

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905012

北斗卫星天线相位中心改正在 PPP 中的应用研究*

张继海^{1,2,3}, 董绍武^{1,2,3,4}, 卢 鋈⁵, 袁海波^{1,2,3}, 广 伟^{1,2}

(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基准重点实验室 西安 710600;
3. 中国科学院大学 北京 100049; 4. 中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049;
5. 北京跟踪与通信技术研究所 北京 100046)

摘要:基于我国时间基准 UTC (NTSC) 系统,开展北斗天线相位中心 (APC) 改正在精密单点定位 (PPP) 以及高精度时间比对中的应用研究。通过接收机实测的北斗数据以及国际 GNSS 服务 (IGS) 中心提供的北斗精密钟差产品、轨道产品和 IGS 发布的多系统 APC 改正文件,进行北斗精密单点定位数据处理。结果表明,APC 改正前后的精密单点定位 X、Y、Z 3 个方向上的误差均方根分别为 0.011 0、0.021 2、0.009 5 m 以及 0.002 6、0.007 1、0.003 7 m,可以看出修正后的定位精度具有明显的提高。同样在零基线共钟时间比对以及远距离时间比对方面,两接收机同源零基线比对结果的标准偏差由未进行 APC 修正前的 0.148 2 ns 降到修正后的 0.093 0 ns; 远距离高精度时间比对结果的标准偏差从修正前的 0.302 9 ns 降低到修正后的 0.266 8 ns,时间比对的短期稳定度也有所提高。因此,随着北斗系统的建设以及国际 GNSS 服务分析中心的相关北斗精密产品的不断完善,北斗的服务精度将越来越高。

关键词:北斗卫星导航系统; 天线相位中心改正; 精密单点定位; 高精度时间比对

中图分类号: TH714 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 160.75

Study on the application of BeiDou satellite antenna phase center correction in PPP

Zhang Jihai^{1, 2, 3}, Dong Shaowu^{1, 2, 3, 4}, Lu Jun⁵, Yuan Haibo^{1, 2, 3}, Guang Wei^{1, 2}

(1. National Time Service Center, CAS, Xi'an 710600, China; 2. Key Laboratory of Time & Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. School of Astronomy and Space Science, UCAS, Beijing 100049, China; 5. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100046, China)

Abstract: In this paper, based on the China's national time reference system of UTC (NTSC), the application study of BeiDou antenna phase center (APC) correction in precise point positioning (PPP) and high precision time comparison is carried out. Based on the data collected through BeiDou receiver, and the BeiDou precision products of clock, orbit and APC correction file downloaded from International GNSS Service (IGS) analysis center, the data processing of the BeiDou PPP is performed. The results show that the RMS of the PPP errors in X, Y and Z directions are about 0.011 0, 0.021 2 and 0.009 5 m before APC correction, and about 0.002 6, 0.007 1 and 0.003 7 m after antenna phase center correction, respectively. It can be seen that the positioning precision is improved obviously after APC correction. When the APC corrections are applied to the two receivers for the zero baseline common clock difference comparison, the standard deviation of the comparison results is decreased from 0.148 2 ns before correction to 0.093 0 ns after correction. For the long distance precision time comparison, the standard deviation of the comparison results is decreased from 0.302 9 ns before correction to 0.266 8 ns after correction. Therefore, with the construction of the BeiDou system and the continuous improvement of related BeiDou precision products from international GNSS service (IGS) analysis center, the service precision of BeiDou will be

收稿日期: 2019-04-18 Received Date: 2019-04-18

* 基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFF0200200)、中国科学院国家授时中心“青年创新人才”(NTSC 青创 201804)、国家自然科学基金 (11703030) 资助项目

better and better.

Keywords: BeiDou Navigation Satellite System (BDS); satellite antenna phase center correction; precise point positioning; high precision time comparison

0 引言

卫星发射天线相位偏差是GNSS高精度导航定位与授时服务中必须要考虑的误差源。GNSS接收机的测量是从卫星发射天线相位中心(antenna phase center, APC)至接收机间的距离,而国际GNSS服务(international GNSS service, IGS)分析中心发布的精密星历是参考到卫星质心(mass centre, MC)的坐标,这与相位中心并不重合,因而在高精度数据处理解算时需要进行卫星APC改正。同时,在基于接收机输出的伪距与载波相位测量值,利用相关算法可以获得的定位,测速以及授时(positioning, velocity and timing, PVT)等信息,为全球各类不同精度要求的用户提供相关的PVT服务。目前,在全球四大卫星导航系统中,由于美国的全球定位系统(global positioning system, GPS)建设较早,且具有遍布全球的上百个跟踪站的监测数据,同时IGS提供了GPS高精度数据处理所需的相关产品,也进一步提升了GPS的PVT性能,因此GPS已成为广大各类用户首选的卫星导航系统。现阶段,随着我国自主建设、独立运行的北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system, BDS)的不断完善和推广应用,北斗系统将发展成为全球用户提供全天候、全覆盖、高精度的定位、导航和授时服务的全球卫星导航系统。预计到2020年,我国将建成覆盖全球的北斗全球卫星导航系统。届时,其系统由3颗地球同步轨道(geosynchronous earth orbit, GEO)卫星,24颗中地球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星以及3颗倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous satellite orbit, IGSO)卫星组成,可实现为全球任何地方的用户提供实时的高精度PVT服务^[1-2]。

现阶段随着北斗二号以及三号全球系统的建设,国际IGS分析中心也开始公布目前在轨的北斗卫星精密轨道、钟差以及APC改正等相关的精密产品,这些都为北斗的高精度数据处理与分析提供了可靠的数据支撑,为国内外从事北斗相关研究的机构提供了便利,研究成果能够促进北斗的发展与应用。目前,随着北斗全球系统的完善,在2017年法国巴黎举办的第21届国际时间频率咨询委员会(consultative committee for time and frequency, CCTF)上,国际计量局(bureau international des poids et mesures, BIPM)及各国的时频专家学者也建议尽快将基于北斗系统的高精度时间比对纳入国际原子时的常规计算中,并与其他导航系统形成冗余备份^[3]。因

此,依托我国标准时间UTC(NTSC)系统平台,基于目前IGS发布的多颗北斗卫星的精密轨道、钟差产品以及APC改正文件,开展北斗卫星APC改正在北斗PPP中的影响分析研究具有重要应用前景,可进一步促进北斗服务性能的提高,提升我国北斗导航系统在国际导航应用中的影响力。

本文基于我国时间基准UTC(NTSC)系统平台,利用时间基准系统中的时间传递型接收机输出的北斗观测数据,开展北斗卫星APC改正在高精度PPP数据处理中的研究。通过接收北斗B1, B2频点的伪距和载波相位观测值,分别对北斗卫星天线相位心改正前后解算的本地精密坐标、零基线共钟比对以及远距离时间比对的结果进行了对比与分析。

1 北斗卫星APC修正方法

GNSS卫星在地心地固坐标系(earth-centered, earth-fixed, ECEF)下的轨道计算中,由于卫星广播星历计算得到的卫星位置为其天线相位中心(antenna phase center, APC)的位置。因此,使用卫星广播星历在进行导航,测速与授时服务时,不需要进行相关的相位中心修正。然而,在基于精密单点定位的数据处理中,使用IGS分析中心发布的精密轨道和钟差产品是参考到卫星天线的MC,因此在GNSS高精度数据处理中需要考虑卫星相位中心的偏移量。目前,由于北斗卫星采用了3种不同星座轨道设计方案,因而北斗卫星在轨工作中采用了不同的姿态控制方式,GEO卫星采用了零偏航模式,即卫星指向地心为Z轴,Y轴正交于卫星轨道,X轴正交于YOZ平面;IGSO/MEO卫星采用动偏航模式,即Z轴指向地心,Y轴正交于太阳-地球-卫星平面,X轴正交于YOZ平面^[4-5]。因此,在数据处理时应针对每一类型卫星建立卫星APC的修正模型。

设 \hat{k} 是从卫星MC指向地心的单位向量,可以表示为:

$$\hat{k} = - \frac{r^{\text{sat}_{\text{uc}}}}{\|r^{\text{sat}_{\text{uc}}}\|} \quad (1)$$

式中: $r^{\text{sat}_{\text{uc}}}$ 为ECEF下卫星位置向量。

设 \hat{j} 为 \hat{k} 与从卫星到太阳的单位向量的叉乘向量,即:

$$\hat{j} = \hat{k} \times \hat{e} \quad (2)$$

其中,对于北斗系统中的IGSO/MEO卫星的参考坐标模型为:

$$\hat{e} = \frac{r_{\text{sun}} - r^{\text{sat}_{\text{wc}}}}{\|r_{\text{sun}} - r^{\text{sat}_{\text{wc}}}\|}, r_{\text{sun}} \text{ 为 ECEF 下太阳的位置向量。}$$

对于北斗系统中的 GEO 卫星的参考坐标模型:

$$\hat{e} = \frac{v}{\|v\|}, v \text{ 为卫星在 ECEF 下的速度向量。}$$

设 \hat{i} 满足右手坐标系, 即 $\hat{i} = \hat{j} \times \hat{k}$ 。

设 Δ_{APC} 为 IGS 分析中心发布的卫星在星固坐标系下的 APC 偏差值, 卫星 APC 在 ECEF 中的坐标 $r^{\text{sat}_{\text{wc}}}$ 可描述为:

$$r^{\text{sat}_{\text{wc}}} = r^{\text{sat}_{\text{wc}}} + \mathbf{R} \cdot \Delta_{\text{APC}} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{R} = [\hat{i} \hat{j} \hat{k}]$ 为卫星星固坐标系到 ECEF 的转换矩阵。

由于卫星发射的频点不同, 本文基于 IGS 分析中心发布的北斗不同频点的相位中心改正值, 利用式(4)双频无电离层组合模型对 APC 偏差做整体修正:

$$\Delta_{\text{APC}_{\text{ic}}} = \frac{f_1^2 \Delta_{\text{APC}_{\text{ic}_1}} - f_2^2 \Delta_{\text{APC}_{\text{ic}_2}}}{f_1^2 - f_2^2} \quad (4)$$

式中: $\Delta_{\text{APC}_{\text{ic}}}$ 为双频无电离层组合 APC 改正值, $\Delta_{\text{APC}_{\text{ic}_1}}$ 和 $\Delta_{\text{APC}_{\text{ic}_2}}$ 分别为矩阵 \mathbf{R} 乘以 B1 以及 B2 频点的 APC 的改正值。

对于 \hat{i}, \hat{j} 以及 \hat{k} 的描述如图 1 所示^[6-7]。

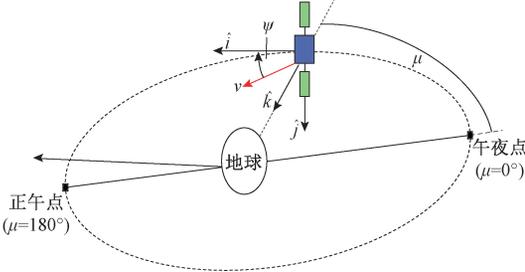


图 1 卫星运行姿态

Fig.1 The satellite operation attitude

图 1 中, 分别描述了卫星在正午和午夜时轨道角 μ 的变化和位置, 以及太阳入射角 β 和偏航角 ψ 。则偏航角 ψ 可以表示为:

$$\psi = \arctan\left(\frac{-\tan\beta}{\sin\mu}\right) \quad (5)$$

2 北斗载波相位精密单点定位方法

在精密单点定位中, 接收机输出的本地北斗非差伪距与相位观测模型方程可以表述为^[8-9]:

$$\begin{cases} \rho_i = P + cdt_r - cdT_s + d_{\text{trop}} + d_{\text{ion}/\rho_i} + d_{\text{mult}/\rho_i} + \varepsilon_{\rho_i} \\ L_i = P + cdt_r - cdT_s + d_{\text{trop}} - d_{\text{ion}/\rho_i} + d_{\text{mult}/\rho_i} + \lambda_i N_i + \varepsilon_{\rho_i} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ρ_i 以及 L_i 分别为单频点上的伪距与载波相位观测值; P 为站星距离; cdt_r 为接收机钟差改正项; cdT_s 为卫星钟差改正项; d_{trop} 为对流层延迟; d_{ion/ρ_i} 为同载波信号上所引起的电离层延迟; d_{mult/ρ_i} 为不同载波信号上所引起的多路径延迟; $\lambda_i N_i$ 为相位整周模糊度; ε_{ρ_i} 为伪距观测值引入的测量噪声; ε_{ρ_i} : 相位观测值引入的测量噪声。

通常, 采用双频无电离层模型来减小电离层延迟带来的影响, 可以描述为以下观测方程:

$$\begin{cases} \rho_{r,\text{IF}} = \frac{f_1^2 \rho_1 - f_2^2 \rho_2}{f_1^2 - f_2^2} \\ L_{r,\text{IF}} = \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\rho_{r,\text{IF}}$ 为无电离层伪距组合; $L_{r,\text{IF}}$ 为无电离层相位组合。

精密单点定位算法中, 精密轨道、钟差以及相关的产品能够从 IGS 获得。由于北斗精密单点定位中的观测方程式是线性的, 而基于卡尔曼滤波要求系统的状态方程和观测方程都是线性的, 故需要对方程进行线性化处理。因此, 将式(6)通过泰勒级数展开到一阶来实现线性化, 进而得到残差方程为^[10]:

$$\begin{bmatrix} v_\rho \\ v_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x^s - x_r}{P_0} & \frac{y^s - y_r}{P_0} & \frac{z^s - z_r}{P_0} & c & Trop_{\text{wet}} & 0 \\ \frac{x^s - x_r}{P_0} & \frac{y^s - y_r}{P_0} & \frac{z^s - z_r}{P_0} & c & Trop_{\text{wet}} & \lambda \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ dt_r \\ d_{\text{trop}} \\ N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \rho - \rho^0 \\ L - L^0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: v_ρ 和 v_L 分别为伪距以及载波相位无电离层组合的残差; (x^s, y^s, z^s) 为卫星坐标; (x_r, y_r, z_r) 为测站的近似坐标; P_0 为测站到卫星的近似距离; $Trop_{\text{wet}}$ 为对流层湿分量映射函数; ρ^0 和 L^0 分别为误差修正后的伪距以及载波相位无电离层组合值。

因此, 利用精密单点定位技术可以估计出本地接收机天线坐标 (x, y, z) , 接收机钟差 (dt_r), 天顶对流层延迟 (d_{trop}) 以及整周模糊度 (N), 即^[10-11]:

$$\mathbf{X} = (x, y, z, dt_r, d_{\text{trop}}, N) \quad (9)$$

表 1 为北斗 PPP 观测模型及数据处理模型方法。

基于 IGS 发布的 igs14_2045.atx 文件, 利用文件中给出的北斗卫星在星固系下相位中心相对于 MC 的修正值, 结合本文第 1 节北斗卫星 APC 模型改正算法, 分别对北斗 GEO 以及 MEO、IGSO 不同类型的卫星进行 APC 改正, 改正后的结果分析如第 3 节所示。

表 1 数据处理模型

Table 1 The data processing model

内容	修正模型
观测数据	伪距及相位观测文件
采样间隔	30 s
信号选择	北斗 B1、B2 频点
卫星轨道	GFZ 发布的轨道产品 ^[12]
卫星钟差	GFZ 发布的钟差产品
卫星相位中心	igs14_2045.atx 原始文件
电离层时延	双频无电离层组合
对流层时延	Saastamoinen+随机游走模型 ^[13-14]
截止高度角	10°
接收机钟差模型	白噪声
接收机位置模型	静态
相对论效应	模型修正
潮汐修正	模型修正 ^[15]
结果计算	扩展卡尔曼滤波估计 ^[16-17]

3 测试及分析评估

基于我国时频基准 UTC (NTSC) 系统开展北斗卫星天线相位中心改正在精密单点定位中的应用研究。北斗时间传递型接收机外接国家授时中心标准时间 1 PPS 信号和 10 MHz 频率信号,并置于国家授时中心守时钟房,钟房环境适宜,温度以及湿度常年控制在一定的范围内。同时,利用德国波茨坦地学研究中心 (geo forschungszentrum potsdam, GFZ) 发布的北斗精密轨道和钟差产品,开展相关的应用研究,利用文中第 1、2 节所介绍的基本算法和原理,开发了北斗 PPP 数据处理软件,并在此软件基础上分别通过在精密单点定位、零基线比对以及高精度时间比对 3 个方面来比较北斗卫星 APC 修正前后对 PPP 解算的精度。

3.1 北斗精密单点定位

利用 2019 年 3 月 2 日国家授时中心观测到的采样间隔为 30 s 的北斗 B1、B2 频点的伪距以及载波相位观测数据。分别经过卫星 APC 修正和未修正进行北斗载波相位精密单点定位,其 X、Y、Z 3 个方向的定位结果如图 2~4 所示。

从图 2~4 可以看出,经过北斗卫星 APC 改正后,X、Y、Z 3 个方向上的坐标的波动较小,其波动幅度保持在±2 cm 以内。相对于 APC 未修正前的 X、Y 以及 Z 具有明显的改善。表 2 所示为修正前后定位误差的均方根值 (RMS)。

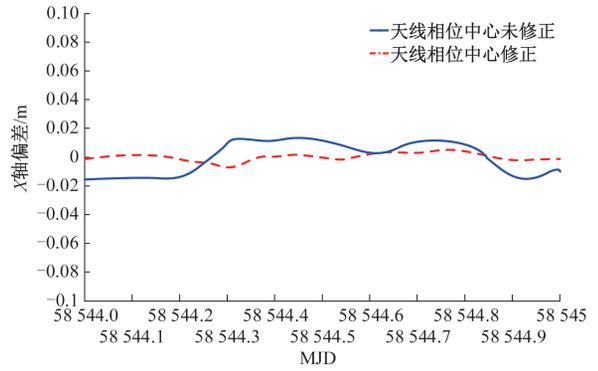


图 2 北斗精密单点定位 X 轴误差

Fig.2 The X axial error of BeiDou PPP

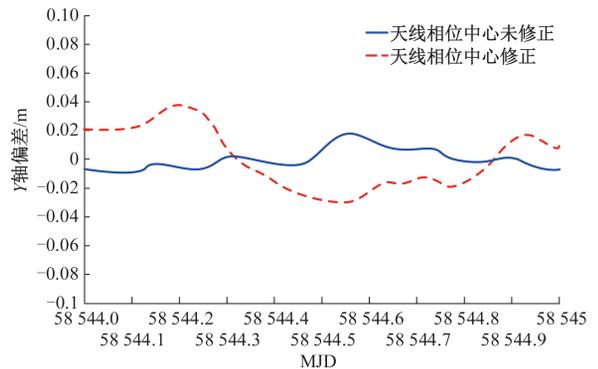


图 3 北斗精密单点定位 Y 轴误差

Fig.3 The Y axial error of BeiDou PPP

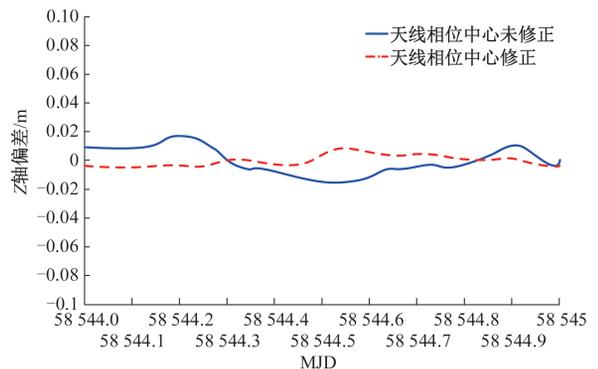


图 4 北斗精密单点定位 Z 轴误差

Fig.4 The Z axial error of BeiDou PPP

表 2 PPP 定位误差 RMS 值

Table 2 The RMS of PPP positioning error

	X/m	Y/m	Z/m
APC 未修正	0.011 0	0.021 2	0.009 5
APC 修正	0.002 6	0.007 1	0.003 7

利用以上分析可以看出,经过卫星天线相位修正后在 X、Y 以及 Z 3 个方向上的定位误差提高分别为 76.36%、66.51%、61.05%。

3.2 北斗零基线时间比对

在基于导航卫星的高精度时间比对中,远距离高精度时间比对首先需要完成接收机进行零基线同源校准工作。零基线同源共钟比对能够消除原子钟对比结果的影响,进而能够直接反应出时间比对的性能。本文利用 UTC(NTSC)时间基准系统中的两台同源不同天线的北斗接收机,开展零基线共钟钟差比对^[18-20](common clock difference, CCD)实验研究,比对结果如图 5 所示。

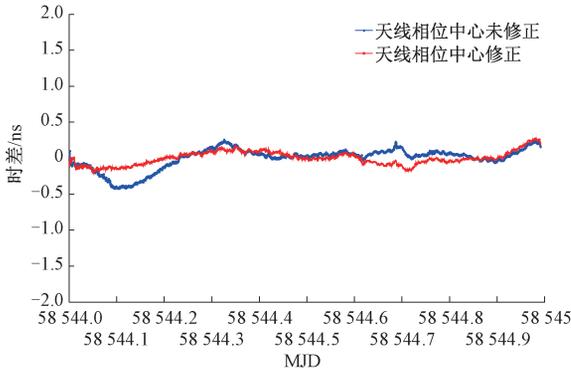


图 5 北斗 PPP 零基线时间比对

Fig.5 The zero baseline CCD comparison of BeiDou PPP

图 5 为 2019 年 3 月 2 日利用国家授时中心的两台 POLARX4TR PRO 接收机输出 30 s 采样间隔的北斗观测数据 PPP 零基线 CCD 比对的结果。可以看出北斗 PPP 零基线 CCD 结果基本保持在 ±0.5 ns 以内,且经过 APC 修正后的值波动较小,其修正前后的标准偏差(STDEV)分别为 0.1482 和 0.0930 ns。

3.3 北斗精密时间比对

基于载波的高精度相位时间比对方法是目前国际上进行远距离两地时间比对的常用方法之一。目前,随着北斗系统的建设,基于北斗的载波相位时间传递与比对技术应用也越来越广。图 6 所示为北斗载波相位时间比对原理方法。

根据图 6 所示,北斗载波相位时间比对方法可描述为:设 A 地的参考时间频率信号为 RefT1, B 地参考时间频率为 RefT2,统一的参考时间为 IGST。

$$\Delta t_A = RefT1 - IGST \quad (10)$$

$$\Delta t_B = RefT2 - IGST \quad (11)$$

式(10)减式(11)即可得到两地的时间偏差:

$$\Delta t_A - \Delta t_B = RefT1 - IGST - RefT2 + IGST = \Delta t_{AB} \quad (12)$$

本文利用 2019 年 3 月 2 日的国家授时中心(NTSC)以

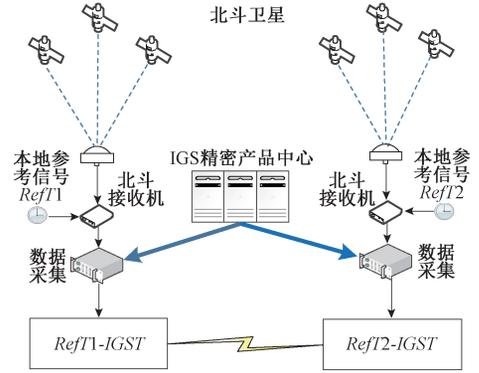


图 6 北斗载波相位时间比对原理

Fig.6 The principle of BeiDou carrier phase time comparison

及台湾中华电信(TL)两个守时实验室的北斗接收机输出采样间隔为 30 s 的 B1、B2 频点的伪距以及载波相位观测数据,开展基于北斗的高精度时间比对。分别经过北斗卫星 APC 修正以及未修正,来对比两地时间比对的结果。

表 3 所示为两守时实验室所用的时间传递型接收机的类型及天线类型。

表 3 实验室所用的接收机

Table 3 The receivers used in the laboratory

实验室	接收机编号	接收机类型	天线类型
NTSC	NTP3	POLARX4TR PRO	SEPCHOKE_MC
TL	TLT4	POLARX4TR PRO	ASH701945C_M

图 7 所示为利用北斗/GPS PPP 获得 UTC(NTSC)与 UTC(TL)两守时实验室时间比对结果。通过图 7 可以看出经过北斗卫星 APC 修正后的钟差值相对于未经过修正的钟差值波动较小,北斗天线修正前后两守时实验室的时间比对结果的 STDEV 分别为 0.3029 和 0.2668 ns。同时,利用北斗链路 with GPS 链路获得的两守时实验室的钟差结果具有相同的趋势。

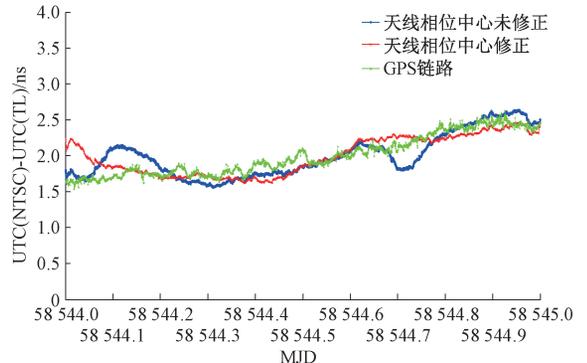


图 7 北斗/GPS PPP 获得的两地钟差值

Fig.7 The clock time difference of UTC(NTSC)-UTC(TL) obtained from BeiDou/GPS PPP

图 8 所示为分别为北斗 APC 修正前后,利用北斗 PPP 获得的 UTC(NTSC)与 UTC(TL)钟差比对的频率稳定度。

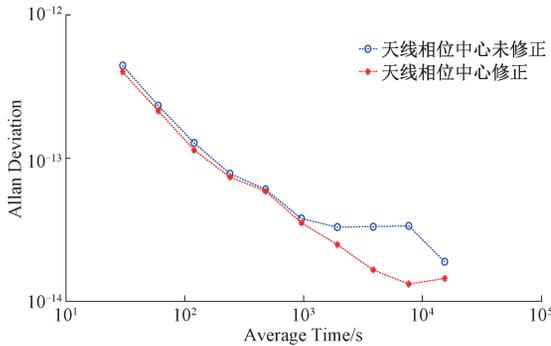


图 8 北斗 PPP 获得的 UTC(NTSC)-UTC(TL)的频率稳定度
Fig.8 The frequency stability of UTC(NTSC)-UTC(TL) obtained from BeiDou PPP

如表 4 所示,从数值上显示了利用卫星 APC 修正前后计算得到的 UTC(NTSC)-UTC(TL)频率稳定度。

表 4 UTC(NTSC)-UTC(TL)频率稳定度

Table 4 The frequency stability of UTC(NTSC)-UTC(TL)

Tau/s	未修正	修正
30	4.44E-13	3.99E-13
60	2.32E-13	2.14E-13
120	1.28E-13	1.13E-13
240	7.81E-14	7.38E-14
480	6.05E-14	5.87E-14
960	3.77E-14	3.54E-14
1 920	3.28E-14	2.48E-14
3 840	3.33E-14	1.66E-14
7 680	3.35E-14	1.32E-14
15 360	1.89E-14	1.45E-14

从图 8 以及表 4 可以看出,经过卫星 APC 修正后两守时实验室时间比对钟差的稳定度优于未修正的结果。因此,基于北斗 PPP 的高精度时间比对方法中,利用 APC 修正可以改善两地时间比对的不确定度以及稳定度。

4 结 论

本文基于国家时间基准 UTC(NTSC)系统,利用多模多频 GNSS 时间传递型接收机捕获跟踪的北斗卫星。通过接收机的实测数据,并利用 PPP 数据处理算法,分析、对比了北斗卫星发射天线的相位中心修正前后的实验结果。

在北斗 PPP 精密单点定位处理中,经过 APC 改正后的单点定位误差波动较小,X、Y 以及 Z 偏差的 RMS 具有较明显提高,均在未进行 APC 改正的结果上提高 50% 以上;在北斗 PPP 零基线校准以及高精度时间比对实验中,经过 APC 修正后的结果也优于未修正的结果。

研究表明对北斗 APC 的修正在进行高精度定位以及时间比对方面具有明显的改善。目前,随着北斗三号全球系统的建设以及北斗 APC 改正的不断完善,这也将进一步推动北斗系统在高精度定位以及高精度时间比对中的应用。

参考文献

[1] HAN CH H, YANG Y X, CAI ZH W. BeiDou navigation satellite system and its time scales [J]. Metrologia, 2011, 48(4) : 213-S218.

[2] ZHANG X H, WU M K, LIU W K et al. Initial assessment of the COMPASS/BeiDou-3: new-generation navigation signals [J], Journal of Geodesy, 2017, 91(10) : 1225-1240.

[3] 张继海, 武文俊, 广伟, 等. 基于北斗共视的国际时间比对研究 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6) : 96-103. ZHANG J H, WU W J, GUANG W, et al. Study of international common view time comparison by BeiDou [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39 (6) : 96-103.

[4] 常志巧, 胡小工, 郭睿, 等. 北斗导航卫星相位中心修正 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(6) : 860-866. CHANG ZH Q, HU X G, GUO R, et al. Antenna phase center correction for BeiDou navigation satellite [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43 (6) : 860-866.

[5] ZHOU SH SH, HU X G, ZHOU J H, et al. Accuracy analyses of precise orbit determination and timing for COMPASS/BeiDou- 2 4GEO/5IGSO/4MEO Constellation [C]. Proceeding of CSNC, Wuhan, China, 2013: 89-102.

[6] 叶世榕, 夏凤雨, 赵乐文, 等. 偏航姿态对北斗精密单点定位的影响分析 [J]. 测绘学报, 2017, 46(8) : 971-977. YE SH R, XIA F Y, ZHAO L W, et al. Impact analysis of yaw attitude on BDS precise point positioning [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(8) : 971-977.

[7] 毛悦, 宋小勇, 王维, 等. 北斗 IGSO/MEO 卫星姿态控制及光压差异分析 [J]. 测绘科学, 2015, 40(8) : 129-134. MAO Y, SONG X Y, WANG W, et al. BeiDou IGSO and MEO navigation satellites' yaw-steering and orbit-normal

- attitude control modes and solar radiation pressure difference analysis [J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(8):129-134.
- [8] PETET G, KANJ A, LOYER S, et al. 1x10-16 frequency transfer by GPS PPP with integer ambiguity resolution [J]. Metrologia, 2015, 52(2): 301-309.
- [9] GUANG W, DONG SH W, WU W J, et al. Progress of BeiDou time transfer at NTSC [J]. Metrologia, 2018, 55(2): 175-187.
- [10] ZHANG P F, TU R, GAO Y P, et al. Study of time link calibration based on GPS carrier phase observation [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 12(11), 1330-1335.
- [11] GUANG W, YUAN H B, DONG SH W, et al. The evaluation of BeiDou time transfer performance [C]. 2016 IEEE International Frequency Control Symposium, 2016: 1-4.
- [12] 胡艳阳, 徐爱功, 徐宗秋, 等. BDS 非差非组合精密单点定位研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(3): 53-57.
HU Y Y, XU AI G, XU Z Q, et al. Research on BDS precise point positioning with un-differential and un-combined observations [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2019, 42(3): 53-57.
- [13] 沈宁, 岳彩亚. BDS 地球静止轨道卫星信号的对流层延迟分析[J]. 全球定位系统, 2016, 41(6):25-29.
SHEN N, YUE C Y. Analysis and exploration of tropospheric delay of BDS geostationary orbit satellite [J]. GNSS World of China, 2016, 41(6): 25-29.
- [14] 闫志闯, 楼楠, 李靖. 对流层参数估计测率对 PPP 精度影响分析[J]. 测绘工程, 2019, 28(1):5-13.
YAN ZH CH, LOU N, LI J. Influence of tropospheric delay parameters' estimation strategy on the precision of PPP [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2019, 28(1): 5-13.
- [15] 赵红, 郭春喜, 程传录, 等. 利用改进的动态 PPP 技术建立中国香港区域海潮负荷位移模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(3): 354-363.
ZHAO H, GUO CH X, CHENG CH L, et al. Estimation of displacements caused by ocean tide loading using improved GPS kinematic precise point positioning technique: A case study in Hong Kong, China [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(3): 354-363.
- [16] 刘春, 马颖. 改进卡尔曼滤波在北斗伪距定位中的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(5): 779-785.
LIU CH, MA Y. Research on improved Kalman filter in Beidou pseudo ranges positioning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(5): 779-785.
- [17] 薛明喜, 杨扬, 张晨睿, 等. 基于自适应 Kalman 滤波的 SAW 测温数据纠错方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12):2766-2773.
XUE M X, YANG Y, ZHANG CH X, et al. Error correction method for SAW temperature measurement data based on adaptive Kalman filter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2016, 37(12):2766-2773.
- [18] 连远锋, 赵刻, 吴发林. 北斗二代卫星导航系统全球可用性分析[J]. 电子测量技术, 2010, 33(2): 15-18.
LIAN Y F, ZHAO Y, WU F L. Analysis of global availability for beidou 2nd generation navigation system[J]. Electronic Measurement Technology, 2010, 33(2):15-18.
- [19] 朱伟, 韩晓东. 矢量网络分析仪中的电子校准技术[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(8): 20-22.
ZHU W, HAN X D. The electronic calibration technologies for vector network analyzer [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2010, 29(8):20-22.
- [20] 陈瑞琼, 刘娅, 李孝辉. 基于卫星共视的远程时间频率校准系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(1): 38-44.
CHEN R Q, LIU Y, LI X H. Remote time frequency calibration system based on satellite common-view [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(1): 38-44.

作者简介



张继海, 2014 年于中国科学院国家授时中心获得硕士学位, 现为中国科学院国家授时中心助理研究员, 在读博士生, 主要研究方向为高精度时间传递与 GNSS 时差监测。
E-mail: zhangntsc@126.com

Zhang Jihai received his M. Sc. degree in 2014 from National Time Service Center, CAS; now, he is a research assistant and Ph. D. candidate in National Time Service Center, CAS. His main research interest includes high precision time transfer and GNSS time difference monitoring.



董绍武 (通信作者), 2007 年于中国科学院国家授时中心获得博士学位, 现为中国科学院国家授时中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为标准时间的产生与保持 (守时) 技术、GNSS 时间系统等。
E-mail: sdong@ntsc.ac.cn

Dong Shaowu (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2007 from National Time Service Center, CAS; now, he is a research fellow and Ph. D. supervisor in National Time Service Center, CAS. His main research interest includes generation and maintenance of standard time (timekeeping) techniques, GNSS time system, and etc.