

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2019-03-0196-10

软件接收机 UTC 卫星双向时间传递

江志恒¹, 武文俊^{2,3,4}

- (1. 国际权度局, 巴黎 F92312;
2. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
3. 中国科学院 时间频率基准重点实验室, 西安 710600;
4. 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 (TWSTFT) 是协调世界时 (UTC) 产生过程中的重要时间比对技术手段, 其精度可达 0.5 ns。目前, 全球大约有 20 多个时间保持水平最高的守时实验室利用卫星时间和测距设备 (SATRE) 进行连续的实验室间远距离卫星双向时间比对工作。然而 SATRE TWSTFT 的性能主要受到了周日效应的影响, 其在某些链路上变化幅度甚至可达 2 ns。2016 年 2 月, 国际权度局 (BIPM) 和国际时频咨询委员会 (CCTF) 卫星双向工作组 (WGTWSTFT) 共同发起了基于软件接收机 (SDR) 的国际卫星双向时间比对试验研究, 并取得了较为满意的结果。对该研究小组的工作进行了简单的回顾, 主要以 SATRE TWSTFT 和 GPS PPP 或 IPPP 技术为参考对 SDR TWSTFT 进行了分析评估, 结果表明: SDR TWSTFT 在洲际内的多数链路上对 SATRE TWSTFT 的周日效应的平均增益因子为 2~3, 而在洲际间的长基线链路上改善了 30%~40%。从 2017 年 10 月开始, SDR 卫星双向成为了 UTC 时间比对链路的备份链路, 预计未来几年将成为 UTC 时间比对的正式链路。

关键词: 协调世界时; 软件接收机; 卫星双向时间频率传递; 周日效应; 不确定度

UTC two-way satellite time and frequency transfer based on SDR

JIANG Zhi-heng¹, WU Wen-jun^{2,3,4}

- (1. Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Paris F92312, France;
2. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
4. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101048, China)

Abstract: Two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT or TW for short) is a primary technique with precision of 0.5 ns for the generation of coordinated universal time (UTC). About 20 leading time laboratories around the world carry out continuously TWSTFT via Satellite and SATRE. One of the major uncertainty sources is the diurnal in the SATRE TWSTFT measurements. The observed peak-to-peak variations can be up to 2 ns in some cases. In 2016, the BIPM and the Consultative Committee for Time and Frequency

收稿日期: 2019-01-20; 接受日期: 2019-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11703030); 中国科学院“西部之光”人才培养计划西部青年学者基金资助项目 (XAB2017A06)

作者简介: 江志恒, 男, 研究员, 主要从事时间频率与大地测量研究。

(CCTF) working group (WG) on TWSTFT launched a pilot study on the application of SDR receivers in the UTC TWSTFT network. The results are satisfying. In this paper the SDR TWSTFT works are briefly reviewed and the results are compared with SATRE TWSTFT and GPS PPP or IPPP. It is indicated that within one continent the SDR TWSTFT link demonstrates a significant gain factor of 2-3 in reducing the diurnals and the continental STARE TWSTFT has been improved 30%-40% for the diurnals. The SDR TWSTFT became the backup UTC time transfer link since 2017 October and it is expected to be used formally for the generation of UTC in next several years.

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

0 引言

从 1999 年开始, 守时实验室所提供的卫星双向时间频率传递 (TWSTFT) 数据开始正式应用于协调世界时 (UTC) 的计算^[1]。TWSTFT 现已经是 UTC 实现中的首要时间比对技术, 其精度可达 0.5 ns ^[2]。在时间信号调制解调时, UTC 卫星双向时间比对链路主要采用卫星时间和距离测量设备 (SATRE)。但自从卫星双向连续整天比对后, 我们便在 SATRE TWSTFT 中发现了明显的周日效应现象。在某些极端的条件下, 该效应的变化幅度甚至可以达到 2 ns ^[3-4]。周日效应是目前 TWSTFT 的主要统计不确定误差源。

2016 年 2 月, 国际权度局 (BIPM) 和国际时频咨询委员会 (CCTF) 卫星双向工作组 (WGTWSTFT) 共同发起了基于软件接收机 (SDR) 的国际卫星双向时间比对试验研究, 全球范围内一共有 16 个守时实验室参与, 其中亚洲、欧洲和北美洲分别为 5 个、10 个和 1 个^[5-6]。亚洲洲际内卫星双向链路先后使用了欧洲电信卫星组织的 E172A 和 E172B 卫星, 亚欧链路通过俄罗斯的 AM22 卫星进行了试验, 卫星带宽为 2.5 MHz ^[7]。欧洲洲际内和欧美链路使用了加拿大卫星通信公司的 T-11N 卫星, 卫星带宽分别为 1.7 MHz 和 1.6 MHz ^[8]。由于 AM22 停止工作, 2018 年 3 月亚欧时频实验室已经通过俄罗斯的 ABS-2A 卫星, 重新建立了新的亚欧卫星双向时间比对链路。现全球 UTC 软件接收机卫星双向时间比对链路如图 1 所示。

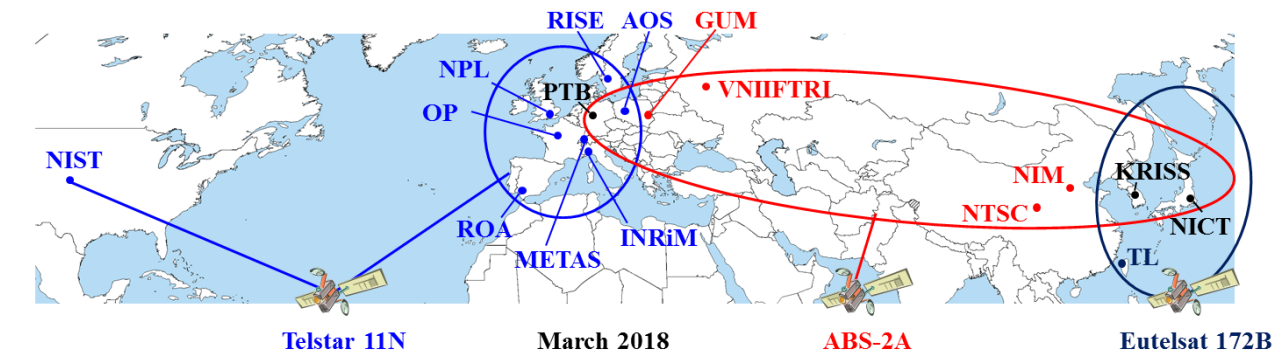


图 1 UTC 软件接收机国际卫星双向时间比对链路

在实际工作中, SDR TWSTFT 与 SATRE TWSTFT 共用 SATRE 发射通道, 接收通道与 SATRE 分别进行配置。亚洲和欧洲洲际内以及欧亚和欧美洲际间的卫星双向链路初步的试验表明: SDR 卫星双向具有更好或至少与 SATRE 双向相同的性能。利用 SDR 时, 尽管其链路仍然有残余的周日效应, 但在长基线的欧美链路上周日效应比原先的卫星双向减小了 30%~40%, 而欧洲洲际内的卫星双向周日效应对 SATRE TWSTFT 的

平均增益因子为 2~3。基于全球性试验所取得的实验结果，2017 年 WGTWSTFT 向 CCTF 提交了《UTC 产生中卫星双向时间比对不确定度改进》的建议书，并于第二十一届 CCTF 大会通过了该建议书。SDR 卫星双向时间比对将在近几年内正式用于 UTC 的计算。

1 UTC 软件接收机卫星双向时间比对

BIPM 使用卫星双向时间比对进行 UTC 计算已经有 19 年的历史了。由于其稳定的时间比对性能，它在 UTC 归算中一直占有重要的地位。近年来，卫星双向时间比对技术不断向前发展，在 SATRE 卫星双向时间比对的基础上，开始出现了 SDR 卫星双向时间比对。它的原理、标定方式以及数据交换情况描述如下。

1.1 原理

由于卫星双向时间比对双方站的信号相互对称，TWSTFT 中的大部分误差项被抵消，故该技术可以得到很高的时间比对精度。在每一个卫星双向时间比对站，发射信号都由 SATRE 的硬件发射通道产生，天线系统接收到的信号由下变器处理后分两路输入 SATRE 硬件接收通道和 SDR 软件接收机通道，然后 SATRE 和 SDR 分别可以对所收信号进行解调，得到对方发射站到本地接收站的信号传输时间^[9-11]，如图 2 所示。

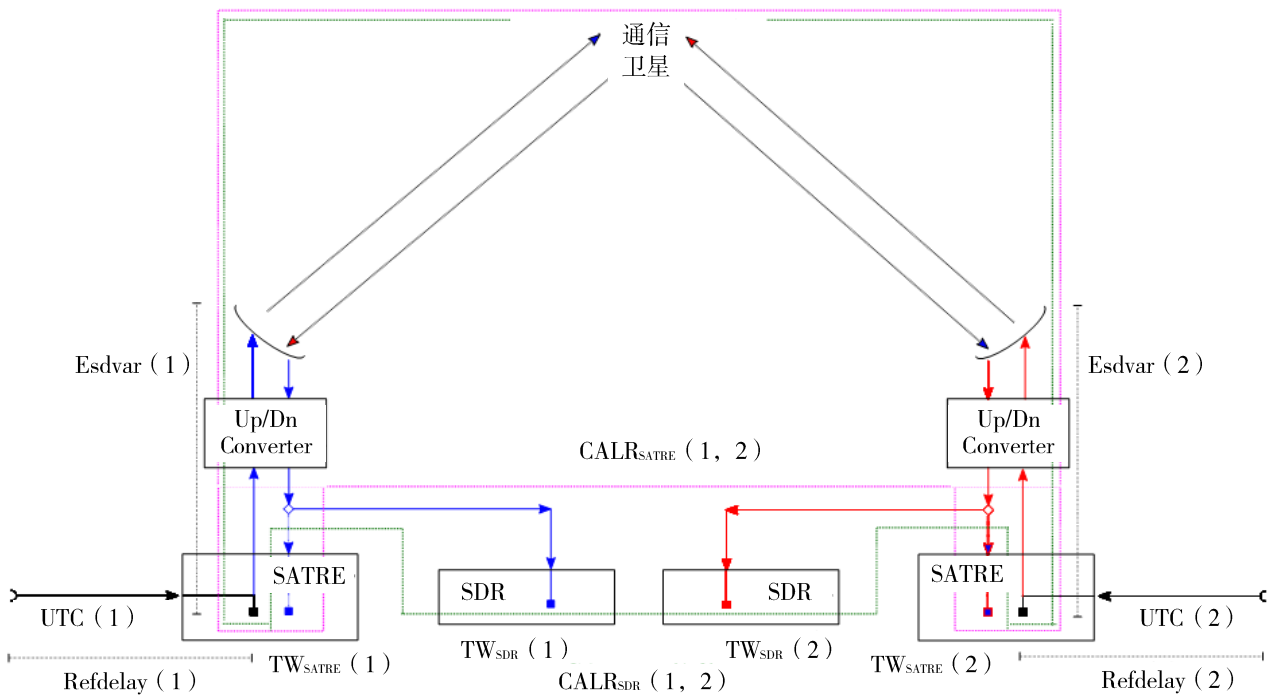


图 2 卫星双向时间比对原理

卫星双向时间比对的钟差如下：

$$\begin{aligned} \text{UTC}(1) - \text{UTC}(2) = & 0.5 \times [\text{TW}(1) + \text{CALR}(1,2) + \text{Esdvar}(1) - \text{TW}(2) - \text{CALR}(2,1) - \text{Esdvar}(2)] + \\ & \text{Refdelay}(1) - \text{Refdelay}(2), \end{aligned} \quad (1)$$

式 (1) 中，UTC(K) 为实验室本地时间尺度；TW 为本地实验室测量的信号到达时延；CALR 为卫星双向标定时延的 1/2；Esdvar 为卫星双向链路标定后的单站设备变化时延；Refdelay 为本地时间尺度定义点到卫星双向设备的时延。

1.2 标定及不确定度

时间比对设备时延测定是时间比对链路加入 UTC 计算的基本条件。根据卫星双向时间传递校准指南，SDR TWSTFT 标定可以分为两类：

① UTC 链路

a) 如果已有的 SATRE 卫星双向时间比对链路已经被标定，那么可以利用该链路对 SDR 卫星双向时间比对链路进行标定。在这种情况下，其校准识别号与 SATRE 链路保持一致。

b) 如果 SATRE 卫星双向链路没被校准，那么 SATRE 和 SDR 链路都需要使用卫星移动双向标校站或 GPS 移动校准站对其共同进行标定。

② 利用三角闭环方法对非 UTC 链路进行标校

国际权度局一般使用约定 A 类和 B 类不确定度来表征 UTC 时间比对链路的性能。所谓约定不确定度是一种保守不确定度，一般要比实际计算估计的不确定度大，以确保适用于所有同类 UTC 时间比对链路。SATRE 卫星双向时间比对链路的 A 和 B 类不确定度分别是 0.5 ns 和 1.0 ns(卫星双向移动站标定) 或 1.5 ns (GPS 移动站标定)。基于上述研究，BIPM 给出了 SDR 卫星双向的 A 和 B 类不确定度分别是 0.2 ns 和 1.0 ns (卫星双向移动站标定) 或 1.5 ns (GPS 移动站标定)。SDR TWSTFT 三角闭环 B 类不确定度与 SATER TWSTFT 一致，都为 2.0 ns。

1.3 数据格式的处理

软件接收机卫星双向时间比对的采样率为每秒一个测量数据。为方便数据传输以及节约服务器存储空间，WGTWSTFT 规定 SDR 卫星双向时间比对的数据交换格式与国际电联 ITU-R TF.1153.4 建议书相似^[12]。在数据交换时，每 300 s 的测量时段进行一次二次曲线拟合，取该时间段的中点作为标准点进行卫星双向时间比对计算。2017 年下半年，BIPM 已经在 UTC 的计算软件 Tsoft 中开发了相应的基于 SDR 的卫星双向时间比对标准计算程序，现 Tsoft 完全可以同时处理基于 SATRE 和 SDR 不同方式的卫星双向时间比对。

2 数据分析

UTC 每月进行计算并以时间公报的形式对全世界进行发布。因此，以月为单位对 SDR TWSTFT 数据分析是合理的。以下使用 SATRE 卫星双向、GPS 精密单点定位 (GPS PPP) 和 GPS 载波相位整周模糊度精密单点定位 (GPS IPPP) 多种不同的时间比对方式与 SDR 卫星双向时间比对进行对比分析^[13]。

2.1 SATRE 与 SDR 卫星双向之间的比较分析

法国巴黎天文台 (OP) 和德国物理技术研究院 (PTB) 之间的卫星双向时间比对是一条欧洲内部的主要 UTC 时间比对链路，这两个实验室具有丰富的卫星双向时间比对经验，链路维护良好且运行可靠。但 OP-PTB 的 SATRE 卫星双向时间比对噪声较大，且存在着幅度为 2 ns 左右的周日效应，如图 3 所示。图 3 中选取了 OP-PTB 链路 MJD 57 630~57 730 之间 100 d 的数据作为研究对象，从图 3 可以看出 OP-PTB 链路上的 SDR 卫星双向大大改善了 SATRE 卫星双向中的短期稳定度及周日效应。表 1 给出了 OP-PTB 链路上 SDR 和 SATRE 两种不同卫星双向时间比对链路上的时间偏差 (TDEV) 及二者的比较情况。从表 1 可以看出，平均时间为 2 h 时 SDR 和 SATRE 卫星双向时间比对的 TDEV 分别为 94 ps 和 307 ps，这证明该链路在 2 h 平均时间时的短期稳定度增益因子为 3.3，表 1 中最小和最大增益因子分别是 32 h 时和 8 h 时的 2.1 和 5.2，平均改善增益因子为 3.7。

通过俄罗斯 ABS-2A 卫星进行的德国物理技术研究院和中国科学院国家授时中心 (NTSC) 之间的卫

星双向时间比对链路是一条欧亚间长基线时间比对链路,该链路 10 d 的 SATRE 和 SDR 卫星双向时间比对结果如图 4 所示,此处链路未标定,仅体现链路稳定度性能。从图 4 可以看出该链路的 SDR 卫星双向与 SATRE 卫星双向相比,它的短中期稳定度也有了很大的提升。该链路不同平均时间时的增益因子与 PTB-OP 链路的结果相类似。

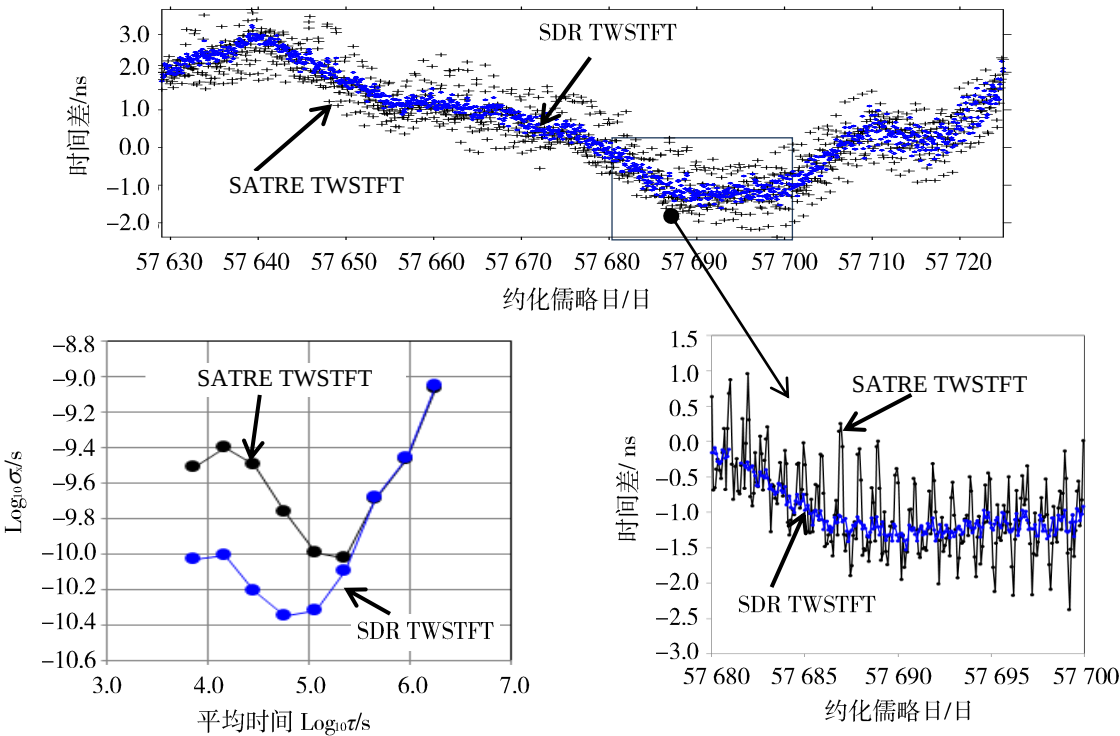


图 3 利用 T-11N 进行的 OP-PTB 卫星双向时间比对及其 TDEV 情况

表 1 OP-PTB 链路不同平均时间上的 SATRE 和 SDR 卫星双向时间偏差统计情况

平均时间	SATRE 时间偏差/ps	SDR 时间偏差/ps	增益因子
2 h	307	94	3.3
4 h	398	99	4.0
8 h	322	62	5.2
16 h	171	44	3.9
32 h	100	48	2.1
均值			3.7

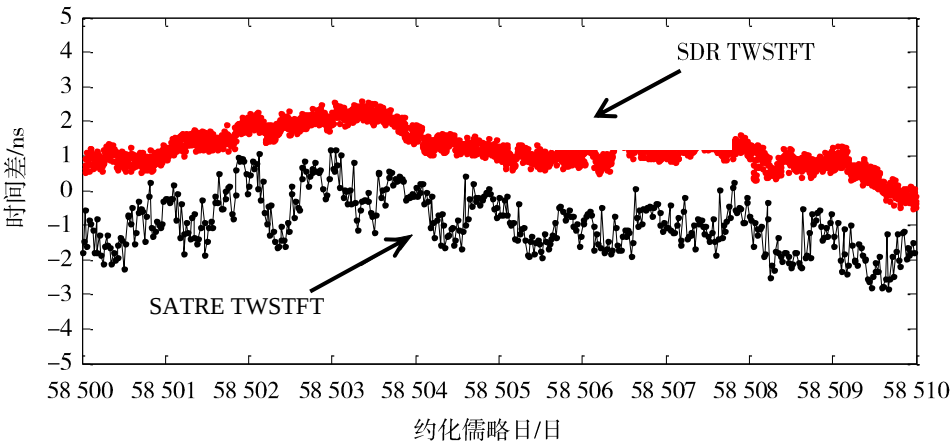


图 4 PTB-NTSC 卫星双向时间比对结果

2.2 卫星双向与 GPS PPP 与 IPPP 之间的比较分析

GPS PPP 或 IPPP 是与 TWSTFT 完全独立的时间比对技术，它基本不受周日效应的影响且其统计不确定度优于 0.3 ns。因此,GPS PPP 或 IPPP 是 SDR 和 SATRE 卫星双向很好的验证手段。将 SDR 和 SATRE 卫星双向分别与 GPS PPP 或 IPPP 时间比对之一作差 (DCD)，两个差中时间偏差较小的一个认为是更加稳定的。选取中华电信实验室 (TL) 和日本国家信息与通信技术研究所 (NICT) 亚洲洲际内的链路为研究对象，表 2 给出 2016 年 2 月 TL-NICT 链路 DCD 的时间偏差及其比较分析情况。从表 2 可以看出，DCD (SDR TWSTFT-GPS PPP) 对 DCD (SATRE TWSTFT-GPS PPP) 的增益因子均值为 2.3。

表 2 TL-NICT 链路 SDR 和 SATRE 与 GPS PPP 之间 DCD 的时间偏差统计情况

平均时间	(SATRE-GPS PPP) 时间偏差/ps	(SDR-GPS PPP) 时间偏差/ps	增益因子
1 h	140	40	3.5
2 h	90	45	2.0
6 h	125	38	3.3
12 h	79	48	1.6
24 h	68	59	1.2
均值			2.3

选取 2017 年 12 月 OP-PTB 和美国国家标准与技术研究院 (NIST) 和 PTB 两条链路上的卫星双向与 GPS IPPP 时间比对数据进行比较分析。图 5 是 OP-PTB 之间 SATRE、SDR 卫星双向和 GPS IPPP 时间比对及其 DCD 的结果。DCD (GPS IPPP-SATRE TWSTFT) 和 DCD (GPS IPPP-SDR TWSTFT) 的标准差分别为 0.521 ns 和 0.230 ns，其增益因子为 2.3，这与 TL-NICT 链路的情况相同。

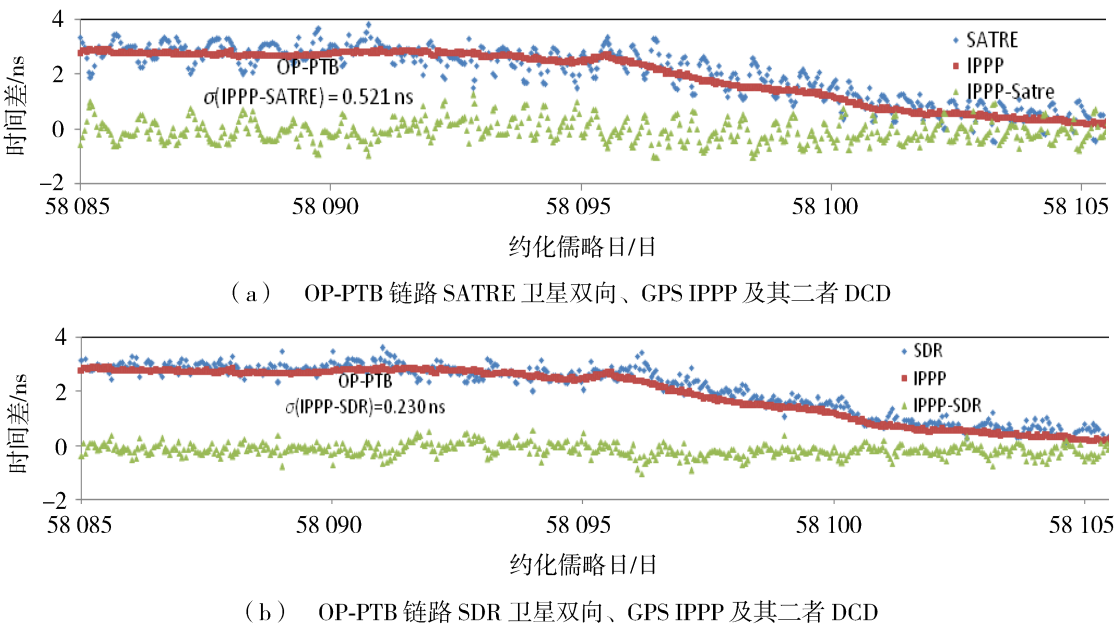


图 5 OP-PTB 链路 SATRE、SDR 卫星双向和 GPS IPPP 时间比对及其 DCD

在跨大西洋的 NIST-PTB 链路上,DCD(GPS IPPP-SATRE TWSTFT)和 DCD(GPS IPPP-SDR TWSTFT) 的标准差分别为 0.355 ns 和 0.267 ns，其增益因子为 1.3。以 GPS IPPP 为参考，SDR TWSTFT 的性能获得了 30%的提升。图 6 是 NIST-PTB 链路的 GPS IPPP 时间比对以及 DCD (GPS IPPP-SATRE TWSTFT) 和 DCD (GPS IPPP-SDR TWSTFT)。在图 6 中，SDR 卫星双向的周日效应幅度比 SATRE 卫星双向的周

日效应减低了 30%。图 7 是 DCD (GPS IPPP-SATRE TWSTFT) 和 DCD (GPS IPPP-SDR TWSTFT) 的时间偏差图, 显然后者的时间偏差优于前者的时间偏差。因此, 对于 NIST-PTB 链路来说, 在标准差和时间偏差两个指标上, SDR 卫星双向都优于 SATRE 卫星双向。

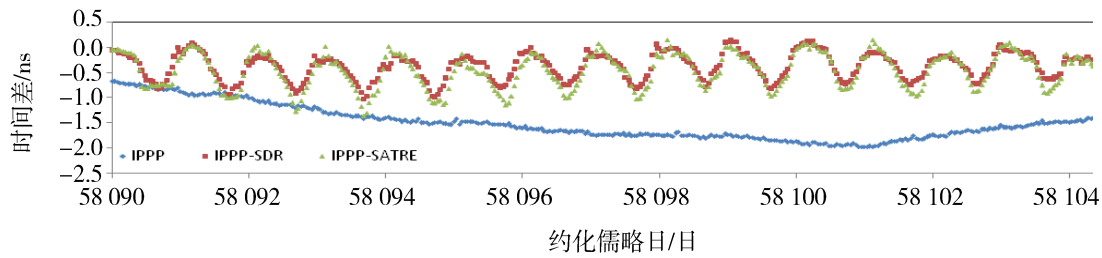


图 6 NIST-PTB 链路上 GPS IPPP 时间比对以及 DCD (GPS IPPP-SATRE TWSTFT) 和 DCD (GPS IPPP-SDR TWSTFT)

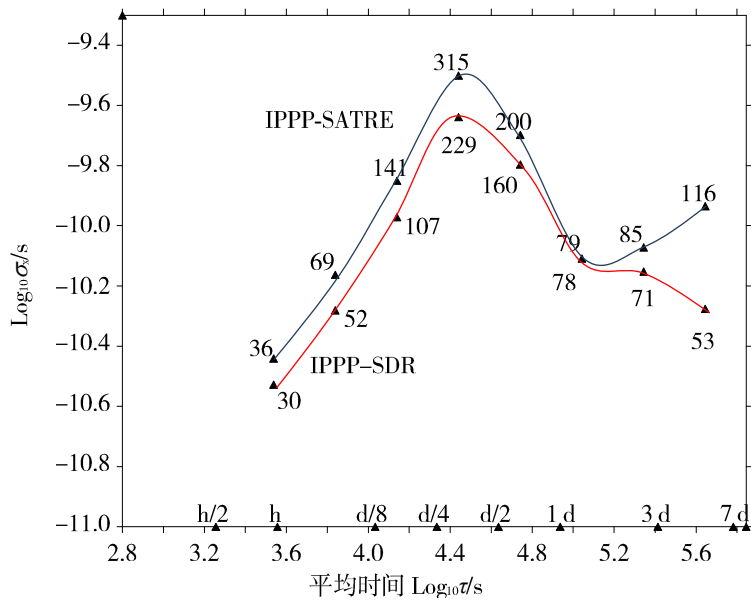


图 7 NTST-PTB 链路上的 DCD 时间偏差

2.3 三角闭环分析

在卫星双向时间比对中, 三角闭环是组成三角形的 3 条卫星双向时间比对链路的矢量和。理论上, 三角闭环的和是零。与 GPS 时间比对不同, TWSTFT 中的 3 条链路是完全独立的。因此, 非零闭合差可以很好地表征统计误差和系统差, 这其中周日效应是统计误差的主要来源。因此, 三角闭合差是 SDR 在 TWSTFT 中改善周日效应的重要表征参数。表 3 给出了亚洲, 欧洲和美洲之间通过不同卫星进行时间比对的 3 条闭合差结果。从表 3 中可以看出, 三角闭合差结果与 2.2 节情况一致, 即通过 T-11N 要比通过 AM22 和 E172A 进行的卫星双向时间比对噪声大。尽管如此, 3 条不同配置链路的增益因子却很接近, 其分别是 4.3, 4.8 和 4.5。因为非零闭合差是真误差, 故可以认为增益因子代表了 SDR 相比 SATRE 卫星双向的真实改善水平。

表 3 SATRE 和 SDR 三角闭合差的标准差

三角闭环/卫星	SATRE 标准差/ps	SDR 标准差/ps	增益因子
OP-NIST-PTB/T-11N	470	110	4.3
NICT-KRIS-TL/E172A	190	40	4.8
PTB-NTSC-SU/AM22	180	40	4.5
均值			4.5

以 NIST 为中转的 OP-NIST-PTB 三角闭环链路上，在 MJD 57 920~58 060 时间段上其 SDR 和 SATRE 卫星双向的三角闭合差的标准分别为 0.156 ns 和 0.566 ns，如图 8 所示。从图 8 可以看出，SDR 大大改善了 OP-NIST-PTB 卫星双向的性能。

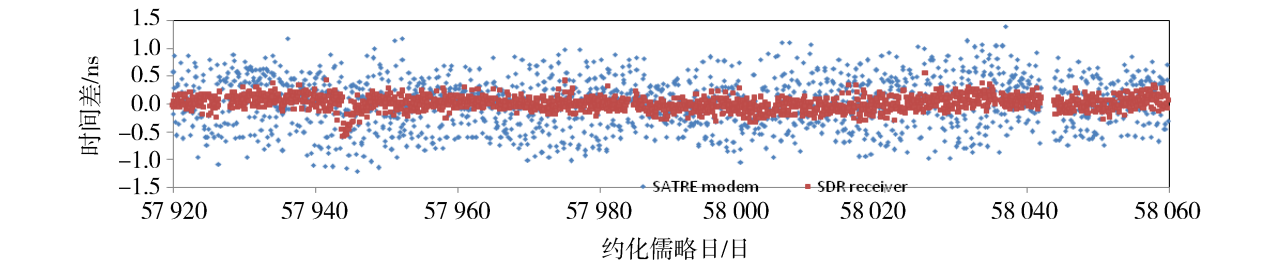


图 8 OP-NIST-PTB 链路上的 SDR 和 SATRE 卫星双向时间比对三角闭合差

3 软件接收机卫星双向时间比对的长期稳定度

长期稳定度是 UTC 时间比对链路的一项重要指标。通过 SATRE TWSTFT 和 GPS PPP 时间比对之间的相互比较表明：二者之间年变化在某些 UTC 链路上可以达到 2 ns^[14-15]。因此，将 SDR 和 SATRE 卫星双向以及 GPS PPP 时间比对链路进行长期性数据分析是十分必要的。在三者比较之前，先利用 1.2 小节中的标定方法将 SDR TWSTFT 链路进行标定，然后再对其进行比较分析。

3.1 SDR TWSTFT 与 SATRE TWSTFT 之间的长期稳定性比较分析

以 OP-PTB 欧洲内部链路为例，选取 6 个月的 SATRE 和 SDR 卫星双向时间比对数据进行对比分析，结果见图 9。为计算二者的偏移，图 9 对 DCD 进行了线性拟合，OP-PTB 链路上的 DCD (SATRE TWSTFT-SDR TWSTFT) 年变化为 0.279 ns，这表明 SDR TWSTFT 是长期稳定的。

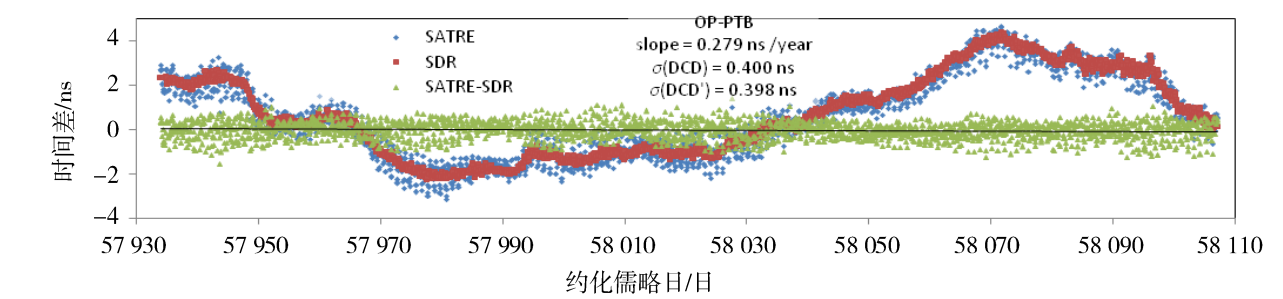


图 9 OP-PTB 链路上 6 个月的 SATRE 和 SDR 卫星双向以及二者 DCD (SATRE-SDR)

3.2 SDR TWSTFT 与 GPS PPP 之间的长期稳定性比较分析

GPS PPP 时间比对是目前 UTC 时间传递中比例最大的时间比对技术。选取 TL 和韩国标准与科学研究院 (KRISS) 亚洲洲际内部 750 d 的 SDR 卫星双向和 GPS PPP 数据进行比对分析，比对结果如图 10 所示。在图 10 中，GPS PPP 数据来自与 BIPM 发布的 Citr-T。DCD (SDR TWSTFT-GPS PPP) 的标准差为 0.92 ns。

在 OP-PTB 链路上，选取了 6 个月的数据进行了 SDR TWSTFT 和 SATRE TWSTFT 分别和 GPS PPP 的比较，见图 11。通过对 DCD (SDR TWSTFT-GPS PPP) 和 DCD (SATRE TWSTFT-GPS PPP) 进行线性回归分析表明，SDR，SATRE 卫星双向和 GPS PPP 之间分别有 2.22 ns/a 和 1.98 ns/a 的变化量。

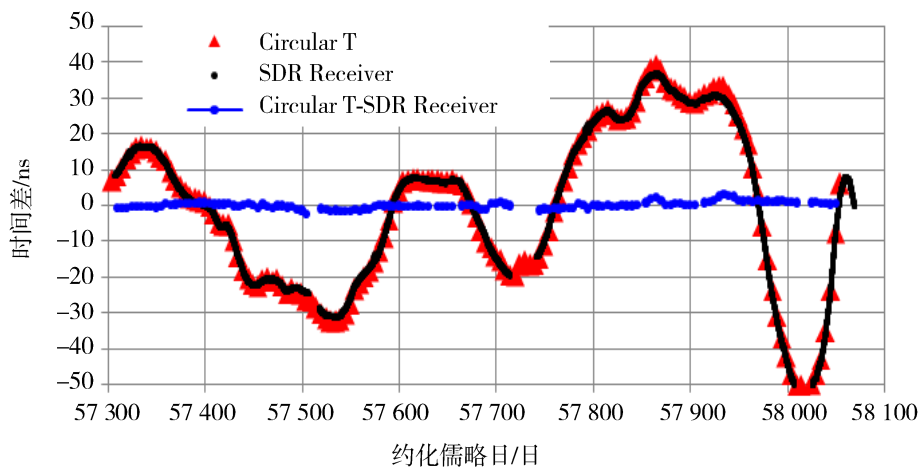


图 10 TL-KRISS 链路上的 SDR TWSTFT 和 GPS PPP 时间比对

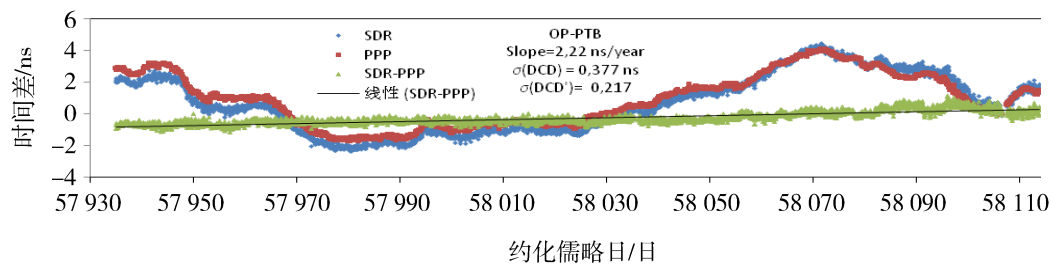


图 11 OP-PTB 链路 SDR TWSTFT 和 GPS PPP 时间比对及其 DCD

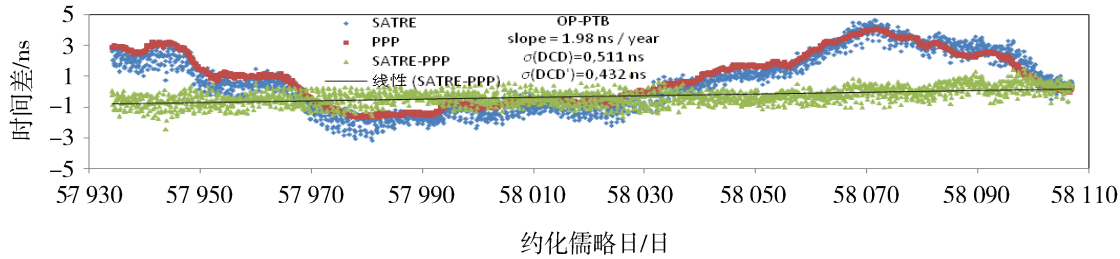


图 12 OP-PTB 链路 SATRE TWSTFT 和 GPS PPP 时间比对及其 DCD

4 结语

软件接收机卫星双向时间比对研究小组成立已有 2 年，本文简要回顾了 SDR 卫星双向研究小组的历史、SDR TWSTFT 相关技术原理与地面站配置并且给出了主要研究结果。在国际权度局的组织下，以 SATRE 卫星双向和 GPS PPP 或 IPPP 时间比对为参考，对软件接收机卫星双向时间比对的性能进行了全面的评估。通过多条主要国际时间比对链路分析表明：SDR TWSTFT 长期稳定，并比 SATRE TWSTFT 具有更好的稳定度或至少一样的性能，其对卫星双向中的周日效应在不同链路上有不同程度的改善。从 2017 年 10 月开始，SDR TWSTFT 已经成为 UTC 时间比对链路的正式备用链路。在近几年内，BIPM 将正式启用 SDR TWSTFT 进行 UTC 的计算。间接 SATRE TWSTFT 在某些链路上可以明显改善卫星双向时间比对的性能，因此在某些链路上间接 SDR TWSTFT 也可以明显改善其性能，另外，SDR TWSTFT 移动站标定和 SDR TWSTFT 与 GPS PPP 融合等方法都可以继续提高 SDR TWSTFT 的性能，这将是下一步需要开展的工作。

致谢：感谢全球参与 SDR 卫星双向的守时实验室提供的大量实验数据。

参考文献：

- [1] BIPM. Circular T-139[K]. Paris: BIPM, 1999.
- [2] JIANG Zhi-heng. Towards a TWSTFT network time transfer[J]. Metrologia, 2008, 45(6): S02.
- [3] 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.
- [4] PARKER T E, ZHANG V. Sources of instabilities in two-way satellite time transfer[C]//Conference: Frequency Control Symposium and Exposition, Vancouver: 2005 Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005.
- [5] ZHANG V, JOSEPH A, HUANG Y J, et al. A study on using SDR receivers for the Europe-Europe and transatlantic TWSTFT links[C]//Proceedings of the 48th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Monterey: [s.n.], 2017.
- [6] JIANG Z H, FELICITAS A, ZHANG V, et al. Implementation of SDR TWSTFT in UTC computation[C]//Proceedings of 49th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Reston: ION PTTL, 2018.
- [7] 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.
- [8] ZHANG V, PARKER T E. Two-way satellite time and frequency transfer using 1 MCHIP/S codes[C]//Proceedings of the 41st Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Santa Ana Pueblo: [s.n.], 2015.
- [9] Timetech. SATRE Modem User's Manual[K]. 2015.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] ITU Radio communication Sector 2015 The Operational Use of Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer Employing PN Codes Recommendation ITU-R TF.1153-4 (Geneva)[S]. 2015.
- [13] PETIT G, KANJ A, LOYER S, et al. 1×10^{-16} frequency transfer by GPS PPP with integer ambiguity resolution[J]. Metrologia, 2015, 52(2): 301–309.
- [14] JIANG Z J H, MATSAKIS D, ZHANG V. Long-term instability in UTC time links[C]//Proceedings of the 48th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Monterey: [s.n.], 2017.
- [15] LIN S Y, JIANGZ H. The long term stability and redundancy test of GPS multi-receiver ensemble[C]//Proceedings 2018 Precise Time and Time Interval Meeting, Reston: ION PTTL, 2018.