

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2020-03-0185-11

国产卫星双向时间比对设备性能评估分析

王茂磊^{1,2}, 肖胜红², 李冲², 张悦²

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030;
2. 北京卫星导航中心, 北京 100094)

摘要: 卫星双向时间比对是一种精度高、实时性强的远程时间比对技术, 在时间频率和卫星导航等领域得到了广泛的应用。介绍了某卫星双向时间比对系统基本情况, 设计了国产卫星双向时间比对设备性能评估方案, 在两类场景下分别从 4 个方面对国产卫星双向时间比对设备性能进行了分析评估, 比对了国产卫星双向时间比对设备与 SATRE (satellite timing and ranging equipment) 设备的差异, 得到了国产卫星双向时间比对设备性能达到国际同类设备水平的结论。研究成果可用于卫星双向时间比对设备研制、测试与应用推广。

关键词: 卫星双向时间比对; 性能评估; 比测

Performance evaluation analysis of domestic two-way satellite synchronous equipment

WANG Mao-lei^{1,2}, XIAO Sheng-hong², LI Chong², ZHANG Yue²

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;
2. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China)

Abstract: The two-way satellite time synchronization is a long-distance time comparison technology with high precision and strong real-time, which has been widely used in satellite navigation system and time-keeping system. We present the background of the two-way satellite time comparison and propose, subsequently, a design of the domestic two-way satellite time synchronization equipment performance evaluation scheme. In two different scenarios, the performance of domestic two-way satellite time comparison equipment is analyzed and evaluated in four aspects. For the differences between the domestic two-way satellite time synchronization equipment and SATRE equipment, the conclusion that the performance of the domestic two-way satellite time synchronization equipment is comparable to that of the foreign similar equipment is obtained. Our results can be used for the development, testing and application of the two-way satellite time synchronization equipment.

Key words: two-way satellite time synchronization; performance evaluation; comparison measurement

0 引言

卫星双向时间频率传递技术 (two way satellite time and frequency transfer, TWSTFT) 是目前精度最高

收稿日期: 2020-01-20; 接受日期: 2020-04-09

作者简介: 王茂磊, 男, 高级工程师, 主要从事卫星导航与时间频率研究。

的远距离时间比对技术之一^[1], 时间比对不确定度可达 1 ns 左右, 频率比对的不确定度可达 10^{-15} 量级^[2]。由于卫星双向时间频率传递具有测量精度与测站距离不相关、可同时进行测量数据交互等优点, 在时间频率、卫星导航等领域得到了广泛应用。

卫星双向时间频率传递基本原理是两个地面观测站分别测量经过卫星转发后的对方信号到达本地的时刻与本地时刻之间的时间偏差, 再将各自得到的时间差相减, 即可获得两个地面观测站的钟差^[3-4]。基本原理如图 1 所示。

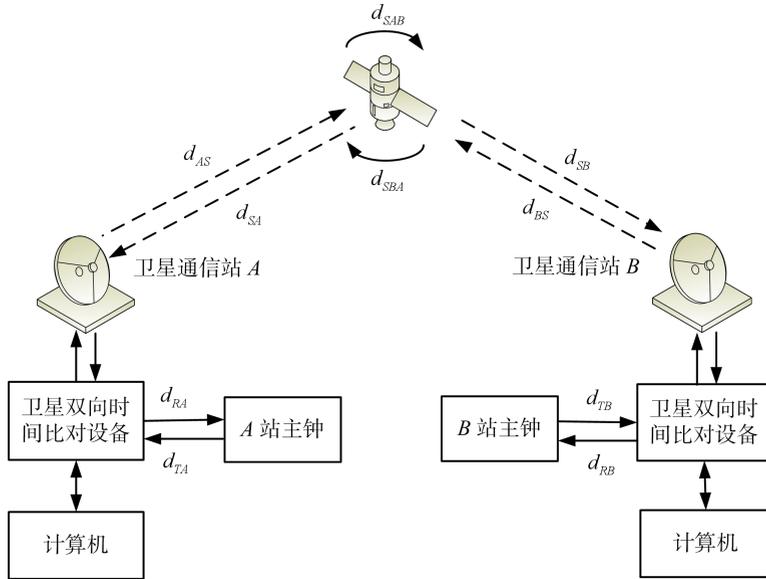


图 1 卫星双向时间比对原理图

根据图 1 可得:

$$T_A = A - B + d_{TB} + d_{BS} + d_{SBA} + d_{SA} + d_{RA} + S_B, \quad (1)$$

$$T_B = B - A + d_{TA} + d_{AS} + d_{SAB} + d_{SB} + d_{RB} + S_A, \quad (2)$$

式 (1) 和 (2) 中, T_A , T_B 为 A , B 两站时间间隔计数器的读数; A , B 为两站各自的钟面时间; d_{xx} 为图 1 中的各路径传播时延; S_A , S_B 是由于地球自转引起的 Sagnac 效应修正, 且 $S_A = -S_B$ 。

将式 (1) 中两式作差再移项^[5], 可得:

$$A - B = (T_A - T_B) / 2 + (d_{TA} - d_{RA}) / 2 - (d_{TB} - d_{SB}) / 2 + (d_{AS} - d_{SA}) / 2 - (d_{BS} - d_{SB}) / 2 + (d_{SAB} - d_{SBA}) / 2 + S_A, \quad (3)$$

式 (3) 右侧各项中, 第 1 项计数器读数可以直接计算; 第 2 项地面站设备时延可通过事先测量得到; 第 3 项表示空间传播时延, 包括几何路径时延、电离层时延和对流层时延, 其中对流层时延可完全抵消^[6]; 第 4 项表示卫星转发信号时延, 可以完全抵消; 第 5 项表示 Sagnac 效应的修正, 可通过公式准确计算。故而, 通过式 (3) 可求得 A , B 两站的原子钟差值。

图 1 中, 卫星双向时间比对设备可将原子钟时间信号变换为适合卫星传输的伪随机码扩频信号, 反之亦然。卫星双向时间比对系统不仅可完成两站之间的双向比对, 也可以在多站之间进行双向比对。当前, 国际上主流应用的卫星双向时间比对设备是德国的 TIMETECH 公司生产的 SATRE 设备^[7], 在 UTC (Universal Time Coordinate) 国际时间比对、地球同步轨道卫星测定轨等领域中得到了广泛应用, 国内一些科研单位也引进了该设备。国产卫星双向时间比对设备从无到有, 目前国内多家科研单位具备研制

生产能力，并在诸多系统中得到了良好应用。本文以某卫星双向时间比对系统为对象，设计了卫星双向时间比对设备性能评估方案，从用户使用的角度开展了相关性能评估试验，得出了在不同条件下国产卫星双向时间比对设备和 SATRE 设备测量性能基本相当的结论，为国产卫星双向时间比对设备研制生产、性能测试和推广应用等提供了参考依据。

1 某卫星双向时间比对系统概况

基于某地球同步轨道卫星（GEO）建立了3站时间比对系统，3站间相互距离在1 000 km 以上，如图2所示。

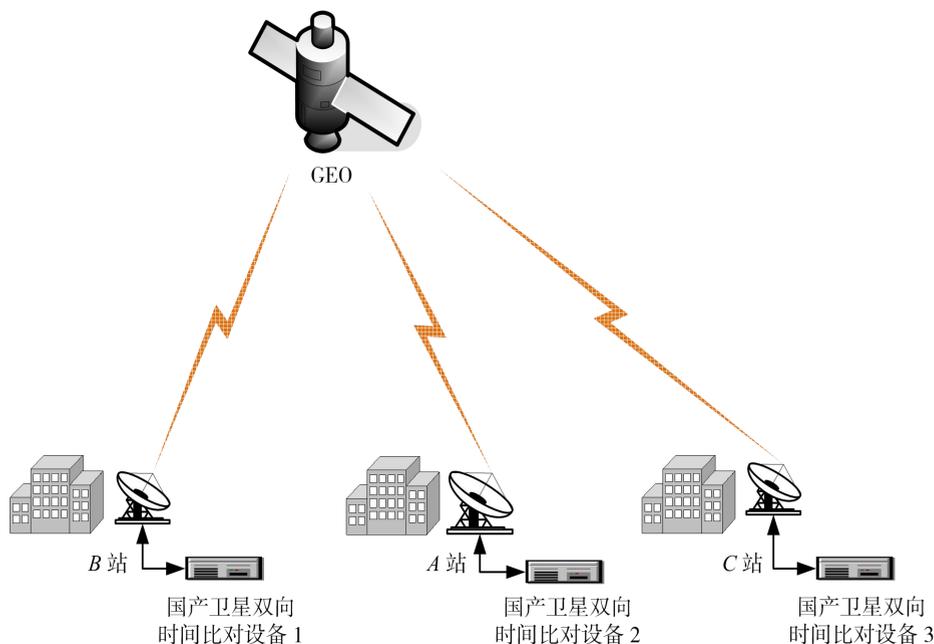


图2 某卫星双向时间比对系统构成图

该卫星双向时间比对系统工作在C频段，由3个站构成，可以实现任意两站之间的时间比对，每个站的国产卫星双向时间比对设备由国内3家不同的科研单位按照统一的技术要求研制，卫星双向比对信号采用直接序列扩频技术（DSSS）、码分多址体制（CDMA），伪随机码采用戈尔德码、码速率为5兆码片/s，信号调制方式为二进制相移键控（BPSK）^[8]。处于工作时，3站国产卫星双向时间比对设备按照设定好的伪随机码编号及有关信息约定，产生基带信号，并输出70 MHz中频信号，再经变频、放大、滤波等处理后，经天线辐射至卫星，由卫星转发后，各站分别接收他站信号经过低噪声放大、变频、滤波、解调、测量等处理过程输出测距结果^[9]。

2 国产卫星双向时间比对设备性能评估方案设计

对国产卫星双向时间比对设备性能评估的基本思路是比测法，即选取合适参考设备，尽量在同等条件下对国产卫星双向时间比对设备和参考设备的测量性能进行比较分析，获得国产卫星双向时间比对设备的测量性能。在进行评估方案设计时需要重点解决3个问题，一是参考设备的选择，二是评估试验系

统设计与实现，三是评估项目与内容的制定。

2.1 参考设备的选择

选择国际上使用较多的 SATRE 设备作为比测设备，其基本功能与性能指标如下^[10]：① 信号体制为直接序列扩频体制，输入输出均为 (70 ± 18) MHz (可调、分辨率为 0.001 Hz) 的中频信号；② 扩频码速率按照 1, 2.5, 5, 10 和 20 兆码片/s 可选，不同通道可分别设置不同的扩频码；③ 发射终端输出电平范围为 $-40 \sim 0$ dBm, 接收终端输入信号电平范围为 $-50 \sim 60$ dBm；④ 采用 NTP 方式或者 B 码对 SATRE 设备进行时间同步；⑤ 测距模式下分辨率为 0.3 cm (往返, @1 s), 时间比对模式下分辨率为 10 ps (@1 s)。

从上可知，该设备同样采用直接序列扩频体制、中心频点和伪码速率可灵活设置，尤其是可产生多种速率的伪随机码，当选择使用输出中频 70 MHz 和伪码速率 5 兆码片/s 时，与国产卫星双向时间比对设备一致，表明 SATRE 设备可与国产卫星双向时间比对设备共用信道，在最大程度上保证了两类设备工作条件的一致性，是作为评估设备的较好选择。

2.2 评估试验系统设计与实现

根据图 1 所示的某卫星双向时间比对系统概况，结合 2.1 节对 SATRE 设备的描述分析，设计国产卫星双向时间比对设备性能评估试验系统组成如图 3 所示。

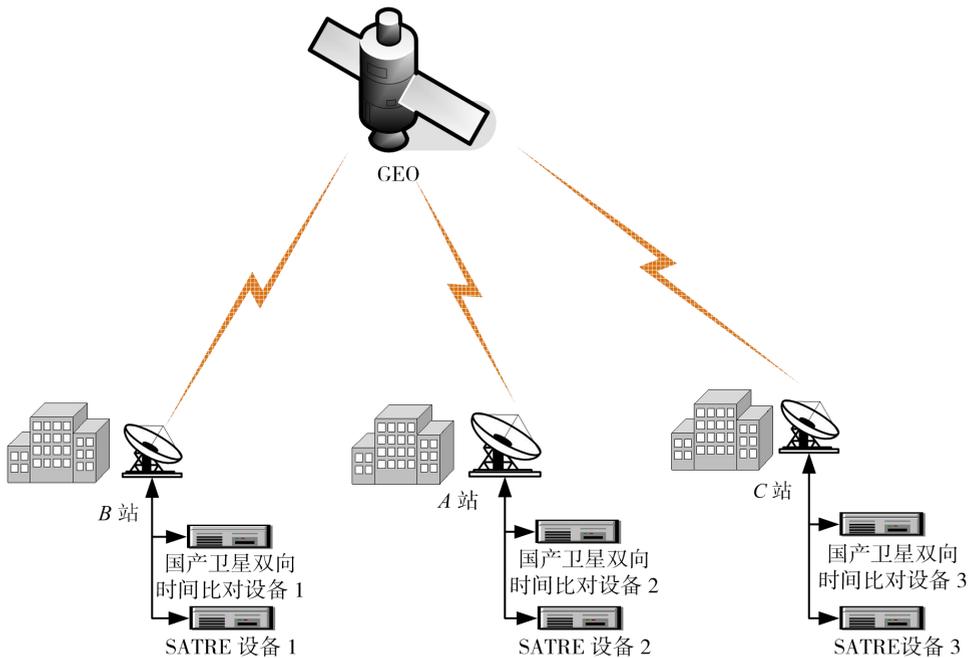


图 3 国产卫星双向时间比对设备性能评估试验系统组成示意图

如图 3 所示，SATRE 设备信号与国产卫星双向时间比对设备信号在同一信道内传输，两者仅在信号体制及测距终端设计上存在差异。因各站组成及工作方式基本相同，在 SATRE 设备接入各站时按照同一方式接入，此处以 A 站为例介绍具体链接方案，如图 4 所示。

SATRE 设备的发射及接收中频信号选择与 A 站中频信号频点一致，其发射信号与国产卫星双向时间比对设备发射信号通过合路器合路后进入发射信道；接收中频信号通过分路器后，分别接入国产卫星双向时间比对设备接收终端和 SATRE 设备。时频系统为 SATRE 设备提供代表 A 站时间起点的 1 PPS 信号和 10 MHz 信号，并通过网络为 SATRE 设备提供网络时间同步服务。由于两类信号均采用直接序列扩

频模式，但伪码结构不同，信号合路后一类信号相对于另一类信号可视为宽带噪声，扩频体制上可以减弱此类干扰，不会对测量结果造成影响；此外在接收端信号分路后，两类信号接收电平平均会降低 3 dB，由于信号测量条件较好，也不会对测量结果造成影响。在此次评估试验中，对 3 站 SATRE 设备已进行了校准。

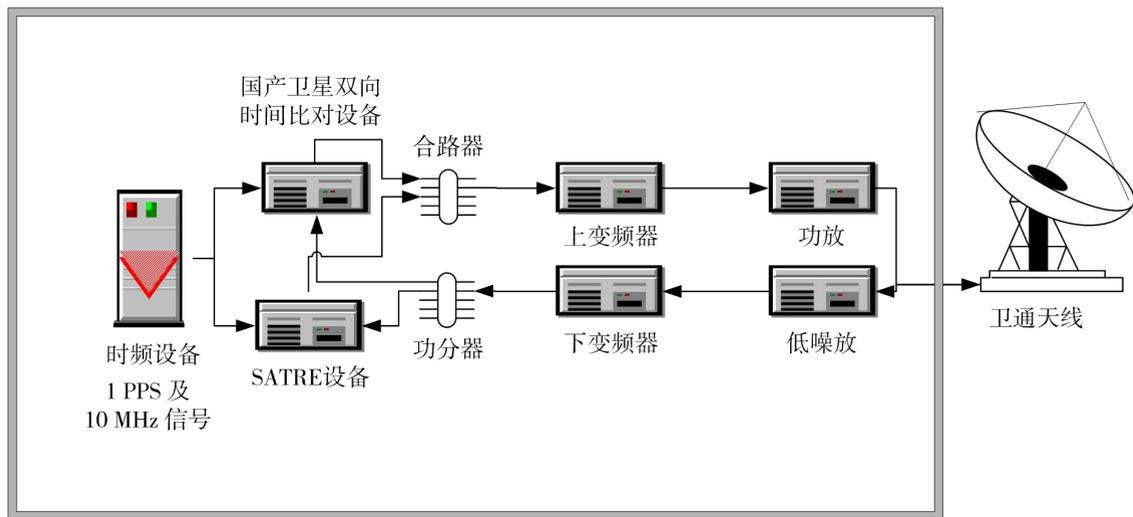


图4 SATRE设备接入A站示意图

2.3 评估项目与内容

在试验系统设计与实现过程中，由于国产卫星双向时间比对设备与射频天线是一体化设计的系统，而 SATRE 设备属于外接设备，两类设备对信道的匹配性可能存在差异。为评判国产卫星双向时间比对设备性能，考虑设计两大类评估项目，一是保持各站两类设备发射信号电平保持一致，二是保持各站两类设备接收信号电平保持一致。设计评估流程如图 5 所示。

为全面比较两类设备性能，设计从 4 个方面进行评估。

① 接收载噪比比对

在发射端和接收端功率标定为一致的情况下分别比对两类设备接收载噪比差异，该结果主要反映两类设备接收终端处理能力之间的差异。

② 观测数据精度比对

统计分析两类设备分别在发端功率一致和接收端载噪比一致场景下观测数据精度，统计方法为分别取两类设备大约 1 ks 的测量数据，计算扣除高阶趋势项后的残差。该结果主要反应两类设备在不同条件下的观测数据精度差异。

③ 钟差拟合参数比对

在两种条件下对基于两类设备得到的相同站钟差拟合参数进行比较分析，如分别通过国产卫星双向时间比对设备和 SATRE 设备获得 A、B 两站的钟差拟合参数 $a_1/(s/s)$ 、 $a_2/(s/s^2)$ ，通过比较得到两种设备的参数偏差 Δa_1 、 Δa_2 。该结果主要反映两类设备综合测量性能之间的差异。

此处不比较 a_0 的原因是设备时延未进行校准，二者之间主要存在系统差，测试中暂时不考虑。

④ 3 站钟差闭合精度比对

在两种条件下对基于两类设备得到的 3 站钟差闭合精度进行比较分析。3 站之间可进行两两之间的时间比对，测得 3 站之间的相互钟差分别为 ΔT_{AB} 、 ΔT_{AC} 、 ΔT_{BC} ，理论上 3 站钟差之和（本文称之为闭合差） $\Delta T_{AB} + \Delta T_{AC} + \Delta T_{BC} = 0$ ，由于测量误差等因素，实际闭合结果一般保持在 0 附近，对两类设备的

闭合差统计均值和标准差进行比对。该结果的差异在一定程度上可以反应两类设备综合测量性能之间的差异。

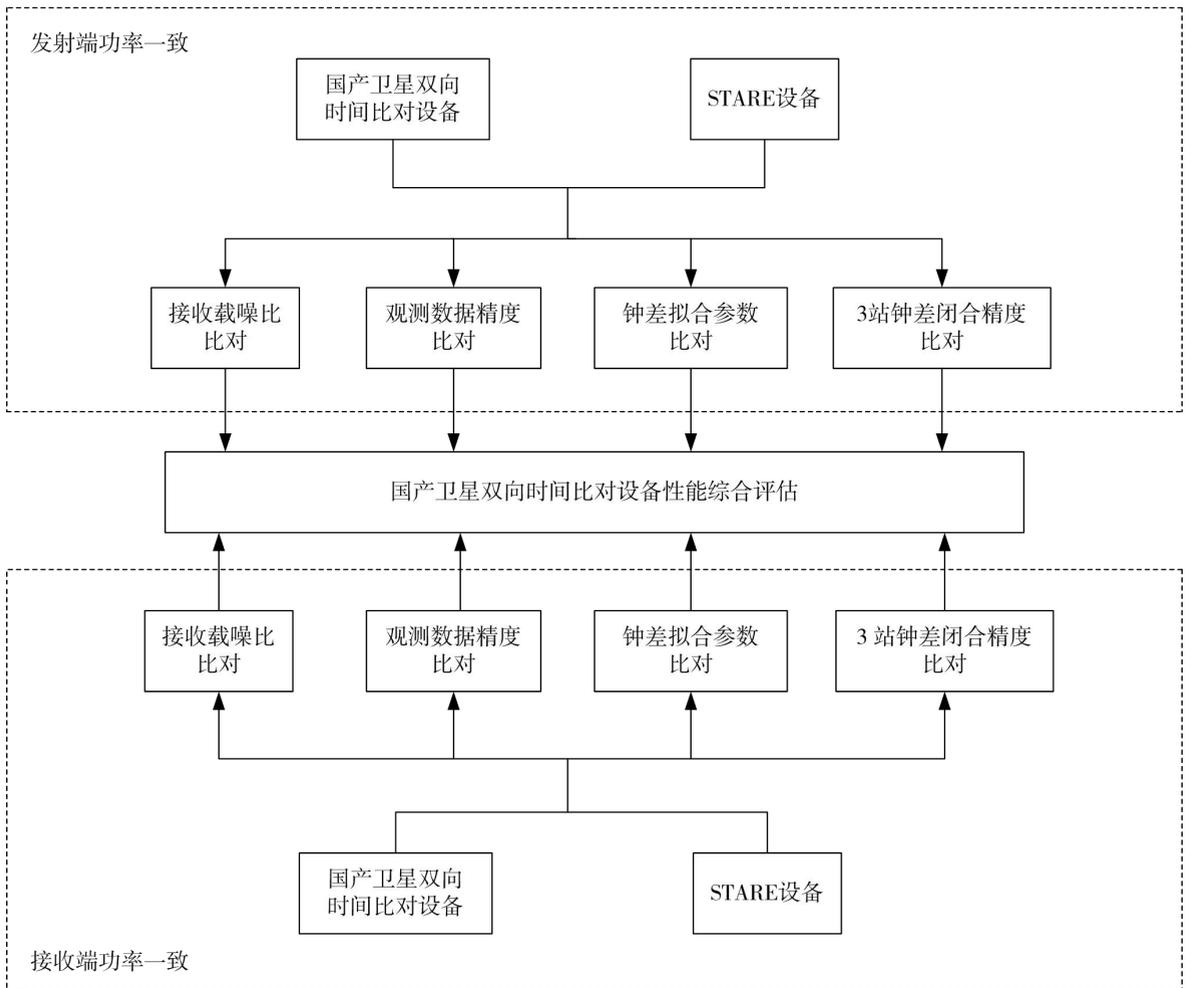


图 5 国产卫星双向时间比对设备性能评估流程图

3 性能评估试验与数据分析

根据前述内容，在国产卫星双向时间比对设备和 SATRE 设备发射端一致、接收端一致条件下，从接收载噪比比对、观测数据精度比对、钟差拟合参数比对、3 站钟差闭合精度比对 4 个方面评估国产卫星双向时间比对设备的性能差异。

3.1 发射端一致下的性能评估

将国产卫星双向时间比对设备和 SATRE 设备发射信号功率标为一致(发射电平差控制在 2 dB 以内, 信号频率为 70 MHz, 码速率为 5 兆码片/s), 对两类设备分别从接收信号载噪比、观测数据精度、钟差处理结果、多站钟差闭合精度 4 个方面分别进行比对, 比较结果的差异程度, 对国产卫星双向时间比对设备性能进行评估分析。

① 接收载噪比比对结果

取 SATRE 设备和国产卫星双向时间比对设备相同时间的大约 1 ks 的测量数据, 对该条件下的 SATRE 设备和国产卫星双向时间比对设备接收信噪比的比较结果如表 1 所示。

表1 SATRE 设备和国产卫星双向时间比对设备数据测量精度比较

数据	SATRE 设备 C/N0 均值/dBc	国产卫星双向时间比对设备 C/N0 均值/dBc	C/N0 差值/dBc
A 站发 B 站收	58.75	53.0	5.75
B 站发 A 站收	62.50	56.5	6.00
A 站发 C 站收	59.00	54.5	4.50
C 站发 A 站收	63.50	56.5	7.00
B 站发 C 站收	62.00	56.5	5.50
C 站发 B 站收	61.50	55.0	5.50

在发端一致的条件下，SATRE 设备的接收信号载噪比平均值比国产卫星双向时间比对设备的信号载噪比高 5~6 dBc 左右。说明在同等发射功率、信道和空间传输条件下，SATRE 设备的信号接收情况获得的载噪比优于国产卫星双向时间比对设备。

② 观测数据精度比对分析

取 SATRE 设备和国产卫星双向时间比对设备相同时间的大约 1 ks 的测量数据，计算扣除高阶趋势项后的残差，分析其测量精度结果如表 2 所示。

表2 SATRE 设备和国产卫星双向时间比对设备数据测量精度比较

数据	设备	测量精度范围/ns
A 站发 B 站收	SATRE 设备	-0.6~0.6
	国产卫星双向时间比对设备	-0.4~0.4
B 站发 A 站收	SATRE 设备	-0.3~0.3
	国产卫星双向时间比对设备	-0.6~0.6
A 站发 C 站收	SATRE 设备	-0.4~0.4
	国产卫星双向时间比对设备	-0.6~0.6
C 站发 A 站收	SATRE 设备	-0.4~0.4
	国产卫星双向时间比对设备	-0.6~0.6
B 站发 C 站收	SATRE 设备	-0.4~0.4
	国产卫星双向时间比对设备	-0.8~0.8
C 站发 B 站收	SATRE 设备	-0.4~0.4
	国产卫星双向时间比对设备	-0.5~0.5

SATRE 设备与国产卫星双向时间比对设备测量精度均保持在 1 ns 以内，由于 SATRE 设备的接收信号载噪比普遍高于国产卫星双向时间比对设备 5~6 dB 左右，总体而言，SATRE 信号测量精度略优于国产卫星双向时间比对设备。

③ 钟差拟合参数比对

取相同时间的 SATRE 设备和国产卫星双向时间比对设备双向比对钟差处理结果进行二阶拟合，拟

合参数比较如表 3 所示。

表 3 A, B, C 3 站钟差参数比较

数据	设备	参数 $a_1/(s/s)$	参数 $a_2/(s/s^2)$	标准差/ns
A-B 站	SATRE 设备	$-4.760\ 180\ 63 \times 10^{-14}$	$-6.450\ 959\ 08 \times 10^{-20}$	0.684\ 597\ 11
	国产卫星双向时间比对设备	$-4.845\ 815\ 09 \times 10^{-14}$	$-5.826\ 784\ 69 \times 10^{-20}$	0.601\ 994\ 89
	差值比较	$8.563\ 446\ 00 \times 10^{-16}$	$-6.241\ 743\ 90 \times 10^{-21}$	-
A-C 站	SATRE 设备	$-2.158\ 680\ 95 \times 10^{-12}$	$4.246\ 854\ 12 \times 10^{-19}$	0.385\ 792\ 95
	国产卫星双向时间比对设备	$-2.159\ 387\ 50 \times 10^{-12}$	$4.267\ 126\ 49 \times 10^{-19}$	0.411\ 596\ 11
	差值比较	$7.065\ 500\ 00 \times 10^{-16}$	$-2.027\ 237\ 00 \times 10^{-21}$	-
B-C 站	SATRE 设备	$-2.112\ 779\ 58 \times 10^{-12}$	$6.314\ 451\ 01 \times 10^{-19}$	0.725\ 835\ 54
	国产卫星双向时间比对设备	$-2.112\ 844\ 44 \times 10^{-12}$	$6.261\ 590\ 62 \times 10^{-19}$	0.689\ 663\ 15
	差值比较	$6.486\ 000\ 00 \times 10^{-17}$	$5.286\ 039\ 00 \times 10^{-21}$	-

SATRE 设备和国产卫星双向时间比对设备钟差二阶拟合合参数结果, a_1 相差在 10^{-16} 数量级, a_2 相差在 10^{-21} 数量级。

④ 3 站钟差闭合精度比较

取 3 站 SATRE 设备和国产卫星双向时间比对设备相同时间的测量数据, 3 站钟差闭合精度如图 6 和表 4 所示。

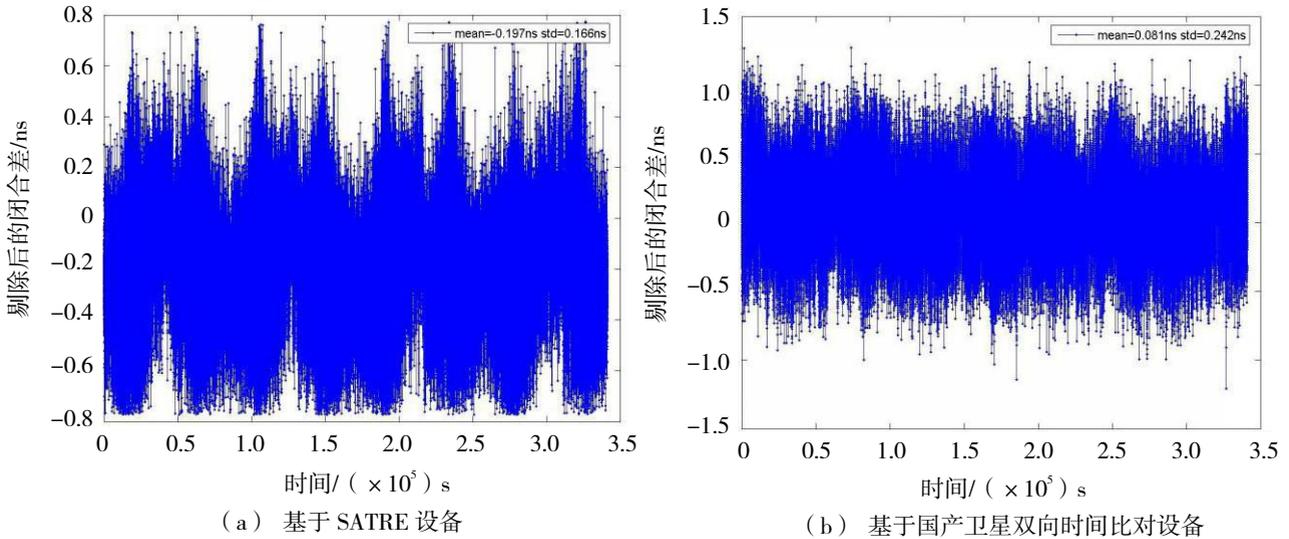


图 6 A 站-B 站-C 站 3 站钟差闭合差曲线

表 4 3 站钟差闭合差的均值和标准差 单位: ns

设备	均值	标准差
基于 SATRE 设备	-0.197	0.166
基于国产卫星双向时间比对设备	0.081	0.242

上述结果显示, SATRE 设备和国产卫星双向时间比对设备 A 站-B 站-C 站闭合差相当, 国产卫星双向时间比对设备闭合差均值优于 SATRE 设备 0.1 ns。

3.2 接收端一致下的性能评估

通过调节 SATRE 设备的发射功率, 将国产卫星双向时间比对设备和 SATRE 设备接收信号功率标为一致 (接收电平差控制在 2 dB 以内, 信号频率为 70 MHz, 码速率为 5 兆码片/s), 对两类设备分别从接收信号载噪比、观测数据精度、钟差处理结果、多站钟差闭合精度 4 个方面分别进行比对, 比较结果的差异程度, 对国产卫星双向时间比对设备性能进行评估分析。

① 接收载噪比比对结果

取 SATRE 设备和国产卫星双向时间比对设备相同时间的大约 1 ks 的测量数据, 对该条件下的相同站得到 SATRE 设备和国产卫星双向时间比对设备接收信噪比做差后, 统计载噪比残差的均值如表 5 所示。

表 5 相同站基于 SATRE 设备和国产卫星双向时间比对设备载噪比比对结果

数据	载噪比差均值/dB
A 站发 B 站收	1.133
B 站发 A 站收	0.156
A 站发 C 站收	1.065
C 站发 A 站收	2.510
B 站发 C 站收	1.710
C 站发 B 站收	2.888

SATRE 设备和国产卫星双向时间比对设备信噪比差值基本在 2 dB 以内, 基本实现了接收端电平控制为一致的目的, 该条件作为后续评估的依据。

② 观测数据精度比对分析

取 SATRE 设备和国产卫星双向时间比对设备相同时间的大约 1 ks 的测量数据, 计算扣除高阶趋势项后的残差, 比对残差波动范围结果如表 6 所示。

表 6 SATRE 设备和国产卫星双向时间比对设备数据测量精度比较

数据	设备	残差波动范围/ns
A 站发 B 站收	SATRE 设备	-1.0~1.5
	国产卫星双向时间比对设备	-0.4~0.4
B 站发 A 站收	SATRE 设备	-1.5~1.5
	国产卫星双向时间比对设备	-1.0~1.0
A 站发 C 站收	SATRE 设备	-1.5~2.0
	国产卫星双向时间比对设备	-0.6~0.6
C 站发 A 站收	SATRE 设备	-1.0~1.5
	国产卫星双向时间比对设备	-0.8~0.8
B 站发 C 站收	SATRE 设备	-2.0~2.0
	国产卫星双向时间比对设备	-0.6~0.6
C 站发 B 站收	SATRE 设备	-1.0~1.5
	国产卫星双向时间比对设备	-0.5~0.5

在接收载噪比基本一致的条件下, SATRE 设备测量数据高阶拟合残差波动范围在 2 ns 以内, 国产卫星双向时间比对设备测量数据高阶拟合残差波动范围基本在 1.5 ns 以内, 国产卫星双向时间比对设备测量精度略高于 SATRE 设备测量精度。

③ 钟差拟合参数比对

取相同时间的 SATRE 设备和国产卫星双向时间比对设备双向比对钟差处理结果, 进行二阶拟合, 拟合参数比较如表 7 所示。

表 7 A、B、C 3 站钟差参数比较

数据	设备	参数 $a_1/(s/s)$	参数 $a_2/(s/s^2)$	标准差/ns
A-B 站	SATRE 设备	$-2.547\ 223\ 28 \times 10^{-14}$	$-1.122\ 900\ 08 \times 10^{-19}$	0.685 688 35
	国产卫星双向时间比对设备	$-2.799\ 873\ 53 \times 10^{-14}$	$-9.294\ 318\ 45 \times 10^{-20}$	0.576 484 77
	差值比较	$2.526\ 502\ 50 \times 10^{-15}$	$1.934\ 682\ 35 \times 10^{-20}$	-
A-C 站	SATRE 设备	$-2.032\ 791\ 54 \times 10^{-12}$	$-1.160\ 758\ 48 \times 10^{-19}$	0.398 248 29
	国产卫星双向时间比对设备	$-2.037\ 574\ 77 \times 10^{-12}$	$-8.212\ 641\ 41 \times 10^{-20}$	0.329 499 69
	差值比较	$4.783\ 230\ 00 \times 10^{-15}$	$3.394\ 943\ 39 \times 10^{-20}$	-
B-C 站	SATRE 设备	$-2.007\ 785\ 73 \times 10^{-12}$	$3.182\ 530\ 74 \times 10^{-21}$	0.499 023 34
	国产卫星双向时间比对设备	$-2.005\ 623\ 04 \times 10^{-12}$	$-2.033\ 126\ 07 \times 10^{-20}$	0.392 121 64
	差值比较	$2.162\ 690\ 00 \times 10^{-15}$	$-2.351\ 379\ 14 \times 10^{-20}$	-

SATRE 设备和国产卫星双向时间比对设备钟差二阶拟合参数结果, a_1 相差在 10^{-15} 数量级, a_2 相差 10^{-20} 数量级。

④ 3 站钟差闭合精度比较

取 3 站 SATRE 设备和国产卫星双向时间比对设备相同时间的测量数据, 3 站钟差闭合精度如图 7 和表 8 所示。

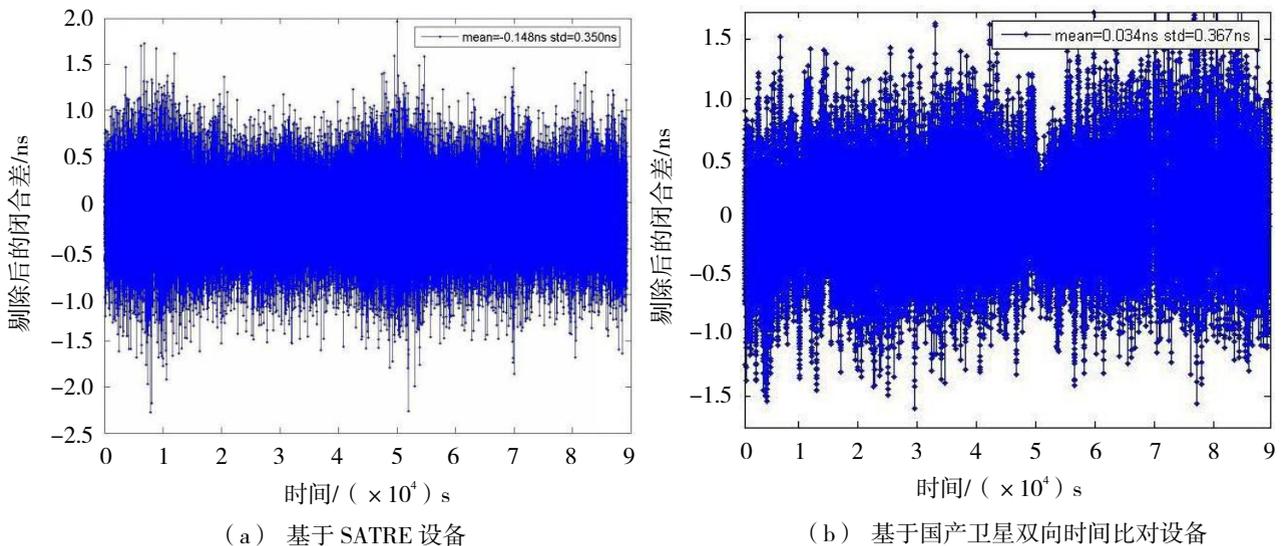


图 7 A 站-B 站-C 站 3 站钟差闭合差曲线

表 8 3 站钟差闭合差的均值和标准差

设备	均值/ns	标准差/ns
基于 SATRE 设备	0.148	0.350
基于国产卫星双向时间比对设备	0.034	0.367

上述结果显示, SATRE 设备和国产卫星双向时间比对设备 A 站-B 站-C 站闭合差相当。

3.3 评估试验结果分析

通过上述试验, 可获得如下试验结果:

① 在发射信号功率一致的条件下, SATRE 设备较国产卫星双向时间比对设备在接收端接收载噪比高约 5~6 dB, SATRE 设备观测数据精度略高于国产卫星双向时间比对设备。

② 在收端电平一致两种场景下, 因 SATRE 设备接收载噪比降低, 两类设备的观测数据精度相当, 个别场景下国产卫星双向时间比对设备的观测数据精度略高于 SATRE 设备。

③ 在发端、收端电平一致两种场景下, 两类设备获得的两站钟差拟合参数在 a_1 项上相差 $10^{-15} \sim 10^{-16}$ 量级, a_2 项上相差 $10^{-20} \sim 10^{-21}$ 量级, 一致性较好。

④ 在发端、收端电平一致两种场景下, 两类设备的 3 站钟差闭合精度相当, 均保持在 2 ns 以内, 个别情况下, 国产卫星双向时间比对设备的站钟闭合精度略优于 SATRE 设备。

⑤ 综合两种条件下的评估结果, 国产卫星双向时间比对设备测量性能与 SATRE 设备相当。

4 结语

为对国产卫星双向时间比对设备进行准确有效地评估, 本文基于 3 站卫星双向时间比对系统搭建了试验评估系统, 采用了国际上主流使用的 SATRE 设备作为评估参考设备, 由于该设备配置较为灵活, 从输出频点、伪码速率以及输出电平方面能够实现与现有系统基本适配, 从而使得国产卫星双向时间比对设备能够与 SATRE 设备具备在相同条件下开展相关评估试验。从发射端电平一致、接收端电平一致两个基本场景下开展了 4 个方面的比较分析, 即接收载噪比、观测数据精度、钟差拟合参数和 3 站钟差闭合精度, 试验结果表明国产卫星双向时间比对设备与 SATRE 设备测量性能相当, 两类设备的测量钟差拟合参数、钟差闭合精度一致性极高, 说明当前国产卫星双向时间比对设备性能达到了国际同类设备水平。

另外需要指出的是, 限于使用场景、范围等因素的限制, 国产卫星双向时间比对设备在使用便利性等方面有进一步改进的空间, 如可借鉴 SATRE 设备的输出频点/电平、伪码速率等灵活可调优点, 改进后可进一步提升国产卫星双向时间比对设备使用效能和范围等。

参考文献:

- [1] 李志刚, 李焕信, 张虹. 卫星双向法时间比对的归算[J]. 天文学报, 2002, 43(4): 422-431.
- [2] 杨朝中, 王玉林, 花语, 等. C 波段卫星双向时间传递的系统性能验证[J]. 时间频率学报, 2018, 41(1): 1-8.
- [3] 孙宏伟, 李志刚, 李焕信, 等. 卫星双向时间比对原理及比对误差归算[J]. 宇航计测技术, 2001, 21(2): 55-58.
- [4] 刘利, 韩春好. 卫星双向时间比对及其误差分析[J]. 天文学进展, 2004, 22(3): 219-226.
- [5] 吴海涛, 李孝辉, 卢晓春, 等. 卫星导航系统时间基础[M]. 北京: 科学技术出版社, 2011: 55-56.
- [6] 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.
- [7] 李星, 耿淑敏, 李垣陵. 双向时间同步系统的设备时延校准技术研究[J]. 中国空间科学技术, 2011(4): 23-29.
- [8] 谭述森. 导航卫星双向伪距时间同步[J]. 中国工程科学, 2006, 12(8): 70-74.
- [9] 朱祥为, 李星, 孙广富, 等. 卫星导航系统站间时间同步方法研究[J]. 现代电子技术, 2008, 23(286): 55-57.
- [10] TIMETECH. Satellite Timing and Ranging Equipment[EB/OL]. (2019-08-06)[2019-11-20]. <http://www.docin.com/p-241164978.html>.