

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.06.018

差分码偏差对 PPP 授时精度影响的研究

韩金阳^{1,2}, 张杰^{1,2}, 钟世明^{1,2}, 王生亮^{1,2}

1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 武汉 430077;
2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049)

摘要: 论文分析了不同机构差分码偏差(DCB)产品的天稳性。选取了2个外接氢原子钟的测站进行实验,以国际GNSS服务组织(IGS)发布的接收机钟差为参考值,分析了不同机构DCB产品对2个测站PPP授时精度的影响。实验结果表明:1)不同机构DCB产品的天稳性差异不大,中国科学院天稳性略优于德国宇航中心;2)2个测站使用不同机构的DCB产品估计钟差的均方差(RMS)和时间偏差(Bias)均优于0.4ns,其中中国科学院产品精度最高,RMS和Bias均优于0.2ns;德国宇航中心和欧洲定轨中心精度略差,但也能够达到亚纳秒级,可为下一步推广PPP授时应用提供一定的参考。

关键词: GPS; 精密单点定位(PPP); 差分码偏差(DCB); 授时; 钟差

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2021)06-0131-07

Study on the Influence of Differential Code Bias on PPP Timing Precision

HAN Jin-yang^{1,2}, ZHANG Jie^{1,2}, ZHONG Shi-ming^{1,2}, WANG Sheng-liang^{1,2}

1. State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China;
2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The day stability of Differential Code Bias(DCB) products with different institutions is studied. In order to accurately evaluate the influence of DCB on PPP timing accuracy, two stations with external hydrogen clocks are selected. Taking the receiver clock difference published by International GNSS Service (IGS) as reference value, the influence of DCB products of different institutions on PPP timing accuracy of the two stations is analyzed. The results show that, 1) there is little difference in the day stability of DCB products from different institutions, and the day stability of Chinese Academy of Sciences is slightly better than that of German Aerospace Center; 2) The RMS and bias of the estimated clock error using DCB products from different institutions at the two stations are better than 0.4ns. Products of Chinese Academy of Sciences have the highest accuracy, with RMS and bias better than 0.2ns, and product accuracy of German Aerospace Center and Center for Orbit Determination in Europe is slightly worse, but can also reach the sub-nanosecond level, which can provide some reference for the further promotion of PPP timing appli-

收稿日期: 2021-07-26; **修订日期:** 2021-08-30

基金项目: 中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20190062); 国家自然科学基金(41904165); 国家重点研发计划(2016YFB0501900)

作者简介: 韩金阳(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事 GNSS 时间频率传递方面的研究。

通信作者: 张杰(1987-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事时间频率传递与时间同步方面的研究。

cations.

Key words: GPS; Precise Point Positioning (PPP); Differential Code Bias(DCB); Timing; Clock

0 引言

基于全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)的高精度时频传递技术已经在国际上广泛应用。精密单点定位(Precise Point Positioning,PPP)时频传递作为一种新兴的方法,自2006年起开始被引入时频领域^[1-2];2009年,全球定位系统(Global Positioning System,GPS)PPP成为国际原子时(Temps Atomique International,TAI)的例行时频传递技术之一^[3];2016年,国际计量局(Bureau International des Poids et Mesures,BIPM)公布的GPS PPP时间对比精度在0.3ns左右^[4]。目前,全球80多个在BIPM注册的守时实验室中,有50多个利用PPP时频传递技术实现了本地协调世界时[Universal Time Coordinated,UTC_(k)(k为守时实验室的缩写)]精确溯源到协调世界时UTC^[5-6]。

卫星信号在卫星和接收机硬件内部通道传播的过程中,由于仪器设备制造的不一致性以及电磁波传播的物理特性限制,导致码伪距观测值存在偏差^[7],且不同频率的码伪距观测值之间的偏差不同,这种偏差被称为差分码偏差(Differential Code Bias,DCB),按照频率相同或不同又可分为频内偏差和频间偏差。由于GNSS卫星钟差参数基准通常是由某2个频率的消电离层组合观测量(如GPS P1/P2)维持,因此在进行PPP授时时需引入DCB参数进行误差改正^[8]。

文献[9]采用GPS PPP方法得到亚纳秒级的时间传递精度,并证明了其短期稳定度优于卫星双向时间频率比对(Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer,TWSTFT)技术;文献[10]同样进行了GPS PPP时间传递实验,得到了优于0.2ns的时间传递精度;文献[11-13]在进行PPP单站授时时,得到的结果与国际GNSS服务组织(International GNSS Service,IGS)结果存在系统性偏差,且不同测站的系统性偏差不同;文献[14]针对这一现象,基于CODE产品进行了DCB参数改正,改正后结果与IGS结果相差在亚纳秒级,并得出DCB不会影响时间传递频率稳定度的结论。

目前,国际上提供DCB产品的机构主要有欧洲定轨中心(Center for Orbit Determination in Eu-

rope, CODE)、德国宇航中心(German Aerospace Center,DLR)和中国科学院(Chinese Academy of Sciences,CAS),而对于不同机构DCB产品的分析以及其对PPP授时的影响研究较少。因此,本文首先分析了不同机构DCB产品的天稳性,并选择外接氢原子钟的1个多模GNSS实验跟踪网(Multi-GNSS Experiment, MGEX)测站和1个守时实验室的观测数据进行实验分析,所用观测数据年积日为2020年287~297日,共10天,利用IGS精密卫星轨道和钟差产品进行PPP授时实验,并分析了不同机构DCB产品对PPP授时精度的影响。

1 PPP授时数学模型

1.1 PPP授时原理

一般地,伪距 P 和载波相位 L 的观测方程可表示为^[15]

$$P_{r,j}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + Mw_r^s \cdot ZWD_r + \gamma_j \cdot I_{r,1}^s + c(d_{r,j} - d_j^s) + \epsilon_{r,j}^s \quad (1)$$

$$L_{r,j}^s = \lambda_j^s \cdot \Phi_{r,j}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + Mw_r^s \cdot ZWD_r - \gamma_j \cdot I_{r,1}^s + \lambda_j^s (N_{r,j}^s + b_{r,j} - b_j^s) + \xi_{r,j}^s \quad (2)$$

式(1)及式(2)中:上标 s 表示卫星的PRN号;下标 r 和 j ($j=1,2$)分别表示接收机ID和观测值频段号; ρ_r^s 为卫星与测站间的几何距离(m); λ_j^s 为频率 f_j 对应的载波波长(m/周); $\Phi_{r,j}^s$ 为以周为单位的原始载波观测值; c 为真空中光速(m/s); dt_r 和 dt^s 分别为接收机钟差和卫星钟差(s); ZWD_r 为测站的天顶湿延迟(m); Mw_r^s 为与卫星高度角有关的湿投影函数(m),可通过全球投影函数(Global Mapping Function,GMF)获取^[16]; $I_{r,1}^s$ 为频率 f_1 上对应的斜电离层延迟(m); γ_j 为与频率相关的电离层系数($\gamma_j = (f_1^s/f_j^s)^2$),其与卫星系统有关,与系统内的卫星PRN号无关; $d_{r,j}$ 和 d_j^s 为频率相关的接收机和卫星端的非校正伪距硬件延迟(Uncalibrated Code Delay,UCD)(ns); $b_{r,j}$ 和 b_j^s 为频率相关的接收机和卫星端的非校正相位硬件延迟(Uncalibrated Phase Delay,UPD)(周); $N_{r,j}^s$ 为载波整周模糊度(周); $\epsilon_{r,j}^s$ 和 $\xi_{r,j}^s$ 为伪距和载波相位的观测噪声。

基于PPP进行授时通常采用消电离层组合模型,双频(f_1 和 f_2)伪距和载波的消电离层组合可

表示为^[17-18]

$$P_{r,IF12}^s = \alpha_{12} \cdot P_{r,1}^s + \beta_{12} \cdot P_{r,2}^s$$

$$= \mu_r^s \cdot x + c \bar{d}t_r + M\omega_r^s \cdot ZWD_r + \varepsilon_{r,IF12}^s \quad (3)$$

$$l_{r,IF12}^s = \alpha_{12} \cdot l_{r,1}^s + \beta_{12} \cdot l_{r,2}^s$$

$$= \mu_r^s \cdot x + c \bar{d}t_r + M\omega_r^s \cdot ZWD_r + \bar{N}_{r,IF12}^s + \xi_{r,IF12}^s \quad (4)$$

其中, α_{12} 、 β_{12} 为消电离层组合系数; μ_r^s 为方向余弦; x 为相对于初始坐标的位置增量; $\bar{d}t_r$ 、 $\bar{N}_{r,IF12}^s$ 为重新参数化后的接收机钟差和载波相位模糊度。

其中重新参数化后的接收机钟差可表示为

$$c \bar{d}t_r = c(dt_r + d_{r,IF12} + dD) \quad (5)$$

其中, dt_r 为接收机钟差; $d_{r,IF12} = \alpha_{12} \cdot d_{r,1} + \beta_{12} \cdot d_{r,2}$ 为被接收机钟差吸收掉的 DCB; dD 为参考基准的偏差, 当采用相同时间基准时可忽略不计。

由式(5)可知, 接收机钟差吸收了消电离层组合的 DCB, 因此在进行 PPP 授时时, 需对接收机钟差进行 DCB 改正。

1.2 不同机构 DCB 产品处理策略

BIPM 在基于 GPS PPP 维持 TAI 时, 采用的是 IGS 产品, 而目前 IGS 产品的时间基准是由 P1/P2 消电离层组合得到的^[8]。因此, 使用其他观测量组合如(C1/P2)进行 GPS PPP 解算时, 需引入 DCB 参数进行改正^[19]。图 1 所示为 GPS 码偏差与 IGS 产品时间基准之间的关系。

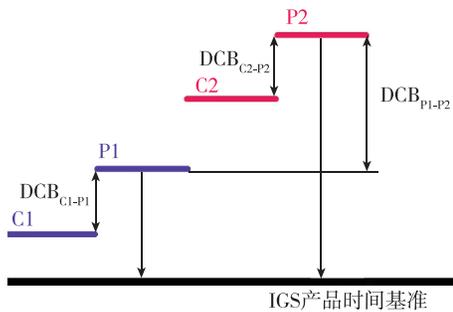


图 1 GPS 码偏差与 IGS 产品时间基准关系

Fig. 1 Relationship between GPS differential code bias and IGS product time reference

表 1 给出了不同机构 DCB 产品的处理策略。CODE 从 2003 年开始基于 GPS 卫星钟差同步估计的方法, 提供每个月 GPS 卫星的码偏差产品(文件名为 P1C1yymm.DCB); 自 2010 年起, 开始提供基于码观测量组合方法得到的 GPS 及 GLONASS 卫星和接收机的频内偏差, 并提供码偏差产品(文件名为 P1C1-yymm_RINEX.DCB), 其频间偏差是基于全球

分布的大量 GNSS 基准站观测数据, 利用全球电离层总电子含量(Total Electron Content, TEC)建模的方式得到^[20]; DLR 频内偏差参数也是基于码观测量组合得到的, 其频间偏差通过 MGEX 监测站数据直接采用在全球电离层格网(Global Ionosphere Maps, GIM)扣除电离层 TEC 影响来估计, 自 2013 年开始向 IGS 提供包括 GPS、GLONASS、BDS 及 Galileo 在内的每天多系统 DCB 产品^[21]; CAS 频内偏差参数计算方法与 DLR 相同, 频间偏差是基于扩展的 IG-GDCB 方法进行计算的, 自 2015 年开始向 IGS 提供每天多系统 DCB 产品^[22]。

表 1 不同机构 DCB 产品处理策略

Tab. 1 DCB product handling strategies for different organizations

机构	GNSS	时间间隔	处理策略
CODE	GPS+GLO	1 个月	GPS 卫星钟差同步估计、码观测量组合 + 全球电离层 TEC 建模
DLR	GPS+GLO+GAL+BDS	1 天	码观测量组合 + GIM 扣除电离层 TEC
CAS	GPS+GLO+GAL+BDS	1 天	码观测量组合 + IGGDCB

2 DCB 产品天稳性分析

DCB 参数在一段时间内的变化是稳定的, 尽管接收机 DCB 参数不如卫星 DCB 参数稳定, 但仍可在一定范围内作为常数进行估计^[23]。由于 DCB 具有上述特性, 所以本文分析了不同机构 DCB 产品的天稳性。

以 GPS 为例, 选取了 CAS 和 DLR 两家机构 31 天 DCB 产品数据, 分析各颗卫星 DCB 参数的均值和 STD 值; 同时从两家机构产品中选取 2 个测站 10 天的接收机端 DCB 数据, 通过分析其均值和 STD 值来分析测站 DCB 产品的天稳性。

2.1 卫星 DCB 产品天稳性分析

为了评估卫星 DCB 产品的天稳性, 实验选取了 DLR 和 CAS 两家机构 2020 年 275~305 日(年积日)共 31 天的数据。统计了 GPS 卫星 31 天内 P1-C1 码偏差的天均值, 如图 2 和图 3 所示, 图中横坐标为年积日, 纵坐标为 GPS 卫星 DCB 值, 并统计了产品各颗卫星的 STD 值, 如图 4 所示。

从图 2~图 4 中可以看出, CAS 与 DLR 产品提供的 P1-C1 偏差值相近, 各 GPS 卫星的 DCB 值在 -2

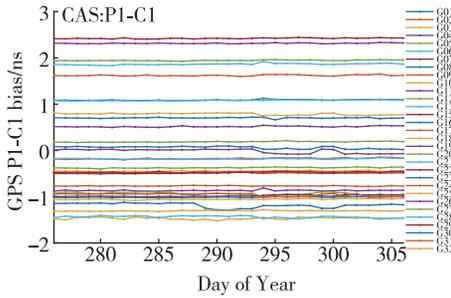


图2 2020年275~305日CAS产品中GPS P1-C1偏差值

Fig. 2 GPS P1-C1 bias of CAS products on DOY 275~305 in 2020

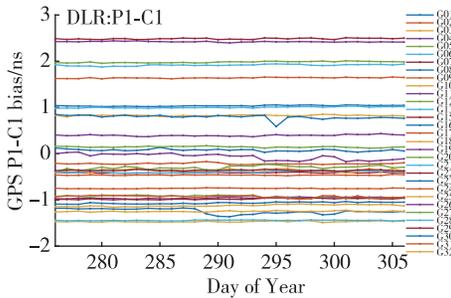


图3 2020年275~305日DLR产品中GPS P1-C1偏差值

Fig. 3 GPS P1-C1 bias of DLR products on DOY 275~305 in 2020

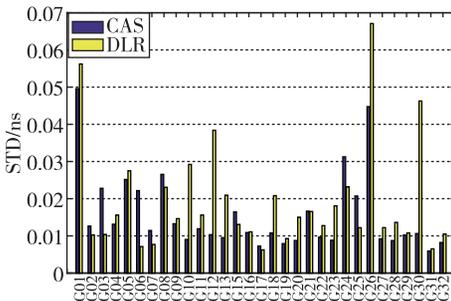


图4 2020年275~305日CAS、DLR产品中GPS P1-C1偏差值STD统计

Fig. 4 STD of GPS P1-C1 bias in CAS and DLR products on DOY 275~305 in 2020

~3ns 之间变化。CAS 产品中 G01 号卫星 STD 为 0.049ns 最大, G31 号卫星 STD 为 0.005ns 最小; DLR 产品中 G26 号卫星 STD 为 0.067ns 最大, G17 号卫星 STD 为 0.006ns 最小。图 4 为相同卫星不同产品的 STD 值统计结果, 绝大部分卫星的 STD 均在 0.03ns 以下, 其中 G01 和 G26 卫星产品解算结果的 STD 均较大, 达到了 0.06ns 左右, 而 G10、G12 和 G30 卫星 CAS 产品的 STD 值明显小于 DLR。上述分析表明, CAS 和 DLR 产品提供的卫星 P1-C1 偏差值稳定性较高, 且 CAS 产品的 STD 值整体小于 DLR

产品, 稳定性优于 DLR 产品。

2.2 测站 DCB 产品天稳性分析

为了评估 DCB 产品中测站码偏差的天稳性, 分析了 TWTF 与 YEL2 测站 P1-C1 码偏差, 选取 DLR 和 CAS 两家机构 2020 年 287~296 日共 10 天数据 (YEL2 测站在 286、297、303 天数据缺失, 为保证数据连续性才选取 10 天数据)。如图 5 和图 6 所示, 图中横坐标为年积日, 纵坐标为 2 个测站 P1-C1 码偏差。表 2 统计了不同产品相同测站的均值和 STD 值。

从图 5、图 6 和表 2 中可以看出, CAS 和 DLR 产品给出的测站 P1-C1 码偏差均值基本相同, 相差在 0.04ns 以内, CAS 解算的码偏差值均略大于 DLR。对于 TWTF 测站, DLR 产品的 STD 为 0.018ns, 而 CAS 产品的 STD 仅为 0.004ns, 这是由于 DLR 产品在 293 天发生了 0.05ns 左右的突跳, 使得整体 STD 偏大, 而 CAS 产品整体稳定性较好; 对于 YEL2 测站而言, 两种产品的 STD 基本相同, 且变化趋势也相同。上述分析表明, 2 个测站 P1-C1 码偏差值差异不大, 但是 CAS 给出的测站 P1-C1 码偏差值稳定性优于 DLR。

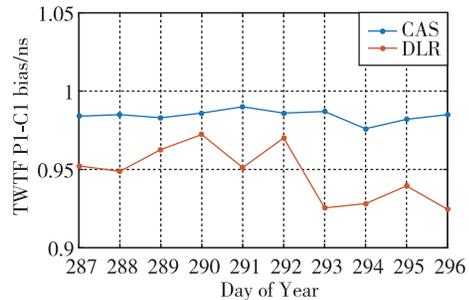


图5 2020年287~296日TWTF站P1-C1码偏差值

Fig. 5 P1-C1 code bias of TWTF stations on DOY 287~296 in 2020

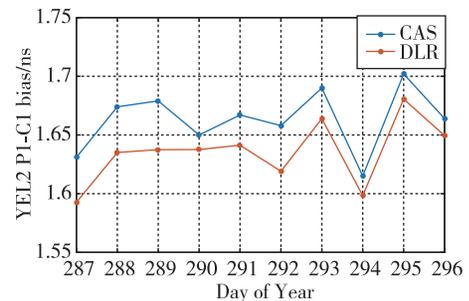


图6 2020年287~296日YEL2站P1-C1码偏差值

Fig. 6 P1-C1 code bias of YEL2 stations on DOY 287~296 in 2020

表 2 TWTF 和 YEL2 测站 P1-C1 码偏差稳定度统计
Tab. 2 Deviation stability statistics of P1-C1 code bias at stations TWTF and YEL2

测站名称	DCB 产品机构	MEAN/ns	STD/ns
TWTF	CAS	0.984	0.004
	DLR	0.947	0.018
YEL2	CAS	1.663	0.026
	DLR	1.636	0.027

3 DCB 产品对 PPP 授时精度影响的分析

全面分析了不同机构的 DCB 产品对 PPP 授时精度的影响,实验选取 2 个测站 10 天的数据,分别采用不同机构的 DCB 产品进行改正,将改正后的结果与 IGS 精密钟差文件中给出的测站钟差作差,分析 BIAS 和均方差(Root Mean Square,RMS)值。

3.1 数据准备及实验策略

实验选取了 1 个 MGEX 跟踪站 TWTF 和 1 个守时实验室测站 YEL2(由台湾中华电信研究所(TL)时间实验室运行维护),观测值采样率为 30s,时间段为 2020 年 287~296 日,共 10 天。2 个 GNSS 测站均外接高精度的氢原子钟,表 3 给出了测站的详细信息。

表 3 测站信息

Tab. 3 Station information

测站	接收机	天线	时频基准
TWTF	POLARX4TR	ASH701945C_M	H-MASER
YEL2	POLARX5TR	LEIAR25. R4	H-MASER

表 4 给出了具体解算策略,实验采用基于 RT-KLIB 二次开发的软件,选取 GPS 进行 PPP 时差解

表 4 PPP 授时处理策略

Tab. 4 PPP timing strategy

静态 PPP 处理项	处理策略
导航系统	GPS
PPP 处理模式	消电离层组合
卫星轨道、钟差	IGS 最终产品
高度截止角/(°)	7.5
观测值定权	高度角定权
接收机钟差估计	白噪声估计
滤波模式	Kalman 滤波
卫星和接收机天线改正	igs14. atx
相位缠绕改正	Wu 模型
对流层改正	Saastamonien+随机游走估计
DCB 改正	CAS,DLR,CODE 产品改正

算;精密产品采用 IGS 发布的精密轨道和钟差文件,截止高度角设置为 7.5°;接收机钟差采用白噪声估计;对流层干延迟采用 Saastamonien 模型改正,湿延迟采用随机游走估计;电离层采用消电离层组合改正。选取 IGS 精密产品中的钟差作为参考值,因其间隔为 5min,所以需将解算得到的钟差抽稀到 5min 后与参考值进行比对。

3.2 实验结果分析

根据第 2 节分析可知,DCB 产品的天稳性较好,由于 CODE 产品的处理策略是将日均值按月求平均,从而提供月均值产品,为了与 CODE 产品进行比较,将 CAS 和 DLR 产品中 GPS 卫星、TWTF 和 YEL2 测站 P1-C1 偏差值按天求平均。分别用三种 DCB 产品对 2 个测站进行改正,并将改正 DCB 后的结果与未改正 DCB 的结果进行比对,如图 7 和图 8 所示。图 8 中 YEL2 空缺部分是由于第 295 天中前 8h 观测值缺失导致。

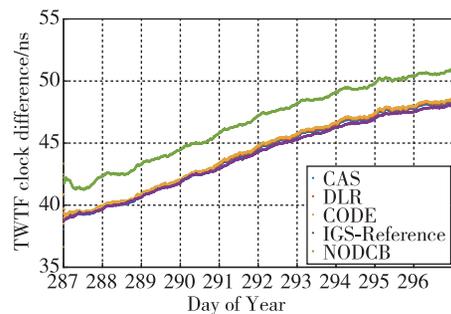


图 7 2020 年 287~296 日 TWTF 站钟差值

Fig. 7 Clock difference of TWTF stations on DOY 287~296 in 2020

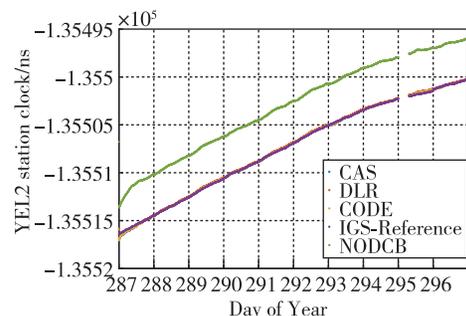


图 8 2020 年 287~296 日 YEL2 站钟差值

Fig. 8 Clock difference of YEL2 stations on DOY 287~296 in 2020

由图 7 和图 8 可知,未改正 DCB 的测站钟差与 IGS 的钟差存在一个系统性偏差,且这 2 个测站的系统偏差不同,而改正 DCB 后的钟差则与 IGS 的

钟差相差不大。图9和图10给出了经过DCB改正后的测站钟差与IGS参考钟差之差,表5给出了其BIAS和RMS值。

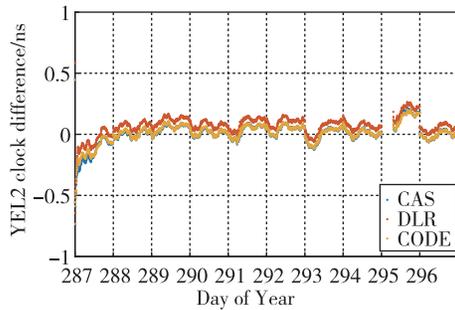


图9 YEL2站不同机构DCB改正钟差与IGS钟差结果之差

Fig. 9 The clock difference between the results of DCB correction and IGS in different institutions at YEL2 station

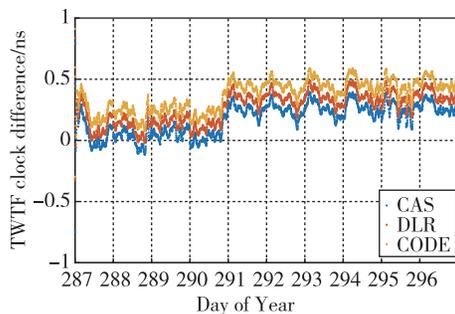


图10 TWTF站不同机构DCB改正钟差与IGS钟差结果之差

Fig. 10 The clock difference between the results of DCB correction and IGS in different institutions at TWTF station

表5 测站钟差与IGS钟差差值统计

Tab. 5 Statistics of differences between station clock and IGS clock

测站	评定指标/ns	CAS	DLR	CODE
YEL2	BIAS	0.056	0.089	0.058
	RMS	0.081	0.104	0.086
TWTF	BIAS	0.184	0.269	0.368
	RMS	0.217	0.298	0.389

由图9、图10和表5可知,对于YEL2测站来说,采用三家DCB产品改正后的钟差BIAS和RMS均较小,BIAS在0.1ns以内,RMS也在0.1ns左右,其中CAS的BIAS最小,为0.056ns,而DLR的BIAS最大,为0.089ns,对于RMS来说,同样也是CAS的最小,为0.081ns,DLR最大,为0.104ns;而对于TWTF测站而言,采用三家DCB产品改正后的钟差偏差值

的BIAS和RMS相对较大,BIAS和RMS均在0.4ns以内,其中CAS的BIAS最小,为0.184ns,而CODE的BIAS最大,为0.368ns,RMS同样是CAS的最小,为0.217ns,而CODE最大,为0.389ns。综上分析,CAS给出的P1-C1码偏差值在PPP授时中的精度整体优于CODE和DLR。

4 结论

本文分析了现有DCB产品中卫星和测站DCB的天稳性,并将DCB产品应用于PPP授时中,修正了PPP授时中的系统性偏差,并分析了不同机构DCB产品对授时精度的影响,得出的结论如下:

1)分析了CAS和DLR产品中卫星和测站P1-C1码偏差的天稳性,结果表明,两家机构的DCB产品P1-C1码偏差值整体差异不大,但CAS给出的P1-C1码偏差值的天稳性优于DLR;

2)将DCB产品应用于PPP授时中,修正了PPP授时中的系统性偏差,并分析了不同机构DCB产品对PPP授时的修正效果,结果表明,CAS产品的精度最高,且稳定性较好。

参考文献

- [1] Petit G, Jiang Z. Precise point positioning for TAI computation[C]// Proceedings of IEEE International Frequency Control Symposium. IEEE, 2007.
- [2] Petit G, Jiang Z. GPS all in view time transfer for TAI computation[J]. Metrologia, 2007, 45(1): 35.
- [3] Petit G. The TAIPPP pilot experiment[C]// Proceedings of IEEE International Frequency Control Symposium, 2009 Joint with the 22nd European Frequency and Time forum. IEEE, 2009.
- [4] Petit G, Defraigne P. The performance of GPS time and frequency transfer: comment on 'A detailed comparison of two continuous GPS carrier-phase time transfer techniques'[J]. Metrologia, 2016, 53(3): 1003-1008.
- [5] BIPM. CIRCULAR T 400[DB/OL]. [2021-05-11]. <ftp://ftp2.bipm.org/pub/tai/Circular-T/cirt/cirt.400>.
- [6] Petit G, Harmegnies A, Mercier F, et al. The time stability of PPP links for TAI[C]// Proceedings of IEEE International Frequency Control Symposium. IEEE, 2011.
- [7] Håkansson M, Jensen A, Horemuz M, et al. Review of code and phase biases in multi-GNSS positioning [J]. GPS Solutions, 2017, 21(3): 849-860.

- [8] Montenbruck O, Hauschild A. Code biases in multi-GNSS point positioning[C]// Proceedings of PION-ITM-2013. DLR, 2013.
- [9] Petit G, Jiang Z. GPS all in view time transfer for TAI computation[J]. *Metrologia*, 2007, 45(1): 35.
- [10] 张小红, 蔡诗响, 李星星, 等. 利用 GPS 精密单点定位进行时间传递精度分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2010, 35(3): 274-278.
Zhang Xiaohong, Cai Shixiang, Li Xingxing, et al. Accuracy analysis of time and frequency transfer based on precise point positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(3): 274-278(in Chinese).
- [11] 黄观文. GNSS 星载原子钟质量评价及精密钟差算法研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
Huang Guanwen. Research on algorithms of precise clock offset and quality evaluation of GNSS satellite clock[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012(in Chinese).
- [12] 葛玉龙. 多频多系统精密单点定位时间传递方法研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2020.
Ge Yulong. Research on methodology of multi-frequency and multi-GNSS precise point positioning time transfer[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences), 2020(in Chinese).
- [13] 李红涛. 基于 GPS 和 GLONASS 的单站授时和时差监测研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
Li Hongtao. Research on the single station time service and time offset based on the GPS and GLONASS data[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012(in Chinese).
- [14] 于合理, 郝金明, 田英国, 等. GNSS 单站授时系统性偏差分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2017, 37(1): 30-34.
Yu Heli, Hao Jinming, Tian Yingguo, et al. Analysis of systematic bias of single station time service[J]. *Journal of Geodesy & Geodynamics*, 2017, 37(1): 30-34(in Chinese).
- [15] Leick A, Rapoport L, Tatarnikov D. GPS satellite surveying(4th Edition)[M]. Wiley, 2015.
- [16] Boehm J, Niell A, Tregoning P, et al. Global Mapping Function (GMF): a new empirical mapping function based on numerical weather model data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(7): 025546.
- [17] 周锋. 多系统 GNSS 非差非组合精密单点定位相关理论和方法研究[J]. *测绘学报*, 2020, 49(7): 938.
Zhou Feng. Theory and methodology of multi-GNSS undifferenced and uncombined precise point positioning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(7): 938(in Chinese).
- [18] 张宝成. GNSS 非差非组合精密单点定位的理论方法与应用研究[J]. *测绘学报*, 2014, 43(10): 1099.
Zhang Baocheng. Study on the theoretical methodology and applications of precise point positioning using undifferenced and uncombined GNSS data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(10): 1099(in Chinese).
- [19] 王宁波. GNSS 差分码偏差处理方法及全球广播电离层模型研究[J]. *测绘学报*, 2017, 46(8): 1069.
Wang Ningbo. Study on GNSS differential code biases and global broadcast ionospheric models of GPS, Galileo and BDS[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(8): 1069(in Chinese).
- [20] Schaer S. Biases relevant to GPS and GLONASS data processing[J]. *IGS Workshop*, 2014.
- [21] Hauschild A, Steigenberger P, Montenbruck O. Differential code bias estimation using multi-GNSS observations and global ionosphere maps[J]. *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, 2014, 61(3): 191-201.
- [22] Wang N, Yuan Y, Li Z, et al. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(3): 209-228.
- [23] 周东旭, 袁运斌, 李子申, 等. GPS 接收机仪器偏差的长期变化特性分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(5): 114-118.
Zhou Dongxu, Yuan Yunbin, Li Zishen, et al. Analysis of long-term variations of GPS receivers' differential code bias[J]. *Journal of Geodesy & Geodynamics*, 2011, 31(5): 114-118(in Chinese).

(编辑: 孟彬)