

Vondrak-Cepek 组合滤波在北斗共视和卫星双向时间比对融合中的应用*

王威雄^{1,2,3}, 董绍武^{1,2,3}, 武文俊^{1,2,3}, 郭栋^{1,2}, 王翔^{1,2}, 高喆^{1,2}

(1. 中国科学院国家授时中心, 陕西 西安 710600; 2. 中国科学院时间频率基准重点实验室, 陕西 西安 710600;
3. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘要:为减小卫星双向时间比对(Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT)中的周日效应,利用北斗共视链路没有周日效应的特点,通过 Vondrak-Cepek 组合滤波方法对中国科学院国家授时中心(National Time Service Center, NTSC)、德国物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)以及中国计量科学研究院(National Institute of Metrology, NIM)间的北斗共视时间比对结果分别与硬件卫星时间和距离测量设备(SATellite Time and Ranging Equipment, SATRE) TWSTFT 和软件接收机(Software-Defined Radio, SDR) TWSTFT 结果进行了融合处理。采用时间偏差和幅值频谱两个指标以及 GPS 精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)时间比对分别对融合结果进行内外符合评估。结果表明,经过 Vondrak-Cepek 滤波的融合结果中周日效应基本消失,其与 GPS PPP 链路差值结果的绝对值保持在链路校准的不确定度范围内。对于长基线 NTSC-PTB 链路,融合结果 1 d 的时间偏差稳定度对 SATRE 和 SDR TWSTFT 的增益因子分别为 1.85 和 1.81;对于短基线 NTSC-NIM 链路,融合结果对 SATRE 和 SDR TWSTFT 的增益因子分别为 1.69 和 1.59。融合结果的短期稳定度显著提高。

关键词:时间比对;冗余链路;数据融合;周日效应;Vondrak-Cepek 组合滤波

中图分类号:TN927+.2 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2021)06-017-09

Application of Vondrak-Cepek combined filtering in the fusion of BeiDou CV and TWSTFT

WANG Weixiong^{1,2,3}, DONG Shaowu^{1,2,3}, WU Wenjun^{1,2,3}, GUO Dong^{1,2}, 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. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to reduce the diurnal in TWSTFT (two-way satellite time and frequency transfer), based on the fact that there is no diurnal in BeiDou common view link, the Vondrak-Cepek combined filtering was applied to combine BeiDou common view and SATRE (satellite time and ranging equipment) TWSTFT or SDR (software-defined radio) TWSTFT among NTSC (national time service center), Chinese Academy of Sciences, PTB (physikalisch-technische bundesanstalt) and NIM (national institute of metrology). Two indexes, namely time deviation and amplitude spectrum, were used to evaluate the gain factors in reducing the diurnal of the fusion results, and the agreement of the two types of links was revealed by taking GPS PPP (precise point positioning) time comparison as reference. Results show that the diurnal of the fusion results is greatly improved after Vondrak-Cepek combined filtering, and the absolute value of the differences between the fusion solutions and GPS PPP solutions is kept within the calibration uncertainty of time link. For the baseline of NTSC-PTB, the gain factors of 1-day time deviation (TDEV) of fusion results versus SATRE TWSTFT and SDR TWSTFT are 1.85 and 1.81, respectively. For the baseline of NTSC-NIM, the gain factors are 1.69 for SATRE TWSTFT and 1.59 for SDR TWSTFT. The short-term stability of fusion results is significantly improved.

Keywords: time transfer; redundant link; data fusion; diurnal; Vondrak-Cepek combined filtering

高精度时间比对技术是国际标准时间协调世界时(Coordinated Universal Time, UTC)产生的必要手段。基于全球卫星导航系统(Global Navigation

Satellite System, GNSS)的共视(Common View, CV)、全视和精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)时间比对技术以及另一种完全

* 收稿日期:2020-04-17

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”青年学者 A 类资助项目(XAB2017A06)

作者简介:王威雄(1993—),男,山西文水人,博士研究生,E-mail:wangweixiong16@mails.ucas.ac.cn;

董绍武(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:sdong@ntsc.ac.cn

独立的卫星双向时间比对(Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT)技术是目前国际上主要采用的几种时间比对手段^[1]。TWSTFT从1999年就成为UTC计算的常规比对手段,且目前传递了超过60%的原子钟数据以及大部分用于UTC计算的一级频标的数据^[2]。随着光钟、喷泉钟等更高精度的频率基准的发展,对远距离时间比对的精度也提出了更高的要求。TWSTFT平均时间为1d内的时间稳定度优于1ns且其长期稳定度较好,但其采样率较低且在大部分链路中会受到周日效应的影响,导致其没有优良的短期稳定度^[3]。从2016年2月起,国际权度局(Bureau International des Poids et Mesures, BIPM)组织在欧亚、欧美以及欧洲内部的守时实验室间开展基于软件接收机(Software-Defined Radio, SDR)的TWSTFT试点研究,降低了硬件TWSTFT中的周日效应,并于2020年3月首次正式将SDR TWSTFT用于UTC的计算,但SDR TWSTFT结果中仍有残余的周日效应存在^[4-5]。

随着我国北斗等多个全球卫星导航系统的发展,时间比对技术呈现多元化的趋势。为进一步提高UTC时间比对链路的准确性、稳定性和鲁棒性,在2017年召开的第21届CCTF大会上提出充分利用冗余链路来提高当前时间比对链路稳定度并改善TWSTFT中周日效应问题的议案。Vondrak-Cepek(简称V-C)组合滤波是基于最小二乘原理的Vondrak平滑方法的进一步变形,该方法刚被提出时主要用于测量地球自转参数时GPS法和甚长基线干涉测量法(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)的融合^[6]。有关学者对该方法在时频领域的应用也进行了研究,Jiang等通过该方法将利用载波相位数据的GPS PPP时间比对和TWSTFT数据进行了融合,提高了时间比对链路的短期稳定度^[7];姜萌等采用V-C法对短期稳定度较好的氢原子钟数据和长期稳定度较好的铯原子钟数据在时间尺度方面进行了融合,获得了理想的氢铯融合时间尺度^[8]。因此,本文基于目前中科院国家授时中心(National Time Service Center, NTSC)参与建立的卫星双向时间比对网和北斗链路,分别在长短基线上利用Vondrak-Cepek方法对没有周日效应现象的北斗CV和TWSTFT数据进行有效融合,通过时间偏差、频谱分析以及另一种独立的GPS PPP为参考对融合结果作内外符合评估。融合结果表明该方法可以明显改善TWSTFT的周日效应。

1 时间比对原理

1.1 SATRE 和 SDR TWSTFT 原理

TWSTFT被广泛应用于UTC守时实验室的国际时间比对,其原理如图1所示。地面站1的本地主钟产生的信号输入到调制解调器与经过二进制相移键控方式调制的伪随机码(PseudoRandom Noise, PRN)信号同步,生成的70 MHz中频信号经上变频器变频为上行频率后,经功率放大器放大,由天线系统将信号发射到卫星;位于地面站2的天线系统接收到卫星转发的时间信号后,经下变频器将频率转换为70 MHz中频信号输入本地卫星时间和距离测量设备(SATellite Time and Ranging Equipment, SATRE)的接收通道;将接收到的信号进行解调后得到站1和站2的信号传输时间,两站按照比对计划表进行常规比对,各自得到对方的比对文件后就得到双向比对结果。SDR TWSTFT由软件编程来实现接收机功能,目前在卫星双向地面站,SDR TWSTFT的发射信号采用与硬件SATRE一致,接收通道与硬件SATRE相互独立,天线系统接收的信号经下变频器处理后输入SDR接收通道,通过信号转换器的模数转换、现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)的解调以及滤波后得到两地钟差。SATRE和SDR TWSTFT都可获得发射站与接收站之间的高精度钟差,两者相互冗余^[9-10]。

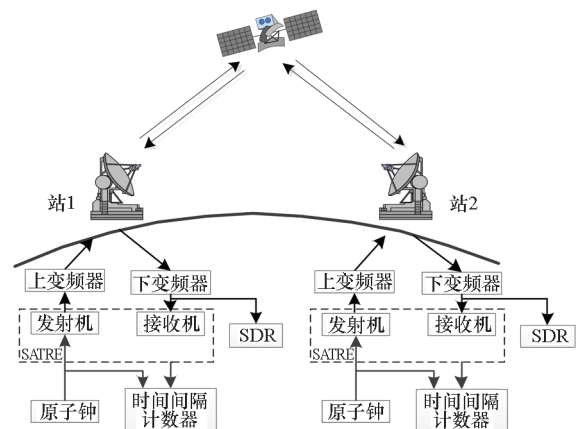


图1 卫星双向时间比对原理

Fig. 1 Principle of TWSTFT

站1和站2时间尺度间的差值计算公式为:

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

式中: T_k 为实验室1和实验室2的本地时间; T_{TWk} 为地面站1和地面站2调制解调器得到的信号传

输时延值; T_{CALRk} 为经移动校准器标定的地面站校准时延值; $T_{ESDVARk}$ 为链路校准后的本地站设备变化时延值; $T_{REFDLYk}$ 为实验室 $UTC(k)$ 参考点到调制解调器发射端的时延值。

1.2 北斗共视比对原理

北斗共视时间比对是位于地球任何两个位置的守时实验室同时观测一颗或多颗北斗导航卫星,通过连接本地参考 $UTC(k)$ 的接收机输出伪距测量值,建立观测方程分别得到本地时间与北斗系统时(BeiDou system Time, BDT)的时差,共视法可消除卫星钟误差和卫星轨道误差的影响,消除传播路径和接收机端的各项误差后就可以间接得到两地之间的时差,北斗共视比对原理如图2所示^[11-12]。

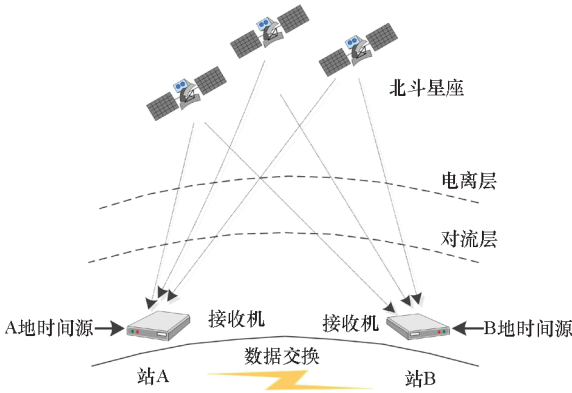


图2 北斗共视时间比对原理

Fig. 2 Principle of BDS CV time transfer

假设 A、B 两地的本地时间分别为 t_A 和 t_B ,

Δt_{ABDT} 、 Δt_{BBDT} 是 A 地、B 地与 BDT 的差,有:

$$\Delta t_{ABDT} = t_A - t_{BDT} \quad (2)$$

$$\Delta t_{BBDT} = t_B - t_{BDT} \quad (3)$$

式(2)减去式(3)可得两地的时间差 Δt_{AB} :

$$\begin{aligned} \Delta t_{AB} &= \Delta t_{ABDT} - \Delta t_{BBDT} = (t_A - t_{BDT}) - (t_B - t_{BDT}) \\ &= t_A - t_B \end{aligned} \quad (4)$$

2 北斗共视和卫星双向融合算法

由于 GNSS CV 结果没有周日效应,因此采用 Vondrak-Cepek 组合滤波来对北斗共视和 TWSTFT 结果进行融合,用共视结果的一阶差分值对双向时间比对结果进行干预,来减小 TWSTFT 的周日效应,改善卫星双向时间比对的性能。

2.1 BDS CV 和 TWSTFT 融合模型

假设 TWSTFT 在时间 t_i 的观测量为 $y(t)$,该时刻相对应的导数 $y'(t)$ 定义为 $[y(t_{i+1}) - y(t_i)] / (t_{i+1} - t_i)$,假设另一组独立的北斗共视观测量为 $Y(t)$,其导数 $Y'(t) = [Y(t_{j+1}) - Y(t_j)] /$

$(t_{j+1} - t_j)$,这两组导数的物理意义是相同的,均表示两地钟差的变化率。当 $t_i = t_j$ 时, $y'(t) = Y'(t)$,且

$$\int_{MJD1}^{MJD2} y'(TW) dt = \int_{MJD1}^{MJD2} Y'(CV) dt \quad (5)$$

$$TW_{MJD_{i+1}} = TW_{MJD_i} + \sum_{j=MJD_i}^{MJD_{i+1}} \Delta(CV_j) \quad (6)$$

其中, MJD 为简化儒略日。因为所选的双向时间比对间隔和北斗共视的时间间隔相同,所以式(6)下一时刻的 TWSTFT 观测值可表示为本时刻的 TWSTFT 观测值与该时段内北斗共视比对结果增量的和,总观测误差即 TWSTFT 实际观测值与通过共视表示的 TWSTFT 观测值在积分时间段内的差异。采用 Vondrak-Cepek 组合滤波方法建立平滑曲线的组合约束条件来实现对该观测误差的最小化。

2.2 Vondrak-Cepek 组合滤波原理

Vondrak-Cepek 组合滤波由 Vondrak 平滑法发展而来,其遵循最小二乘估计的直接误差准则,旨在寻找平滑值的平滑度以及对观测数据及其一阶导数的逼真度两方面的最佳平衡^[13]。假设时间序列 y'_j 表示为输入观测值,该序列对应的时标为 x_j ,每个观测值被赋予的权重为 p_j ;另一组时间序列观测值 \bar{y}'_k 表示为该观测值的一阶导数,其对应的时标为 \bar{x}'_k ,对每个一阶导数赋予的权重为 \bar{p}'_k ;函数值 y_i 是处理得到的平滑序列值,该输出序列对应的时标为 x_i 。下面定义三个量:

1) 曲线平滑度。

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{x_N - x_1} \int_{x_1}^{x_N} (\varphi''')^2(x) dx \\ &= \sum_{i=1}^{N-3} (a_i y_i + b_i y_{i+1} + c_i y_{i+2} + d_i y_{i+3})^2 \end{aligned} \quad (7)$$

2) 平滑曲线对观测值的逼真度。

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i (y'_i - y_i)^2 \quad (8)$$

3) 平滑曲线对观测值一阶导数的逼真度。

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{p}_i (\bar{y}'_i - \bar{y}_i)^2 \quad (9)$$

Vondrak-Cepek 组合滤波对数据融合的目的是找出输出的平滑序列 y_i 在下列三种条件下的折中:

- 1) 曲线是平滑的(最小化 S)。
- 2) 平滑序列应该接近观测函数值(最小化 F)。
- 3) 平滑序列的一阶导数应该接近输入的一阶导数观测值(最小化 \bar{F})。

对三种条件进行最小化约束,有:

$$Q = S + \varepsilon F + \bar{\varepsilon} \bar{F} = Q_{\min} \Rightarrow \frac{\partial Q}{\partial y_i} = 0 (i = 1, 2, \dots, N) \quad (10)$$

其中,平滑因子 $\varepsilon \geq 0, \bar{\varepsilon} \geq 0$, 分别代表观测函数 F 和一阶导数 \bar{F} 的平滑系数。可通过选择不同平滑因子的值来实现对平滑值平滑度和逼真度的调整,当选择越小的平滑因子时,平滑值相对原始观测值的平滑度越大。

选用频率响应法来确定平滑因子,其公式为:

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{(2\pi f)^6 T}{1 - T} \\ \bar{\varepsilon} = \frac{(2\pi f)^4 T'}{1 - T'} \end{cases} \quad (11)$$

其中: $0 \leq T \leq 1, 0 \leq T' \leq 1$, 周期 $P = 1/f$ 。滤波器频率响应值 (T 和 T')、平滑因子 (ε 和 $\bar{\varepsilon}$) 及周期 P 间的关系见表 1。

表 1 频率响应值、平滑因子和周期间的关系

Tab.1 Relationship among frequency response value, smoothing factor and periodicity

T 或 T'	$P = 0.5$		$P = 1$	
	ε	$\bar{\varepsilon}$	ε	$\bar{\varepsilon}$
0.10	438 000	2 770	6 840	173
0.30	1 690 000	10 700	26 400	668
0.50	3 940 000	24 900	61 500	1 560
0.80	15 800 000	99 700	246 000	6 230
0.99	390 000 000	2 470 000	6 090 000	154 000

从表 1 可以看出,固定 P 值,平滑因子 ε 和 $\bar{\varepsilon}$ 都随 T 增大而增大。若根据其他条件得到需要被抑制信号的周期,则可以将周期固定,通过改变观测函数和一阶导数对应的不同的频率响应和平滑因子的值,确定最适合融合处理的参数。这里主要研究利用北斗共视值来抑制双向时间比对中的周日效应,因此周期选择为 $P = 1$ 。对于原始双向结果需要减弱周日效应的影响,因此应该减小其频率响应值 T ,而对于 BDS CV 结果,需要利用其结果基本没有周日效应的特点,故应增大其频率响应值 T' 。这里根据实际选择 $T = 0.30, T' = 0.80$,从表 1 可知, $\varepsilon = 26 400, \bar{\varepsilon} = 6 230$ 。另外,该方法可对输入的两种时间序列在不同时刻根据已知的不确定度取权。假设双向观测值和北斗共视观测值在不同时刻的不确定度相同,两类数据取等权。图 3 为 $P = 1$ 时,频率响应与平滑因子的关系曲线图。

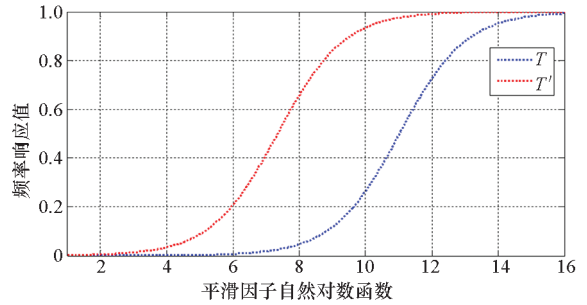


图 3 $P = 1$ 时频率响应值与平滑因子的关系

Fig.3 Relationship between frequency response value and smoothing factor when $P = 1$

3 结果分析

由于 BIPM 计算国际原子时 (International Atomic Time, TAI) 采用一个月的数据,因此分别选取几何基线长度约为 7 700 km 的 NTSC 和德国联邦物理技术研究院 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) 链路 2019 年 10 月至 11 月 (MJD58775 - MJD58804) 以及几何基线长度约为 900 km 的 NTSC 和中国计量科学研究院 (National Institute of Metrology, NIM) 链路 2020 年 1 月至 2 月 (MJD58852 - MJD58881) 的 SATRE 和 SDR 双向以及北斗共视数据进行分析。

3.1 BDS CV 与 TWSTFT 融合结果

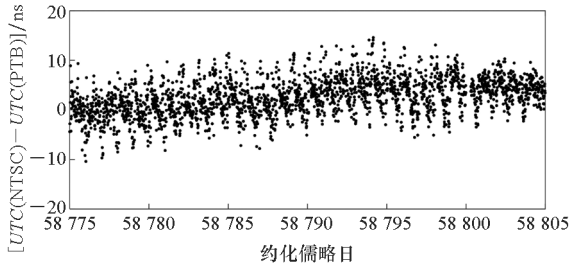
参与比对的卫星双向系统和北斗共视比对系统的参考同源且都为 $UTC(k)$ (k 指不同的实验室),实验室和设备信息见表 2。

表 2 参与比对的守时实验室和设备信息

Tab.2 Information of stations and receivers used in the time comparison

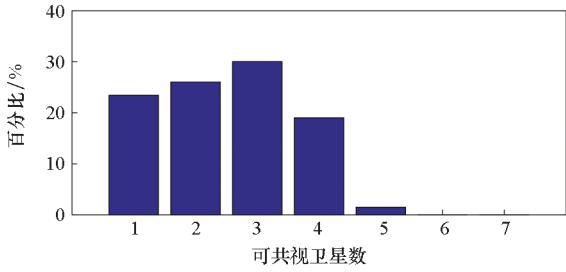
实验室	位置	双向设备类型	北斗接收机类型	天线类型
NTSC	中国西安	TimeTech	SEPT	SEPCHOKE_
		SATRE	POLARX4TR	MC
NIM	中国北京	TimeTech	NIM-TF-	HXCCSX
		SATRE	GNSS	601A
PTB	德国布伦瑞克	TimeTech	SEPT	NOV750.
		SATRE	POLARX4TR	R4

本次共视比对选择 16 min 无电离层组合的标准共视程序,组合信号频点为 B1I 和 B2I。长基线 NTSC-PTB 链路的北斗共视结果及比对期间可共视卫星数统计如图 4(a) 和 4(b) 所示,短基线 NTSC-NIM 链路如图 4(c) 和 4(d) 所示。



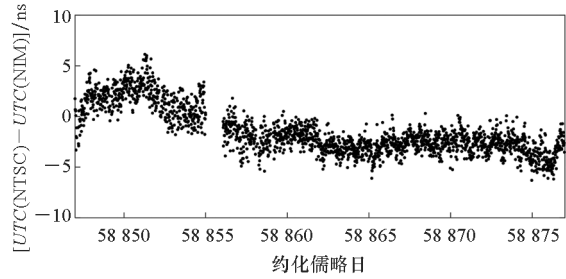
(a) NTSC-PTB 共视结果

(a) NTSC-PTB CV results



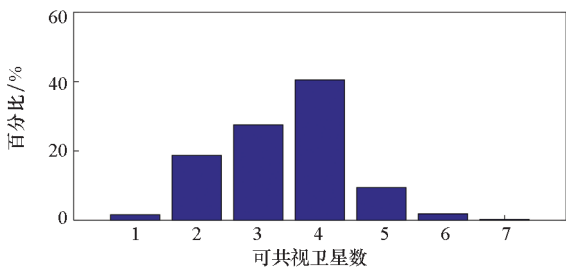
(b) NTSC-PTB 共视卫星数统计

(b) NTSC-PTB CV satellite statistics



(c) NTSC-NIM 共视结果

(c) NTSC-NIM CV results



(d) NTSC-NIM 共视卫星数统计

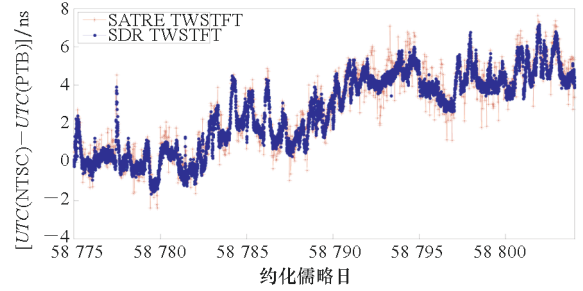
(d) NTSC-NIM CV satellite statistics

图4 不同基线北斗共视时间比对结果

Fig. 4 Results of BDS CV over different baselines

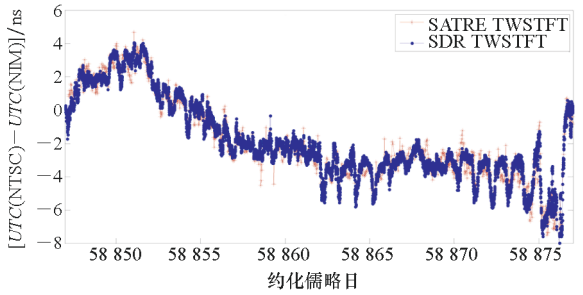
从图4可以看出,两条链路的北斗共视比对结果中都没有明显的周日效应现象,NTSC-PTB链路噪声较NTSC-NIM链路大。这是因为NTSC-PTB链路基线长,在同一时刻共视到的卫星数较短基线链路NTSC-NIM少,在共视比对中,较多的共视卫星数可以平均出更好的时间比对结果,但该结果不会影响双向和北斗共视的融合计算。图5为两条链路SATRE和SDR

TWSTFT的原始结果。



(a) NTSC-PTB 链路

(a) NTSC-PTB link



(b) NTSC-NIM 链路

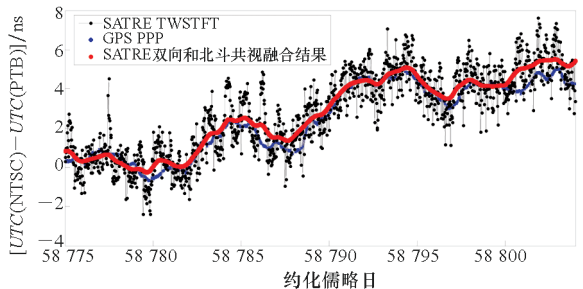
(b) NTSC-NIM link

图5 SATRE和SDR双向比对结果

Fig. 5 Results of SATRE and SDR TWSTFT

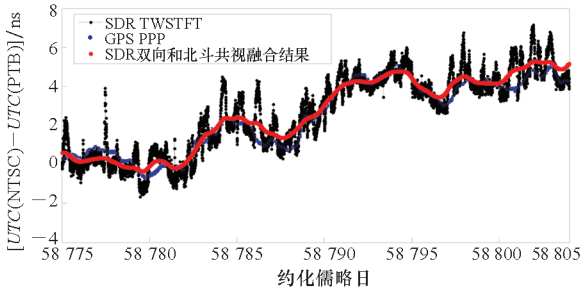
由图5可知,无论是长基线链路还是短基线链路,SATRE和SDR TWSTFT的比对结果中都会看到明显的周日效应现象。为对双向结果进行改善,利用第2节的V-C组合滤波方法分别对NTSC-PTB长基线以及NTSC-NIM短基线上的SATRE和SDR TWSTFT比对结果与北斗共视结果进行融合,由于GPS PPP是与TWSTFT相独立的时间比对技术且其基本不受周日效应影响,因此以GPS PPP时间比对结果为参考,结果如图6和图7所示。

从图6和图7的融合结果可知,SATRE和SDR TWSTFT经V-C组合滤波后周日效应明显改善,且融合结果的噪声水平也明显减小,这与V-C



(a) SATRE双向链路不同方法时间比对结果

(a) Time transfer solutions of different methods for SATRE TW link

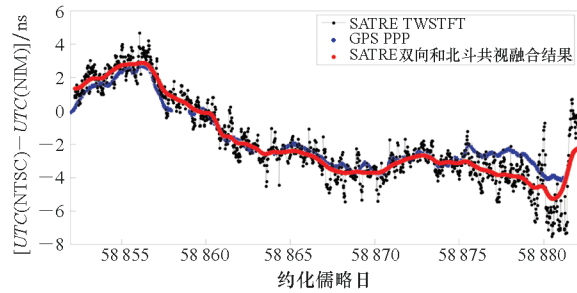


(b) SDR 双向链路不同方法时间比对结果

(b) Time transfer solutions of different methods for SDR TW link

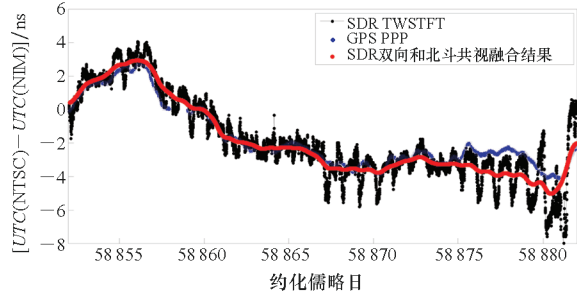
图 6 NTSC-PTB 链路融合结果

Fig. 6 Combined smoothing results of NTSC-PTB link



(a) SATRE 双向链路不同方法时间比对结果

(a) Time transfer solutions of different methods for SATRE TW link



(b) SDR 双向链路不同方法时间比对结果

(b) Time transfer solutions of different methods for SDR TW link

图 7 NTSC-NIM 链路融合结果

Fig. 7 Combined smoothing results of NTSC-NIM link

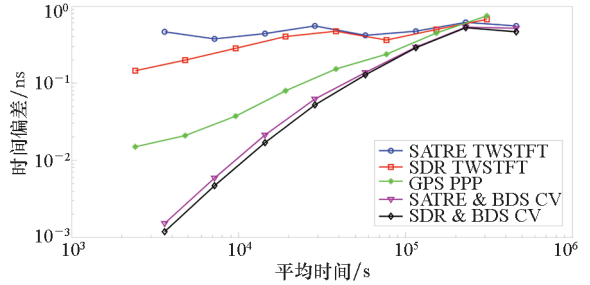
本身的滤波特性有关。另外,融合结果与 GPS PPP 参考链路的结果基本一致,保证了融合结果的可靠性。

3.2 内符合评估

为对融合结果的稳度及周日效应改善程度进行量化,采用时间偏差 σ_x 评估融合前后时间比对链路的稳度, σ_x 越小,链路稳度越高。用式(12)的增益因子 c 表示改善程度的大小。

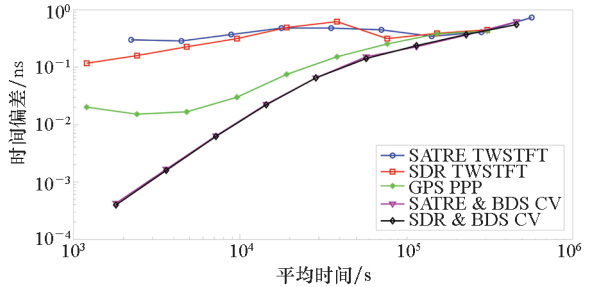
$$c = \frac{\sigma_x(y_1)}{\sigma_x(y_2)} \quad (12)$$

式中, $\sigma_x(y_1)$ 和 $\sigma_x(y_2)$ 表示不同时间比对链路的时间偏差。这里用 SATRE & BDS CV 表示 SATRE 双向和北斗共视融合,用 SDR & BDS CV 表示 SDR 双向和北斗共视融合,下同。融合前后的时间偏差如图 8 所示。



(a) NTSC-PTB 不同链路的时间偏差

(a) Time deviation of different links in NTSC-PTB



(b) NTSC-NIM 不同链路的时间偏差

(b) Time deviation of different links in NTSC-NIM

图 8 融合前后时间偏差比较

Fig. 8 Comparison of time deviation before and after combined smoothing

从图 8 可以看出,在时间偏差指标上,长短基线的 SATRE TWSTFT 和 SDR TWSTFT 在平均时间为 1 d 时有明显的“凸起”现象,说明其周日效应明显,经过 V-C 组合滤波的融合结果周日效应基本消失,且链路的短期稳度大大提高,这一方面与不同链路的融合有关,另一方面也与 V-C 滤波方法自身的平滑性有关。用平均时间 1 d 的时间偏差稳度来评估融合方法对原始双向的改善程度,结果见表 3。从表 3 可知:在长基线 NTSC-PTB 链路的天稳指标上,融合结果对 SATRE TWSTFT 的增益因子为 1.85,对 SDR TWSTFT 的增益因子为 1.81;在短基线 NTSC-NIM 链路的天稳指标上,融合结果对 SATRE TWSTFT 的增益因子为 1.69,对 SDR TWSTFT 的增益因子为 1.59。

采用快速傅里叶变换后频率分量的幅值对融合前后双向链路的周日效应改善进行标定。用式(13)的增益因子 d 表示改善程度的大小。

$$d = \sqrt{\frac{A(y_1)}{A(y_2)}} \quad (13)$$

式中, $A(y_1)$ 和 $A(y_2)$ 表示融合前后时间比对链路的 24 h 频率分量幅值。NTSC-PTB 双向链路和北斗共视融合前后的频谱图如图 9 所示, 采取与 NTSC-PTB 相同的方法求得 NTSC-NIM 的幅值频谱, 各链路融合前后的 24 h 分量幅值(即周日效应量)统计结果见表 4。

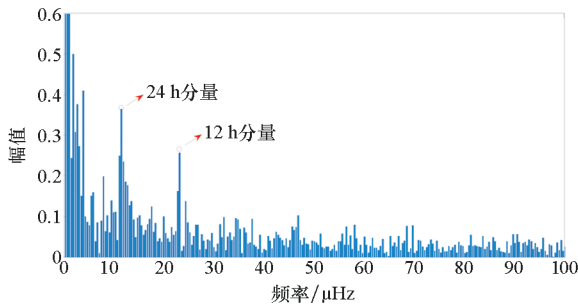
表 3 NTSC-PTB 和 NTSC-NIM 链路时间偏差改善统计

Fig. 3 Gain in TDEV of NTSC-PTB and NTSC-NIM links

链路	SATRE TWSTFT	SATRE & BDS CV	增益因子
	TDEV/ps	TDEV/ps	
NTSC-PTB	407	220	1.85
NTSC-NIM	306	181	1.69

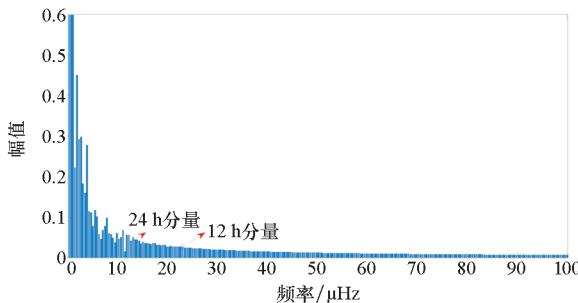
链路	SDR TWSTFT	SDR & BDS CV	增益因子
	TDEV/ps	TDEV/ps	
NTSC-PTB	380	210	1.81
NTSC-NIM	297	187	1.59

从图 9 和表 4 融合前后 24 h 分量的幅值变化可以看出, 经过 V-C 融合后, 两条链路 SATRE 及 SDR TWSTFT 中的周日效应都基本消失。对于亚欧 NTSC-PTB 链路, V-C 融合结果 24 h 分量对 SATRE TWSTFT 的增益因子为 4.30, 对 SDR TWSTFT 的增益因子为 2.50; 对于亚洲内部的 NTSC-NIM 链路, V-C 融合结果 24 h 分量对 SATRE TWSTFT 的增益因子为 2.77, 对 SDR TWSTFT 的



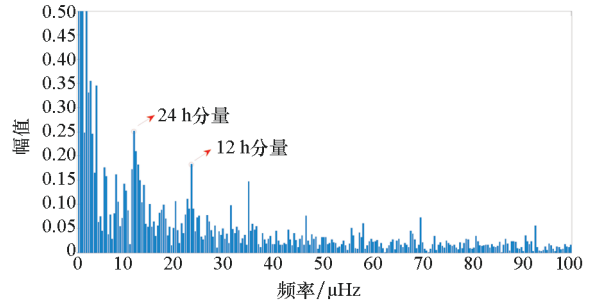
(a) SATRE TWSTFT 频谱分析

(a) Spectral analysis in SATRE TWSTFT



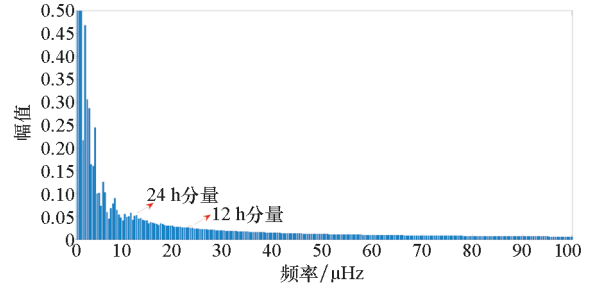
(b) SATRE & BDS CV 融合频谱分析

(b) Spectral analysis in fusion of SATRE & BDS CV



(c) SDR TWSTFT 频谱分析

(c) Spectral analysis in SDR TWSTFT



(d) SDR & BDS CV 融合频谱分析

(d) Spectral analysis in fusion of SDR & BDS CV

图 9 NTSC-PTB 链路融合前后频谱分析

Fig. 9 Spectral analysis of NTSC-PTB link before and after combined smoothing

增益因子为 4.85。通过以上分析可知, 利用 V-C 对双向和北斗共视融合后, 长短基线上的 SATRE 和 SDR TWSTFT 的周日效应基本消失, 且其 1 d 内的短期稳定性也得到提高。

表 4 NTSC-PTB 和 NTSC-NIM 链路 24 h 频率幅值改善统计

Tab. 4 Gain in 24 h frequency amplitude of NTSC-PTB and NTSC-NIM links

链路	SATRE TWSTFT	SATRE & BDS CV	增益因子
NTSC-PTB	0.37	0.02	4.30
NTSC-NIM	0.23	0.03	2.77

链路	SDR TWSTFT	SDR & BDS CV	增益因子
NTSC-PTB	0.25	0.04	2.50
NTSC-NIM	0.47	0.02	4.85

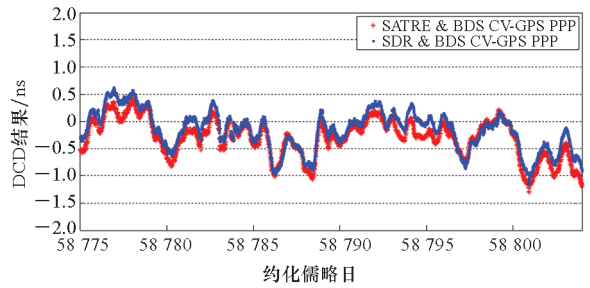
3.3 外符合评估

外符合评估是指将融合结果与采用第三种方法获得的结果进行比较, GPS PPP 时间比对是与 TWSTFT 完全独立的时间比对技术, 其由于利用

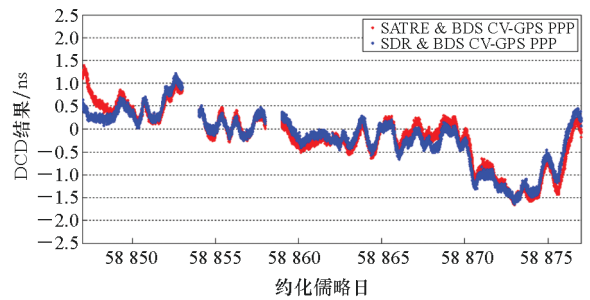
载波相位观测量,短期稳定度高且不受周日效应影响。因此,以同一基线的 GPS PPP 时间比对链路为参考,将 TWSTFT 与 BDS CV 经 V-C 融合后的结果与 GPS PPP 作差,得到双差(Double Clock Difference, DCD)结果后对融合结果的准确度与可靠度进行评估。图 10 为 NTSC-PTB 和 NTSC-NIM 两条链路 SATRE 和 SDR 双向与北斗共视融合结果分别与参考链路 GPS PPP 的 DCD 结果,表 5 为相关统计情况。

结合图 10、表 5 可以看出: NTSC-PTB 长基线链路 SATRE & BDS CV 融合结果与 GPS PPP 的差值绝对值最大为 1.31 ns, SDR & BDS CV 融合结果与 GPS PPP 的差值绝对值最大为 1.16 ns; NTSC-NIM 短基线链路 SATRE 和 SDR 与 BDS CV 融合结果与 GPS PPP 的差值绝对值的最大值分别为 1.65 ns 和 1.64 ns,且融合前后 DCD 结果均值基本无变化,这说明经过 V-C 融合的结果与 GPS PPP 结果保持一致,V-C 融合并没有改变原始双向对时的校准信息,保证了融合结果的准确度。而原始 SATRE 和 SDR 双向结果由于周日效应及链路不稳定性的存在,与 GPS PPP 的 DCD 最大值明显超过了链路允许的最大不确定度。与式(12)时间偏差指标增益因子计算相类似,从表 5 融合前后 DCD 结果的标准差比值计算可得,NTSC-PTB 链路 SATRE 和 SDR TWSTFT 与 GPS PPP DCD 结果融合前后的标准差增益因子分别为 2.71 和 1.94,

NTSC-NIM 链路融合前后的标准差增益因子分别为 1.67 和 1.82,进一步证明融合结果可以减小 TWSTFT 结果中的周日效应并提高链路稳定度,与上一节内符合评估中得出的结论一致。



(a) NTSC-PTB 链路
(a) NTSC-PTB link



(b) NTSC-NIM 链路
(b) NTSC-NIM link

图 10 融合结果与 GPS PPP DCD 结果比较

Fig. 10 DCD results between combined solutions and GPS PPP

表 5 不同链路的 DCD 结果
Tab. 5 DCD results of different links

链路	DCD	最大值/ns	最小值/ns	均值/ns	标准差/ns
NTSC-PTB	SATRE & BDS CV-GPS PPP	0.41	-1.31	-0.29	0.35
	SDR & BDS CV-GPS PPP	0.63	-1.16	-0.17	0.36
	SATRE TWSTFT-GPS PPP	2.37	-3.86	-0.28	0.95
	SDR TWSTFT-GPS PPP	1.36	-3.20	-0.16	0.70
NTSC-NIM	SATRE & BDS CV-GPS PPP	1.39	-1.65	-0.16	0.61
	SDR & BDS CV-GPS PPP	1.22	-1.64	-0.18	0.57
	SATRE TWSTFT-GPS PPP	3.89	-3.79	-0.20	1.02
	SDR TWSTFT-GPS PPP	3.43	-5.11	-0.20	1.04

4 结论

采用 Vondrak-Ceppek 组合滤波方法对没有周日效应现象的 BDS CV 和 TWSTFT 结果在不同基线长度上进行融合处理,通过融合前后各链路的时间偏差,频谱 24 h 分量幅值以及与 GPS PPP 的

DCD 等指标的分析,证明了 V-C 方法对 TWSTFT 和 BDS CV 融合的有效性。结果表明:融合结果在保证时间比对准确度的同时,可以基本消除 SATRE 和 SDR TWSTFT 中的周日效应,且其短期稳定度大幅提高。对于长基线 NTSC-PTB 链路,融合结果 1 d 的时间偏差稳定度对 SATRE 双向

的增益因子为 1.85,对 SDR 双向的增益因子为 1.81;对于短基线 NTSC-NIM 链路,融合结果对 SATRE 双向的增益因子为 1.69,对 SDR 双向的增益因子为 1.59。随着 UTC 时间比对手段的不断丰富,多链路多手段时间比对融合将是未来国际时间比对工作的重要议题。

参考文献 (References)

- [1] JIANG Z H, ZHANG V, PARKER T E, et al. Improving two-way satellite time and frequency transfer with redundant links for UTC generation [J]. *Metrologia*, 2019, 56(2): 025005.
- [2] ZHANG V, ACHKAR J, HUANG Y J, et al. A study on using the SDR receiver for the Europe-to-Europe and transatlantic TWSTFT links [C]//Proceedings of the 48th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, 2017: 206–218.
- [3] 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 Weixiong, DONG Shaowu, WU Wenjun, 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. (in Chinese)
- [4] LIN H T, HUANG Y J, TSENG W H, et al. The TWSTFT links circling the world [C]//Proceedings of IEEE International Frequency Control Symposium, 2014.
- [5] JIANG Z H, 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] VONDRÁK J, ČEPEK A. Combined smoothing method and its use in combining Earth orientation parameters measured by space techniques [J]. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 2000, 147(2): 347–359.
- [7] JIANG Z, PETTIT G. Combination of TWSTFT and GNSS for accurate UTC time transfer [J]. *Metrologia*, 2009, 46(3): 305–314.
- [8] 姜萌,董绍武,武文俊,等. 基于 Vondrak-Cepek 滤波的氢铯时间尺度融合方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(8): 158–166.
JIANG Meng, DONG Shaowu, WU Wenjun, et al. Fusion of hydrogen and cesium time scale based on Vondrak-Cepek filter [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(8): 158–166. (in Chinese)
- [9] 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 Zhiheng, WU Wenjun. UTC two-way satellite time and frequency transfer based on SDR [J]. *Journal of Time and Frequency*, 2019, 42(3): 196–205. (in Chinese)
- [10] 陈西宏,刘赞,刘强,等. 对流层散射双向时间比对中对流层斜延迟估计 [J]. *国防科技大学学报*, 2016, 38(2): 171–176.
CHEN Xihong, LIU Zan, LIU Qiang, et al. Tropospheric slant delay estimation in two-way troposphere time transfer [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(2): 171–176. (in Chinese)
- [11] GUANG W, DONG S W, WU W J, et al. Progress of BeiDou time transfer at NTSC [J]. *Metrologia*, 2018, 55(2): 175–187.
- [12] HUANG W, DEFRAIGNE P. BeiDou time transfer with the standard CGGTTS [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2016, 63(7): 1005–1012.
- [13] LIU Y C, GONG H, LIU Z J, et al. A novel method based on the Vondrak-Cepek algorithm for correction of TWSTFT diurnal [C]//Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium-Spring, 2017: 2931–2937.