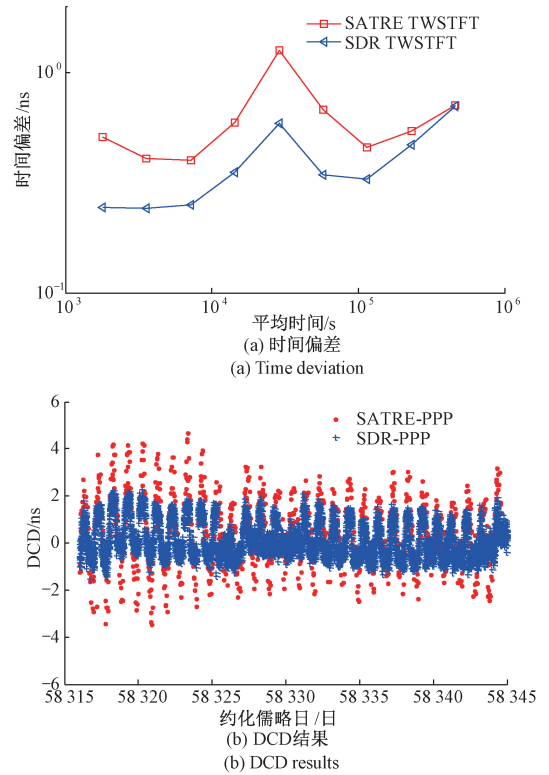


图 6 NTSC-NIM 链路 SATRE、SDR 卫星双向 TDEV 及与 GPS PPP DCD 情况
Fig.6 TDEV for SATRE and SDR TWSTFT of NTSC-NIM link and DCD results against GPS PPP

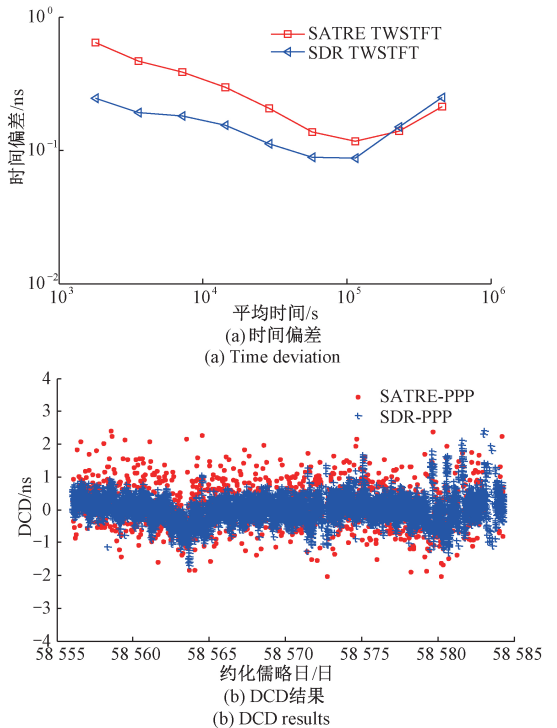


图 7 NICT-PTB 链路 SATRE、SDR 卫星双向 TDEV 及与 GPS PPP DCD 情况
Fig.7 TDEV for SATRE and SDR TWSTFT of NICT-PTB link and DCD results against GPS PPP

表 1 NTSC-NIM 和 NICT-PTB 链路 SATRE、SDR 卫星双向 TDEV 及与 GPS PPP DCD 统计情况

Table 1 TDEV for SATRE and SDR TWSTFT of NTSC-NIM and NICT-PTB links and DCD statistics against GPS PPP

链路	平均时间	SATRE 时间偏差/ps	SDR 时间偏差/ps	增益因子	SATRE-PPP 标准差/ps	SDR-PPP 标准差/ps
NICT-PTB	2 h	386	181	2.13	710	370
	4 h	295	153	1.93		
	8 h	206	112	1.84		
	16 h	137	89	1.54		
	32 h	116	87	1.33		
	增益均值			1.75		1.92
	平均时间	SATRE 时间偏差/ps	SDR 时间偏差/ps	增益因子	SATRE-PPP 标准差/ps	SDR-PPP 标准差/ps
NTSC-NIM	2 h	400	251	1.60	1 450	760
	4 h	592	353	1.68		
	8 h	1265	590	2.14		
	16 h	679	343	1.98		
	32 h	459	327	1.40		
	增益均值			1.76		1.91

从图 6 和 7 以及表 1 可以看出,在时间偏差稳定度指标上,亚欧 NICT-PTB 链路 SDR TWSTFT 对 SATRE TWSTFT 最大和最小增益因子分别为 2 h 的 2.13 和 32 h 的 1.33,平均增益因子为 1.75;亚洲内部 NTSC-NIM 链路 SDR TWSTFT 对 SATRE TWSTFT 最大和最小增益因子分别为 8 h 的 2.14 和 32 h 的 1.40,平均增益因子为 1.76。在 DCD 标准差指标上,亚欧 NICT-PTB 链路 DCD (SDR TWSTFT-GPS PPP) 对 DCD (SATRE TWSTFT-GPS PPP) 的增益因子为 1.92;亚洲内部 NTSC-NIM 链路 DCD (SDR TWSTFT-GPS PPP) 对 DCD (SATRE TWSTFT-GPS PPP) 的增益因子为 1.91。通过以上分析可知,在目前的亚欧双向时间比对网中,SDR TWSTFT 对于不同基线长度的 SATRE TWSTFT 的短中期稳定度以及周日效应都有明显改善,且改善程度相似。

3.3 基于间接链路的 TWSTFT 性能分析

如第 3 节所述,卫星双向时间比对网有高度的冗余性,每条双向时间比对链路都可以通过第三站中转的方式间接得到卫星双向时间比对结果,与常规 TWSTFT 比较,间接链路的 TWSTFT 可以突破基线长度的限制,并且不需增加额外的设备和测量。同样,试验选取亚洲洲际内基线 NTSC-NIM2018 年 7 月~8 月 (MJD58316-MJD58345) SATRE TWSTFT 数据,并分别以亚洲韩国国家计量院 (KRISS) 和欧洲 PTB 为中继站计算得到间接链路 NTSC-NIM 双向比对结果,选取亚欧基线 NTSC-波兰国家计量院 (PL) 2019 年 4 月~5 月 (MJD58591-MJD58620) 的 SATRE TWSTFT 数据,并分别以亚洲 NIM 和欧洲 PTB 为中继站计算得到间接链路 NTSC-PL 双向比对结果,由于不同双向时间比对链路观测时间点不同,

所以采用三次样条插值的方法将间接链路的时标与直接链路对齐^[17],两条基线的直接和间接链路比对结果如图 8 和 9 所示。

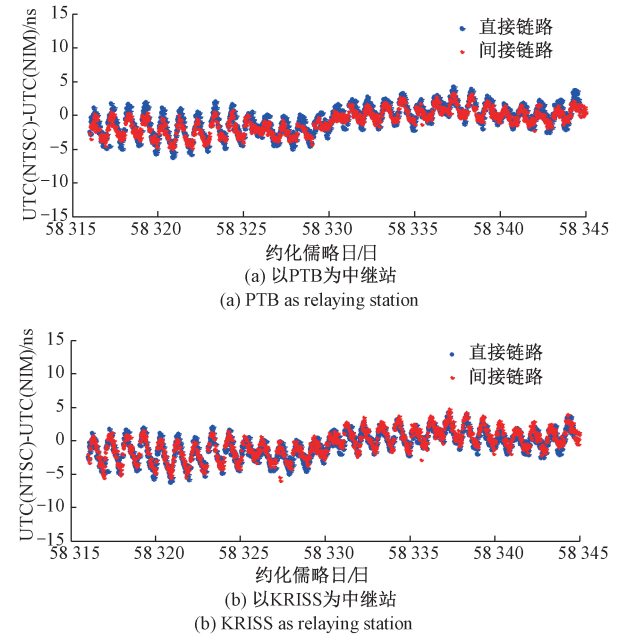


图 8 (NTSC-NIM)^{PTB}和(NTSC-NIM)^{KRISS}间接链路与直接链路比较

Fig.8 The comparison between direct link and indirect link for (NTSC-NIM)^{PTB} and (NTSC-NIM)^{KRISS} links

由图 8 和 9 可知,无论对于亚欧洲际间还是亚洲洲际内双向链路,利用中继站实现的间接卫星双向时间比对与直接链路计算的双向时间比对结果相一致,且通过

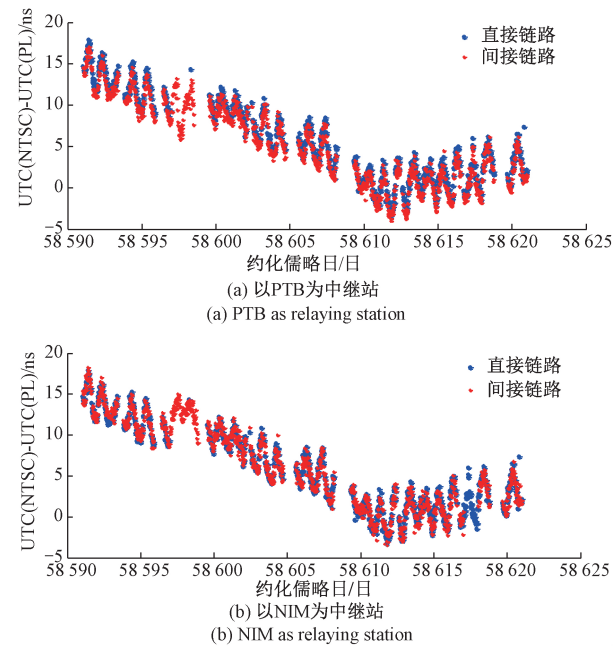


图 9 $(\text{NTSC-PL})^{\text{PTB}}$ 和 $(\text{NTSC-PL})^{\text{NIM}}$ 间接链路 with 直接链路比较

Fig.9 Comparison between direct link and indirect link for $(\text{NTSC-PL})^{\text{PTB}}$ and $(\text{NTSC-PL})^{\text{NIM}}$ links

GPS PPP 链路对间接链路的校准结果正确可靠。为对间接链路的性能进行评估,利用 GPS PPP 链路为参考,分别得到直接链路和间接链路 with GPS PPP 的 DCD 结果。直接链路和间接链路的时间偏差以及相应的 DCD 结果如图 10 和 11 所示。

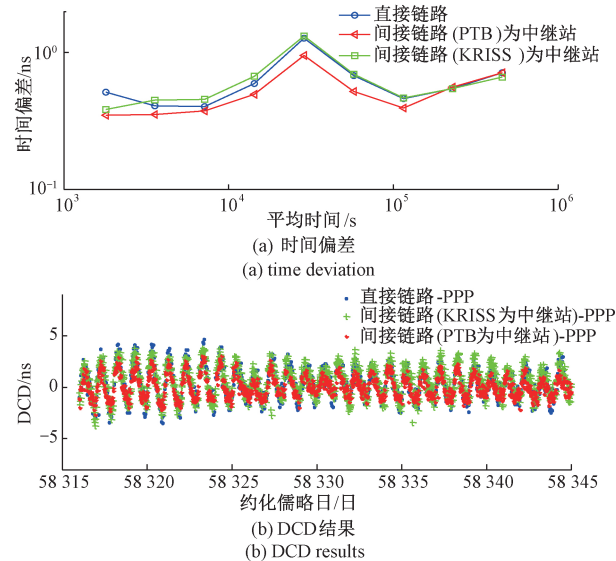


图 10 NTSC-NIM 直接和间接链路的时间偏差及与 GPS PPP 之间的 DCD 结果

Fig.10 TDEV for direct and indirect TWSTFT of NICT-PTB link and DCD results against GPS PPP

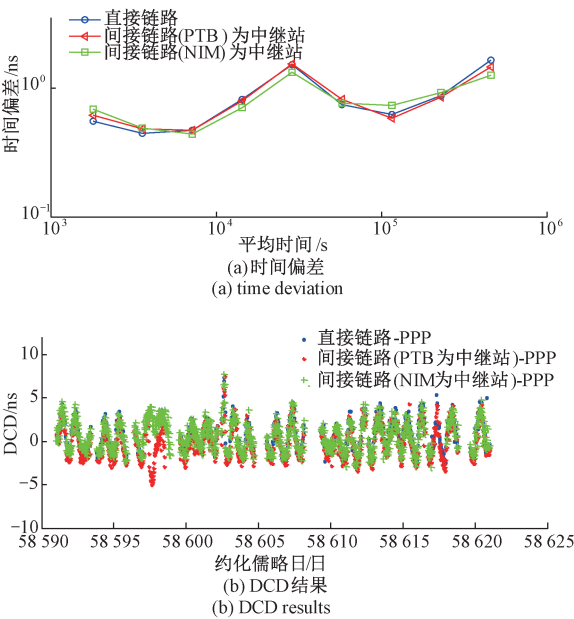


图 11 NTSC-PL 直接和间接链路的时间偏差及与 GPS PPP 之间的 DCD 结果

Fig.11 TDEV for direct and indirect TWSTFT of NTSC-PL link and DCD results against GPS PPP

表 2 所示为 NTSC-NIM 以及 NTSC-PL 直接和间接链路 with GPS PPP 之间的 DCD 统计情况,表 3 所示为 NTSC-NIM 以及 NTSC-PL 直接和间接链路的时间偏差统计情况。

表 2 NTSC-NIM 以及 NTSC-PL 直接和间接链路 with GPS PPP 之间的 DCD 统计

Table 2 The DCD statistics for direct and indirect TWSTFT of NTSC-NIM and NTSC-PL links against GPS PPP		
链路	均值	标准差
NTSC-NIM/ns	0.41	1.45
$(\text{NTSC-NIM})^{\text{KRISS}}/\text{ns}$	0.56	1.49
$(\text{NTSC-NIM})^{\text{PTB}}/\text{ns}$	0.06	1.09
NTSC-PL/ns	0.48	1.77
$(\text{NTSC-PL})^{\text{NIM}}/\text{ns}$	0.59	1.69
$(\text{NTSC-PL})^{\text{PTB}}/\text{ns}$	0.04	1.82

由图 9 和 10 的 DCD 结果并结合表 2 可知,NTSC-NIM 直接链路 with 间接链路的均值差最大为 0.35 ns, NTSC-PL 直接链路 with 间接链路的均值差最大为 0.44 ns, 都在目前卫星双向时间比对的 A 类不确定度 0.5 ns 以内,因此可以认为通过中继站实现的间接链路 with 直接链路有很好的 consistency。通过表 3 的时间偏差比较以及

表 3 NTSC-NIM 以及 NTSC-PL 直接和间接双向链路 TDEV 统计情况
Table 3 TDEV for direct and indirect TWSTFT of NTSC-NIM and NTSC-PL links

链路	平均时间/h	直接链路 TDEV/ps	间接链路(PTB) TDEV/ps	间接链路(KRISS) TDEV/ps	间接链路(PTB) 增益因子	间接链路 (KRISS)增益因子
NTSC-NIM	2	400	372	451	1.08	0.89
	4	592	492	667	1.20	0.89
	8	1 265	946	1 321	1.34	0.96
	16	679	517	690	1.31	0.98
	32	459	393	466	1.17	0.98
	增益均值				1.22	0.94

	平均时间/h	直接链路 TDEV/ps	间接链路(PTB) TDEV/ps	间接链路(NIM) TDEV/ps	间接链路(PTB) 增益因子	间接链路 (NIM)增益因子
NTSC-PL	2	470	465	439	1.01	1.07
	4	809	789	701	1.03	1.15
	8	1 515	1 520	1 312	1.00	1.15
	16	737	817	759	0.90	0.97
	32	623	581	733	1.07	0.85
	增益均值				1.00	1.04

表 2 DCD 结果的标准差比较可知,欧亚洲际间或亚洲洲际内链路以亚洲实验室为中继站或欧洲实验室为中继站,都至少可以得到与直接链路性能相当的间接链路双向时间比对结果。其中 NTSC-NIM 链路以 PTB 为中继站时,间接链路对直接链路的性能提升最大,DCD 结果标准差的增益因子为 1.33,时间偏差的平均增益因子为 1.22。

3.4 周日效应成因探究

对卫星双向时间比对中周日效应的研究已有多,但目前对其成因仍未有确定性结论,只是通过不同技术来抑制其影响。造成 TWSTFT 结果周日变化的原因有多种,例如卫星的周期性运动,太阳光照造成卫星转发器表面温度的不同,电离层延迟昼夜变化,地面站环境变化等造成的路径时延周日性变化。另外多站同时发射伪随机码信号造成频率带宽内的干扰以及 TWSTFT 工作频率带宽附近的信号干扰等也可以造成接收通道测量时延值的变化从而导致周日效应的出现,而这些因素很难一一量化得到。

通过上述分析可知,SDR TWSTFT 对亚欧洲际间以及亚洲洲际内的 SATRE TWSTFT 性能都有相同程度的改善,且通过原理可知 SDR TWSTFT 和 SATRE TWSTFT 共用发射通道而接收通道各自独立,所以 SDR 能够对

所有链路都有改善可能是因为 SDR 的接收通道在周日效应影响的到达时间测量上不如 SATRE 的接收通道敏感。

在间接链路中,以 PTB 为中继站的 NTSC-NIM 的间接链路对直接链路改善较为明显,可能是因为亚洲实验室和欧洲实验室分别位于卫星转发器的两侧,在任意时刻处于亚洲一侧的转发器要同时接收 4 个实验室发射的调制信号,而在欧洲一侧只有 2 个,因此亚洲内部的双向链路受频带内信号干扰较大,周日效应明显,而通过 PTB 中继后,干扰得到了有效抑制,这也可以进一步解释通过 KRISS 中继后 NTSC-NIM 链路性能稍变差的原因。而 NTSC-PL 链路以 NIM 和 PTB 为中继站后得到的间接链路都没有得到明显改善,这是因为造成干扰的状况并没有改变,欧亚双向链路结果中的周日效应还和其他因素有关。

4 结 论

本文对亚欧洲际间 NTSC-PL、NICT-PTB 以及亚洲洲际内 NTSC-NIM 双向链路,通过 SDR TWSTFT 和以亚欧实验室分别为中继站的间接 TWSTFT 与直接 SATRE TWSTFT 进行了比较分析。对 SDR TWSTFT 和间接链路的原理进行了概述,并采用 1 个月的数据得到了各链路

结果,并以各链路的时间偏差以及与 GPS PPP 的 DCD 结果的标准差为指标,对 SDR TWSTFT 和间接链路的性能进行了分析,得出以下结论:

1) SDR TWSTFT 对于亚欧洲际间以及亚洲洲际内的 SATRE TWSTFT 的短中期稳定度以及周日效应都有明显改善,且改善程度相似。

2) 利用中继站实现的间接卫星双向时间比对在亚欧洲际间和亚洲洲际内双向链路上与直接链路的性能基本相当,NTSC-NIM 链路以 PTB 为中继站的间接链路对直接链路的性能提升最大,DCD 结果标准差的增益因子为 1.33,时间偏差的平均增益因子为 1.22。

3) SDR TWSTFT 对 SATRE TWSTFT 的改善可能与 SDR 的接收通道不敏感有关,而间接链路对 SATRE TWSTFT 的改善可能与抑制了频带间信号干扰有关。

对 SDR TWSTFT 和间接 TWSTFT 的链路性能进行研究,一方面为 SDR TWSTFT 和间接链路将来正式加入 UTC 的计算提供了技术参考,另一方面对提高 TWSTFT 的稳定性和可靠性以及进一步探究周日效应的成因具有重要意义。

致 谢

感谢国际权度局提供的 SATRE 和 SDR TWSTFT 观测文件。

参考文献

- [1] 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.
DONG SH W, QU L L, YUAN H B, et al. Outstanding timekeeping activities of NTSC [J]. Journal of Time and Frequency, 2016, 39(3): 129-137.
- [2] 许龙霞, 陈婧亚, 李丹丹. 一种卫星双向时频传递设备时延差的标定方法 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 2084-2090.
XU L X, CHEN J Y, LI D D. Calibration method of delay difference of TWSTFT equipments [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9): 2084-2090.
- [3] ZHANG V, ACHKAR J, HUANG Y J, et al. A study on using SDR receivers for the Europe-Europe and transatlantic TWSTFT links [C]. ION Precise Time and Time Interval Meeting, 2017: 206-218.
- [4] JIANG Z, ZHANG V, PARKER T, et al. Accurate

TWSTFT time transfer with indirect links [C]. ION Precise Time and Time Interval Meeting, 2017: 243-255.

- [5] JIANG Z, 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.
- [6] LIN H T, HUANG Y J, TSENG W H, et al. The TWSTFT links circling the world [C]. IEEE International Frequency Control Symposium, 2014: 1-4.
- [7] 江志恒, 武文俊. 软件接收机 UTC 卫星双向时间传递 [J]. 时间频率学报, 2019, 42(3): 196-205.
JIANG Z H, WU W J. UTC two-way satellite time and frequency transfer based on SDR [J]. Journal of Time and Frequency, 2019, 42(3): 196-205.
- [8] 王威雄, 董绍武, 武文俊, 等. 中继式卫星双向时间比对研究 [J]. 时间频率学报, 2018, 41(4): 307-316.
WANG W X, DONG SH W, WU W J, et al. Two-way satellite time and frequency transfer based on relaying technique [J]. Journal of Time and Frequency, 2018, 41(4): 307-316.
- [9] JIANG Z, PETIT G, TISSERAND L, et al. Progress in the link calibration for UTC time transfer [C]. European Frequency and Time Forum & IEEE International Frequency Control Symposium, 2014: 861-864.
- [10] JIANG Z, ZHANG V, PARKER T, et al. Improving two-way satellite time and frequency transfer with redundant links for UTC generation [J]. Metrologia, 2019, 56(2): 1-14.
- [11] 广伟. GPS PPP 时间传递技术研究 [D]. 西安: 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2012.
GUANG W. Study on time transfer technology using GPS precise point positioning method [D]. Xi'an: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center), 2012.
- [12] 张继海, 广伟, 袁海波, 等. 北斗测距信号评估与精密单点定位应用研究 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(11): 2707-2714.
ZHANG J H, GUANG W, YUAN H B, et al. Study on range signal evaluation and precise point positioning application of Beidou navigation satellite system (BDS) [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(11): 2707-2714.

- [13] YAO J, SKAKUN I, JIANG Z, et al. A Detailed Comparison of Two Continuous GPS Carrier-Phase Time Transfer Techniques [J]. *Metrologia*, 2015, 52(5): 666-676.
- [14] 王威雄, 董绍武, 武文俊, 等. 卫星双向时间传递链路校准及其不确定度分析[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(12): 64-72.
- WANG W X, DONG SH W, WU W J, et al. Link calibration of two-way satellite time and frequency transfer and its uncertainty analysis [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(12): 64-72.
- [15] FELDMANN T, BAUCH A, PIESTER D, et al. Advanced GPS-based time link calibration with PTB's new GPS calibration setup [C]. *Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting (PTTI)*, 2010: 509-526.
- [16] HUANG Y J, TSENG W H, LIN S Y, et al. TWSTFT results by using software-defined receiver data [C]. *European Frequency and Time Forum*, 2017: 1-4.
- [17] 殷明, 梁翔宇, 段普宏. 结合 NSCT 与插值的图像超分辨率重建[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(1): 19-25.
- YIN M, LIANG X Y, DUAN P H. Image super-resolution reconstruction based on NSCT and interpolation[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(1): 19-25.

作者简介



王威雄, 2016 年于西安科技大学获得学士学位, 现为中国科学院国家授时中心博士研究生, 主要研究方向为标准时间的产生与保持(守时)技术、高精度时间与频率比对。

E-mail: wangweixiong16@mailsucas.ac.cn

Wang Weixiong received his B.Sc. degree from Xi'an University of Science and Technology in 2016. He is currently a Ph.D. candidate at National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include timekeeping techniques, high precision time and frequency transfer.



董绍武(通信作者), 2007 年于中国科学院国家授时中心获得博士学位, 现为中国科学院国家授时中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为标准时间的产生与保持(守时)技术、GNSS 时间系统等。

E-mail: sdong@ntsc.ac.cn

Dong Shaowu (Corresponding author) received his Ph.D. degree from National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences in 2007. He is currently a research fellow and Ph.D. supervisor at National Time Service Center, CAS. His main research interests include timekeeping techniques and GNSS time system.