

# 基于1 Mcps/s码速率的亚欧卫星双向 时间比对性能分析\*

王 翔<sup>1,2†</sup> 董绍武<sup>1,2,3</sup> 武文俊<sup>1,2,3</sup> 宋会杰<sup>1,2</sup> 王威雄<sup>1,4</sup>

(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 100049)

(4 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 卫星信道租赁费是目前卫星双向时间传递(Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT)的主要成本之一. 在2017年5月以前, 参与UTC (Coordinated Universal Time)计算的亚洲-欧洲实验室之间进行Ku波段卫星双向时间频率传递一直使用2.5 Mcps/s码速率, 带宽为2.5 MHz的伪随机码. 为了在不影响时间频率传递性能的前提下降低成本, 在欧亚间首次尝试采用1 Mcps/s码速率, 带宽为1.7 MHz的伪随机码, 进行亚欧卫星双向时间传递. 并使用已校准的GPS PPP (Global Position System Precise Point Positioning)链路为双向链路进行间接校准. 选择2018年12月的TWSTFT链路数据, 分析链路性能发现, 通过ABS-2A卫星, 使用1 Mcps/s码速率构建的卫星双向时间比对的日频率稳定度达到 $10^{-15}$ , 时间稳定度优于0.3 ns. 与已校准的GPS PPP链路数据进行验证分析, 结果表明, 使用1 Mcps/s码速率进行超长距离卫星双向时间传递与已校准的GPS PPP时间传递结果一致, 与传统手段相比, 其系统造价低, 时间传递性能可以满足国际原子时计算的需求.

**关键词** 卫星双向时间传递, 精密单点定位, 链路校准, 性能分析

中图分类号: P127; 文献标识码: A

## 1 引言

卫星双向时间传递(Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT)是通过租用通信卫星的带宽, 使用伪随机码进行高精度时间频率传递的技术, 精密度可达亚纳秒量级, 准确度可达1 ns, 是世界上时间传递精度最高的技术之一, 于1999年7月首次被国际权度局(BIPM)用于进行国际原子时(TAI)的计算<sup>[1]</sup>. 国家授时中心(NTSC)于1998年10月与日本国家信息与通信技术研究(NICT)建立了亚

2019-03-20收到原稿, 2019-04-29收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(11703030)、中国科学院“西部青年学者”(XAB2017A06)项目资助

†122798857@qq.com

太TWSTFT链路,并于2009年与具有国际双向中心站地位的德国联邦物理技术研究院(PTB)建立了常规比对链路,正式用于TAI的计算.

长久以来,亚洲-欧洲TWSTFT一直使用2.5 MHz的带宽,以2.5 Mcps/s的速率来传递伪随机码,在AM22卫星退役以前,依据时间频率咨询委员会(CCTF) TWSTFT工作组为参与时间传递的亚洲时间实验室指定的时间表<sup>[2]</sup>,采取1次比对持续6 min, 1 h比对2次, 1 d比对48次的方式进行与PTB的时间传递, 1 d内时间传递的频率相对不确定度约为 $10^{-15}$ ,采用时间方差来评价时间传递的稳定度约为1 ns<sup>[3]</sup>. 2017年5月接卫星公司通知,AM22卫星由于运行时间过长,自2017年6月30日起,将不再提供给TWSTFT用户使用. 在重建亚洲-欧洲双向链路的过程中,为了降低租星成本,采取减小带宽的方案重建亚欧卫星双向时间传递链路. 通过几个月的数据积累,性能分析表明该方案是可行的. 目前, Ku波段的欧亚双向时间比对工作已通过ABS-2A卫星,以1 Mcps/s码速率,在卫星转发器带宽1.7 MHz下正常进行.

## 2 卫星双向时间传递原理

卫星双向时间传递原理如图1所示,其中 $d_T$ 为事先测得的地面站发射设备时延(其中 $d_{T,A}$ 表示地面站A发射设备时延,下文中各类时延表示方法类同), $d_R$ 为事先测得的地面站接收设备时延, $d_{AS}$ 和 $d_{SA}$ 分别为A站上、下行链路空间传播时延, $d_{BS}$ 和 $d_{SB}$ 分别为B站上、下行链路空间传播时延, $d_S$ 为卫星转发器时延. 地面站A、B实现的UTC物理信号记为 $UTC(k_A)$ 、 $UTC(k_B)$ ,其1PPS (Pulse Per Second)时间信号通过调制解调器经伪码扩频方式调制后,由甚小口径天线终端(Very Small Aperture Terminal, VSAT)发射到卫星,经卫星上的透明转发器把A/B站的时间信号放大,并转发;地面站B/A接收经卫星转发的A/B站时间信号,解调后与本地的1PPS信号比较,获得A/B站至B/A站的信号传输时延. 两站通过数据交换,获得两地的高精度钟差<sup>[4]</sup>. A、B两站钟差的计算方法如(1)式,

$$\begin{aligned}
 T_A - T_B = & [(T_{TIC,A} - T_{TIC,B})/2] + \\
 & \{[(d_{T,A} - d_{R,A})/2] - [(d_{T,B} - d_{R,B})/2]\} + \\
 & \{[(d_{AS} - d_{SA})/2] - [(d_{BS} - d_{SB})/2]\} + \quad , \quad (1) \\
 & [(d_{S,AB} - d_{S,BA})/2] + \\
 & [(T_{SAG,A} - T_{SAG,B})/2]
 \end{aligned}$$

其中,除上文中已定义的各项时延外, $T$ 为钟差, $T_{TIC}$ 为实测的调制解调器发射通道时延, $T_{SAG}$ 为Sagnac效应引起的时延, $d_{S,AB}$ 、 $d_{S,BA}$ 分别表示A站到B站、B站到A站的卫星转发器时延. 等号右边第1项为计数器读数的计算;第2项为地面站设备时延的计算,可通过事先测量获得;第3项为空间传播时延(Ku波段时可忽略不计)<sup>[5]</sup>;第4项为卫星透明转发器时延,可完全抵消;第5项为Sagnac效应引入的时延,可准确计算<sup>[6-8]</sup>.

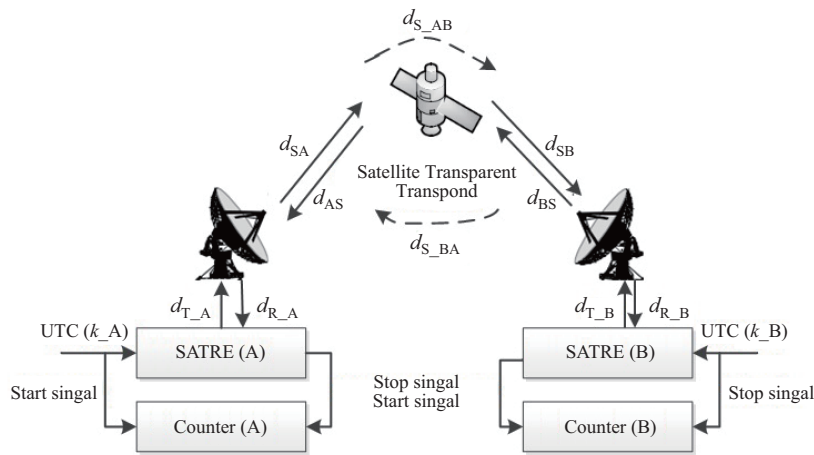


图 1 卫星双向时间传递原理图

Fig. 1 Principle of two-way satellite time and frequency transfer

### 3 GPS PPP时间传递原理

GPS PPP (Global Positioning System Precise Point Positioning)时间比对原理如图2所示, 使用IGS (International GPS Service)在其FTP (File Transfer Protocol)服务器上发布的GNSS (Global Navigation Satellite System)系统的精密轨道和卫星钟差<sup>[9]</sup>, 将双频定时接收机获得的双频载波相位和伪距观测值通过观测模型计算, 得到A站保持的UTC( $k_A$ )与IGS发布的时间参考(IGST)的偏差, 同理可得B站保持的UTC( $k_B$ )与IGST的偏差, 差分后即可获得A站与B站的钟差<sup>[10-12]</sup>. 通常使用的观测模型包括无电离层模型、UofC模型、组合观测值模型等, 本文使用组合观测值模型完成数据处理<sup>[13-14]</sup>.

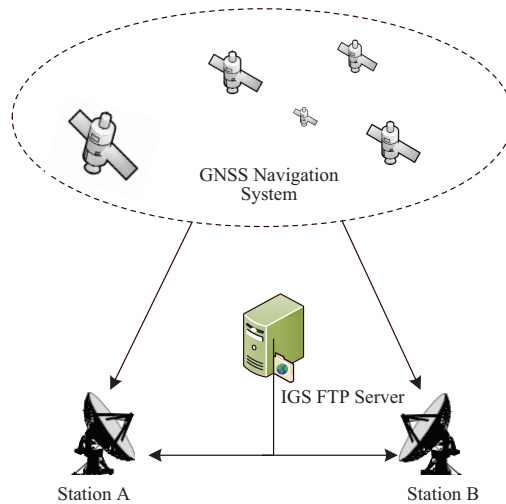


图 2 GPS PPP时间比对原理

Fig. 2 Principle of GPS PPP time comparison

## 4 基于GPS PPP链路的校准

时间链路校准是时间传递的前提条件. BIPM使用GNSS可移动校准器、卫星双向移动校准站完成对参与TAI计算的全球实验室远程时间传递链路的校准工作<sup>[15]</sup>. 但是, 校准的频次依然不能满足需要. 自从2001年加拿大的Kouba等人提出GPS PPP算法<sup>[16]</sup>以来, 随着IGS轨道精度和精密钟差精度的提高(目前轨道精度已达2.5 cm, 钟差精度优于0.1 ns<sup>[17]</sup>), 电离层、固体潮等相关物理模型的优化, PPP的A类时间传递不确定度已达0.3 ns<sup>[18-20]</sup>. 由于GPS PPP具有高分辨率、高精度的特点, 当没有校准器可以实施直接校准的时候, 对于GNSS链路的校准能够转移到双向链路, 可以用校准过的GNSS链路校准双向链路.

### 4.1 TWSTFT链路间接校准方法

如图3所示, 本地UTC( $k$ )的物理实现信号是由相位微调仪产生的1PPS脉冲和5 MHz频率信号. 脉冲信号经倍频器, 频率变为10 MHz, 用于提供已校准接收机、待校准调制解调器的参考信号, 脉冲信号用于提供本地已校准接收机、待校准调制解调器的初同步秒信号, PTB的连接类同. GPS PPP链路和TWSTFT链路采用同源信号, 分别独立测量. GPS PPP链路依据PPP原理, 测量得到UTC( $k$ )与IGST的偏差, 通过数据传输网络交互数据, 得到UTC( $k$ )与UTC (PTB)的钟差 $D_{\text{PPP}}$ . TWSTFT链路依据卫星双向时间传递原理, 使用GEO (Geostationary)卫星测得单边数据后, 通过数据传输网络交互经过2次拟合的观测数据, 得到UTC( $k$ )与UTC (PTB)的钟差 $D_{\text{TWSTFT}}$ . 两者之差即为单次校准值, 记为 $C = D_{\text{PPP}} - D_{\text{TWSTFT}}$ . 为了弱化卫星双向时间传递的周日效应的影响, 提高校准值的准确度, 我们需要保存至少7 d的连续测量数据.

### 4.2 TWSTFT链路校准

我们使用2018年12月15—22日的两站GPS PPP和TWSTFT结果, 选取NTSC的已校准PPP链路(NTP3接收机)进行TWSTFT链路校准, 将PTB作为参考站.

校准分两步进行, 第1步先对GPS PPP数据采用3次样条插值方法插值到TWSTFT数据中相应的时间点. 定义3次样条函数 $S(x)$ 在子区间 $[x_j, x_{j+1}]$ 满足如下关系:

$$\begin{aligned} S(x) = S_j(x) &= a_j x^3 + b_j x^2 + c_j x + d_j, \\ x &\in (x_j, x_{j+1}), j = 0, 1, 2, \dots, n-1, \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $a_j$ 、 $b_j$ 、 $c_j$ 、 $d_j$ 为未知常数,  $n$ 为区间数量.  $S(x)$ 还需要满足下列3个条件:

(1)节点处函数值相等, 即

$$S(x_j) = f(x_j), j = 0, 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

其中,  $f(x_j)$ 为待插值函数;

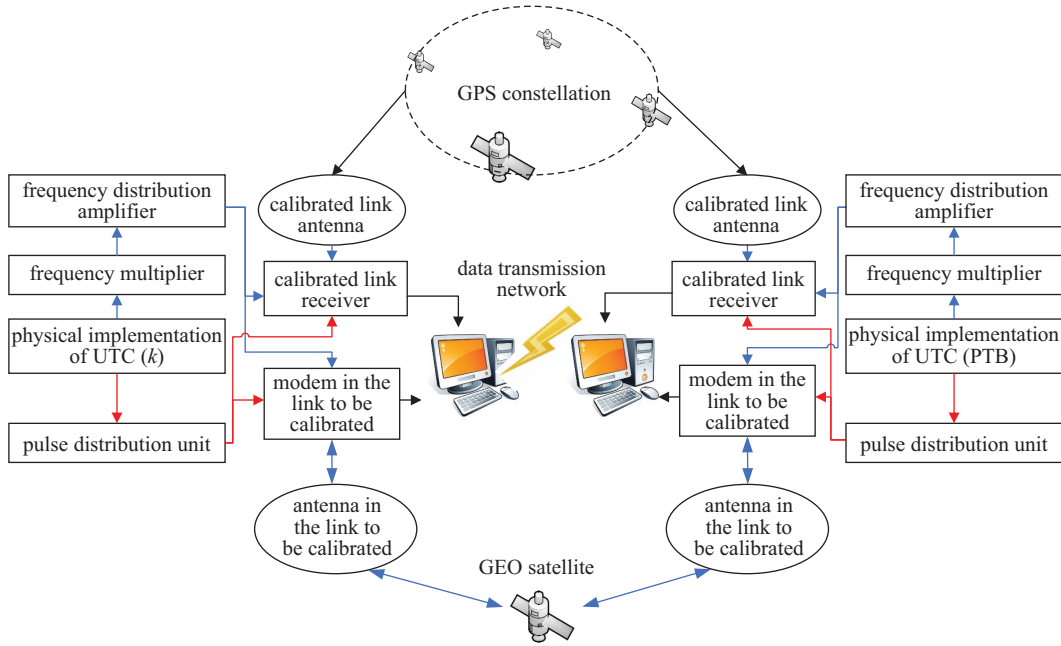


图3 TWSTFT链路间接校准物理连接图

Fig. 3 The physical connection diagram of indirect calibration for TWSTFT link

(2)  $S(x_i)$ 以及它的一阶导数 $S'(x_i)$ 、二阶导数 $S''(x_i)$ 均连续, 即

$$\begin{cases} S_{j-1}(x_j) = S_j(x_j) \\ S'_{j-1}(x_j) = S'_j(x_j), \quad j = 1, 2, \dots, n - 1; \\ S''_{j-1}(x_j) = S''_j(x_j) \end{cases} \quad (4)$$

(3)在区间边界 $x_0, x_n$ 处满足下列边界条件

$$\begin{cases} S'(x_0) = f(x_0) \\ S'(x_n) = f(x_n) \end{cases} \quad (5)$$

联立(3)–(5)式可求得各系数的唯一解, 确定 $S_j(x)$ . 插值结果如图4所示, 插值结果曲线与原始数据曲线保持一致, 可以将插值结果用于校准值计算.

第2步, 将PPP插值结果与TWSTFT结果进行一次差分, 结果如图5所示, GPS PPP NTP3链路对TWSTFT链路的校准单值比较稳定, 因此可以把校准值的均值2628.6 ns作为校准值用于TWSTFT结果.

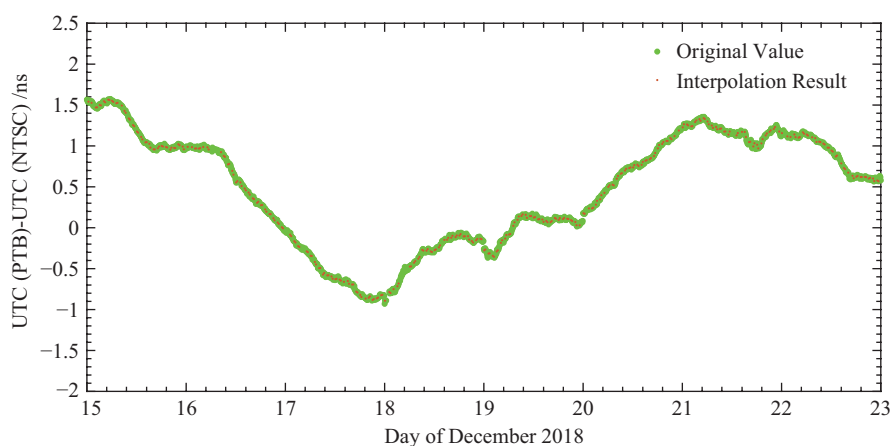


图 4 UTC (PTB)-UTC (NTSC)插值结果

Fig. 4 The interpolation result of UTC (PTB)-UTC (NTSC)

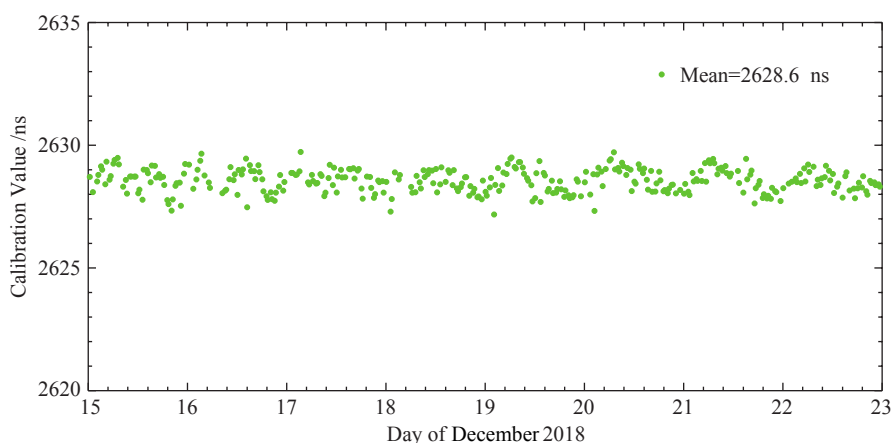


图 5 TWSTFT链路校准单值

Fig. 5 The calibration single value of TWSTFT link

## 5 卫星双向时间比对结果与性能分析

### 5.1 卫星双向时间比对结果

将上述校准值用于TWSTFT后, 选取2018年12月15日至2019年1月1日(约化儒略日MJD 58467-58485)的卫星双向时间传递结果与NTSC与PTB之间已校准的完全独立的GPS PPP时间传递链路进行对比, 如图6所示, 两条链路的时间传递结果所显示的NTSC与PTB时差的趋势一致。

对GPS PPP数据采用3次样条插值方法, 插值到TWSTFT数据相应时间点后, PT-B与NTSC之间GPS PPP时间传递链路TWSTFT时间传递链路的链路差如图7所示, 绿色部分是估计校准值的时间段, 校准后链路差均值约为0.0188 ns, 红色部分为应用校准值的时间段, 均值约为0.1123 ns. 随着应用校准值时段的延长, 链路差均值的偏移将

会增大, 这是由于样本均值与总体均值之间存在一定的偏差, 随着样本数量相对于总体数量的增加, 这个偏差将有效降低. 也就是说, 校准结果的准确度可以通过增加估计校准值时间间隔, 或缩短应用校准值时间间隔来实现.

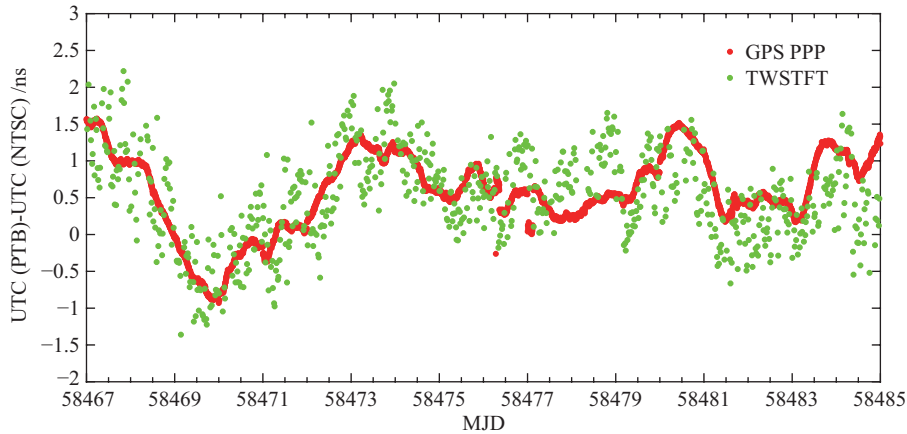


图 6 GPS PPP与TWSTFT时间传递结果比较

Fig. 6 The comparison of time transfer results between GPS PPP and TWSTFT

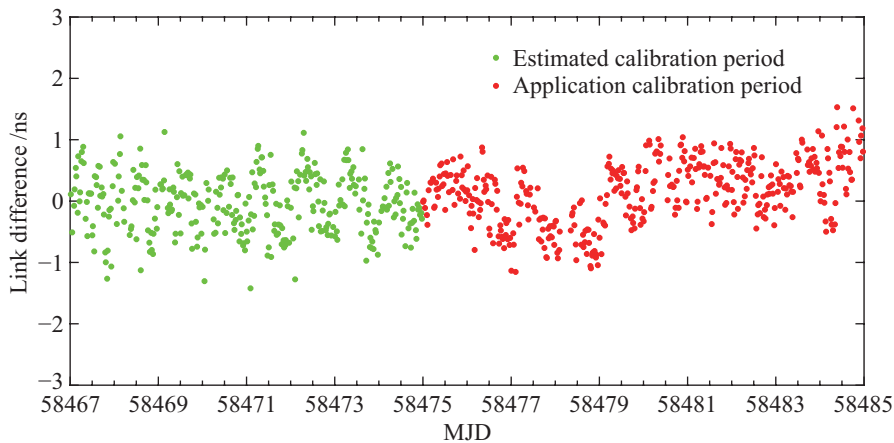


图 7 PTB-NTSC时间传递链路差

Fig. 7 The deviation of PTB-NTSC time transfer link

对于本次校准, 链路差的绝对值处于1.6 ns以内. 由于两条时间传递链路相互独立, 依据不确定度传播律<sup>[21]</sup>, 链路差的不确定度应小于两条链路的合成不确定度. 若以测量结果的标准差作为链路测量不确定度的估计值, PTB-NTSC之间的GPS PPP时间传递链路的测量不确定度约为1.14 ns, TWSTFT时间传递链路的测量不确定度约为1.33 ns, 合成不确定度约为1.76 ns. 因此本次校准结果有效.

## 5.2 性能分析

图8是2018年12月下旬NTSC与PTB之间, 由两条相互独立的时间传递链路获得的

时间传递结果的时间方差(TDEV), 误差棒显示了当前取值的不确定度, 随着样本数量的减少, 不确定度将会逐渐加大. 可以看出在平均时间Tau为 $8.64 \times 10^{13}$  ns时, TWSTFT链路和PPP链路的TDEV处于亚纳秒量级, 约为0.248 ns.

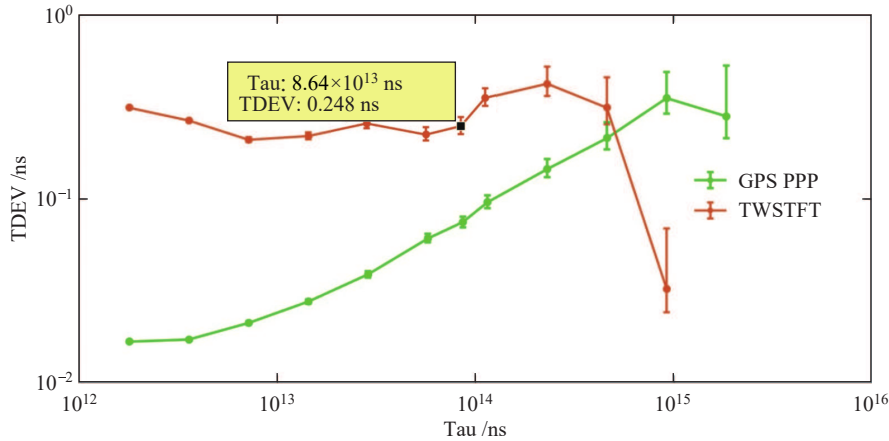


图 8 GPS PPP与TWSTFT结果时间方差比较

Fig. 8 The comparison of time deviation between the GPS PPP and TWSTFT results

图9是相应数据结果的修正Allan方差(MDEV), 可以看出在Tau为 $8.64 \times 10^{13}$  ns时, TWSTFT链路和PPP链路的频率稳定度处于 $10^{-15}$ 量级, TWSTFT时间传递链路的MDEV约为 $5.87 \times 10^{-15}$  ns.

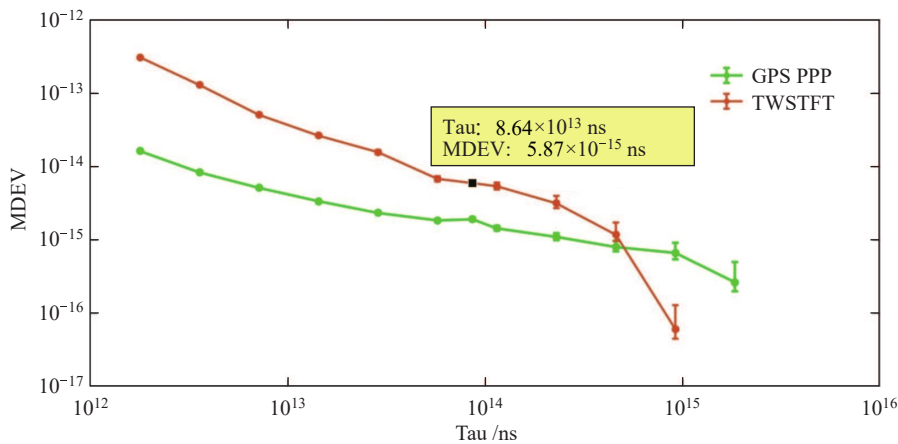


图 9 GPS PPP与TWSTFT结果修正阿仑方差比较

Fig. 9 The comparison of modified Allan deviation between the GPS PPP and TWSTFT results

### 5.3 不确定度分析

本文所述TWSTFT链路是由已校准的GPS PPP链路校准的, 且两条链路相互独立, 因此TWSTFT链路的不确定度 $U$ 可如下表示:

$$U = (U_{\text{app}}^2 + U_{\text{bPPP}}^2 + U_{\text{aTWSTFT}}^2 + U_{\text{bTWSTFT}}^2)^{1/2}, \tag{6}$$



其中,  $U_{\text{app}}$ 、 $U_{\text{bPPP}}$  分别为GPS PPP时间传递链路的A类测量不确定度和B类测量不确定度, 来自BIPM发布的T公报(Circular T);  $U_{\text{aTWSTFT}}$  是TWSTFT时间传递链路的A类测量不确定度, 取自NTSC 2018年12月的TWSTFT链路数据的标准差,  $U_{\text{bTWSTFT}}$  是TWSTFT时间传递链路的B类测量不确定度, 可表征为各测量不确定度分量的平方和的平方根, 包括卫星双向时间传递地面观测站时间信号输入点与本地时间参考点之间时延测量的不确定度分量 $U_{\text{bTWSTFT1}}$  和其他不确定度分量 $U_{\text{bTWSTFT2}}$  (如多径效应等). 这是由于, 对于一条TWSTFT链路的时间传递过程, 包括两端的的地面观测站时间信号输入点与本地时间参考点之间时间传递部分和空间链路时间传递部分. 以一端为例, 地面观测站部分主要是时间信号输入点与本地时间参考点之间时延测量的不确定度与测量设备有关, 一般为0.2 ns, 由于链路两端观测站部分的时间传递过程相互独立, 则观测站部分时间传递的不确定度可记为两地面观测站平方和的平方根, 计算得到约为0.28 ns. TWSTFT链路不确定度预算结果如表1, 其中空间链路部分不确定度根据经验取值为0.8 ns<sup>[22]</sup>, 链路的总不确定度约2.7 ns, 能够满足国际原子时计算的需要.

表 1 TWSTFT链路不确定度预算  
Table 1 The pre-calculation of link uncertainty in TWSTFT

Type	$U_{\text{app}}$	$U_{\text{aTWSTFT}}$	$U_{\text{bPPP}}$	$U_{\text{bTWSTFT1}}$	$U_{\text{bTWSTFT2}}$	$U$
Value/ns	0.4	0.5	2.5	0.2	0.8	2.7

## 6 结论

在使用1 Mcps/s码速率通过ABS-2A卫星重建欧亚卫星双向时间传递链路后, 通过已校准的GPS PPP链路校准TWSTFT链路, 并将校准值应用于实际测量, 比较分析了2018年12月NTSC与PTB的GPS PPP与TWSTFT链路的时间传递结果, 发现NTSC采用1 Mcps/s码速率新建的欧亚TWSTFT链路日频率稳定度达到 $5.87 \times 10^{-15}$ , 时间稳定度达到0.248 ns. 这一指标能够满足UTC (NTSC) (日稳定度在 $10^{-15}$ 量级)的远程时间传递需求. 与传统时间传递链路相比, 性能相当, 造价降低了约30%.

## 参考文献

- [1] 董绍武, 屈俐俐, 袁海波, 等. 时间频率学报, 2016, 39: 129
- [2] ITU. The Operational Use of Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer Employing PN Codes: Recommendation ITU-R TF.1153-2. Geneva: ITU Radiocommunication Sector, 2003
- [3] 王威雄, 董绍武, 武文俊, 等. 仪器仪表学报, 2018, 39: 64
- [4] 史琛, 刘娅, 王国永, 等. 时间频率学报, 2016, 39: 87
- [5] 王国永. 基于双移动站的卫星双向时间传递系统误差校准方法研究. 西安: 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2015
- [6] 王翔, 董绍武, 武文俊, 等. 时间频率学报, 2019, 42: 60
- [7] Parker T E, Zhang V. Proceedings of the 37th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. Vancouver, Canada: ION, 2005: 745
- [8] 吴海涛, 李孝辉, 卢晓春, 等. 卫星导航系统时间基础. 北京: 科学出版社, 2011: 193

- [9] Jiang Z, Petit G, Harmegnies A, et al. Proceedings of 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum. San Francisco: IEEE, 2011
- [10] 高玉平. 天文学报, 2004, 45: 428
- [11] 王继刚. 基于GPS精密单点定位的时间比对与钟差预报研究. 西安: 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2010
- [12] 韩菲, 张春燕. 测绘地理信息, 2015, 40: 28
- [13] Kouba J, Héroux P. GPS Solutions, 2001, 5: 12
- [14] Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. JGRB, 1997, 102: 5005
- [15] 蔡昌盛. 多模GNSS融合精密单点定位理论与方法. 北京: 科学出版社, 2017: 191
- [16] Héroux P, Kouba J. PCEA, 2001, 26: 573
- [17] IGS. GPS Satellite Ephemerides/Satellite & Station Clocks. <http://www.igs.org/products>, 2019-04-28
- [18] Jiang Z, Czubla A, Nawrocki J, et al. Metro, 2015, 52: 384
- [19] 江志恒. 宇航计测技术, 2007, S1: 53
- [20] Yao J, Weiss M, Curry C, et al. Precise Time and Time Interval Meeting 2016, Monterey, CA, 2016: 80-85
- [21] 刘智敏. 不确定度及其实践. 北京: 中国标准出版社, 2000: 543
- [22] 武文俊, 张虹, 广伟, 等. 时间频率学报, 2017, 40: 155

## Performance Analysis of Two-Way Time Comparison of Eurasian Satellites Based on 1 Mcps/s Code

WANG Xiang<sup>1,2</sup>   DONG Shao-wu<sup>1,2,3</sup>   WU Wen-jun<sup>1,2,3</sup>   SONG Hui-jie<sup>1,2</sup>  
WANG Wei-xiong<sup>1,4</sup>

(1 National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600)

(2 Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600)

(3 School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**ABSTRACT** The bandwidth leased on Earth satellites directly affects the operation cost of TWSTFT (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer). Until May 2017, the Ku-band TWSTFT between Asian-European laboratories involved in UTC (Coordinated Universal Time) computing had been using the 2.5 Mcps/s pseudo-random codes with a bandwidth of 2.5 MHz. In order to reduce the cost without affecting the performance of time and frequency, a pseudo-random code with 1 Mcps/s bandwidth of 1.7 MHz is first attempted to transmit time bidirectionally between Eurasian and Asian satellites in China. An indirect calibration for the bidirectional links by using the calibrated GPS PPP (Global Position System Precise Point Positioning) links reduces the link uncertainty. The TWSTFT link data of December 2018 are selected to analyze the link performance. It is found that the daily frequency stability and time stability of the satellite bidirectional time comparison link constructed with 1 Mcps/s code rate reach  $10^{-15}$  and 0.4 ns respectively through the ABS-2A satellite. The results show that it is feasible to use 1 Mcps/s code rate for the bidirectional time transfer of ultra-long distance satellites. Compared with the traditional methods, the system has a low cost, and the time transfer performance can meet the needs of international atomic time calculation.

**Key words** two-way satellite time and frequency transfer, precise point positioning, link calibration, performance analysis