

# 基于北斗的时间传递方法及其精度分析\*

张鹏飞<sup>1,2</sup>, 涂锐<sup>1,2</sup>, 高玉平<sup>1</sup>, 广伟<sup>1,2</sup>, 蔡宏兵<sup>1</sup>

(1. 中国科学院国家授时中心 西安 710600; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:**GNSS 时间传递技术是卫星导航技术在时间频率领域的重要应用,也是时间传递的主要技术手段之一。随着我国北斗卫星导航系统的不断建设,北斗系统在时间频率领域应用的研究也逐步深入。主要基于北斗卫星导航系统特有的 IGSO、MEO、GEO 卫星星座,开展了基于北斗共视和载波相位时间传递算法研究,研制了北斗时间传递软件包(PPTSlo),并对其时间传递链路精度、稳定度进行了定性、定量分析,实验结果表明北斗共视时间传递精度优于 6 ns,北斗载波相位时间传递精度能达到亚纳秒-纳秒精度。

**关键词:**北斗卫星;时间传递;共视;载波相位

**中图分类号:** TH76 TP873 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Beidou time transfer method and its accuracy analysis

Zhang Pengfei<sup>1,2</sup>, Tu Rui<sup>1,2</sup>, Gao Yuping<sup>1</sup>, Guang Wei<sup>1,2</sup>, Cai Hongbing<sup>1</sup>

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** GNSS time transfer technology is an important application of satellite navigation technology in time and frequency domain, and is also one of the main means of time transfer. With the continuous development of China's Beidou satellite navigation system, the applications in the fields of time and frequency based on Beidou also gradually increase. In his work, time transfer algorithm is focused and software package (PPTSlo) is developed using Beidou common view and carrier phase technology, based on specific IGSO, MEO, GEO satellite constellation in Beidou satellite navigation system. The time transfer link accuracy and stability is analyzed by qualitative and quantitative analysis. Experimental results show that Beidou common view time transfer accuracy is better than 6ns, Beidou carrier phase time transfer accuracy can reach sub-nanosecond to nanosecond.

**Keywords:** Beidou satellite; time transfer; common view; carrier phase

## 0 引言

自 1980 年 Allan 和 Weiss 首次将 GPS 应用于远程时间传递以来,国内外学者针对 GPS 时间传递方法进行了广泛研究。基于 GPS 伪距观测值的共视法时间传递以其计算高效率、易于实现被全球 70 多个时间实验室采用,也是应用最广泛的高精度时间传递技术之一<sup>[1]</sup>。为了进一步提高其时间传递精度,高精度的载波相位观测值逐渐被关注。2007 年 Petit G 等人<sup>[2]</sup>将 GPS 精密单点定位(precise point position, PPP)技术应用于时间传递,

并在 TAI 的计算中取得了较好的效果。Delporte J 等人<sup>[3]</sup>利用固定模糊度的 PPP 技术进行 GPS 载波相位时间传递,并与卫星双向时间传递(two-way satellite time and frequency transfer, TWSTFT)技术结果相比较,获得亚纳秒级时间传递精度。国内方面,2009 年,杨志强等人<sup>[4]</sup>通过实验对北斗一号时间传递能力的进行了研究,获得 6.5 ns 的定时稳定度。孙宏伟等人<sup>[5]</sup>分析了卫星位置误差对 GPS 共视时间比对的影响,认为两个共视站仰角不同时,对于小于 2 500 km 的基线,两个仰角之差越小,这种影响就越小。2010 年张小红等人<sup>[6]</sup>利用单站 GPS 载波平滑伪距的 PPP 方法对单站授时进行测试,获

收稿日期:2017-02 Received Date: 2017-02

\* 基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0501804)、国家自然科学基金(41504006, 41674034)、中国科学院百人计划和前沿科技重点研发计划(QYZDB-SSW-DQC028)、中国科学院“西部之光”联合学者(Y507YR1203)项目资助

得纳米级的单站授时精度,并利用载波相位和伪距观测值组合的 PPP 方法获得了 0.1 ~ 0.2 ns 的单站授时精度。2012 年黄观文<sup>[7]</sup>利用贝叶斯估计对时间传递中的“天跳变”进行了有效处理,取得了连续平滑的时间传递。2013 年袁媛等人<sup>[8]</sup>进行了非差单站 PPP 时间传递软件的实现,获得了较好的时间传递精度。2016 年于合理等人<sup>[9]</sup>通过对原子钟进行建模,显著提高 GPS 时间传递结果的精度和稳定性。

上述众多学者的深入研究极大地推动了 GPS 时间传递方法及技术快速发展。但是,对我国北斗的时间传递进行系统性研究相对较少。考虑到北斗卫星(Beidou satellite, BDS)导航系统兼有的地球同步轨道(geosynchronous orbit, GEO)、倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous satellite orbit, IGSO)、中地球轨道(medium earth orbit, MEO)的星座设计,将其应用于远程时间传递中,其性能究竟如何有待深入的分析评估。因此,本文主要从卫星时间传递中常用的共视(common view, CV)、载波相位(carrier-phase, CP)时间传递技术方法出发,对基于北斗的时间传递性能进行深入研究,特别是对时间传递链路的精度、稳定度进行定量评价。考虑到不同频率源可能对时间传递性能评估结果会有影响,故选择相同时间频率源,对北斗伪距和载波观测值进行算例分析与验证。

## 1 北斗时间传递方法

### 1.1 北斗共视

#### 1.1.1 数学模型

基于北斗共视法的时间传递主要是利用两个站的伪距观测值,通过站间差分消除卫星星历及钟误差,削弱卫星信号传播路径上的共同误差。设位于 A、B 两地的北斗接收机分别连接当地频率源,在  $t_i$  时刻在 A、B,对  $k$  卫星的伪距观测值  $P_B^k(t_i)$  和  $P_A^k(t_i)$ ,对其求差即可得到接收机间(站间)对  $k$  卫星的一次差分观测值,即共视法时间传递观测方程:

$$SD_{AB}^k(t_i) = P_B^k(t_i) - P_A^k(t_i) \quad (1)$$

#### 1.1.2 数据处理

考虑到伪距观测值的精度有限,在利用北斗进行共视法时间传递过程中将两个测站分别以 16 min 作为共视时段单元,首先连续跟踪北斗卫星 13 min,在采样间隔为 1 s 的情况可以获得 780 个伪距观测值;其次,为了削弱伪距噪声的影响,本文将这 780 个伪距观测值分成不重叠的 52 组,每组 15 个数据点,对 52 组分别采用最小二乘法进行拟合,选取中间时刻的拟合值作为拟合后的伪距观测值。通过拟合处理,有效降低了伪距观测值的观测噪声。最后,在两站间选择相同的卫星,利用单差原理即可获得两地时间传递量  $Clk\_A - Clk\_B$ 。

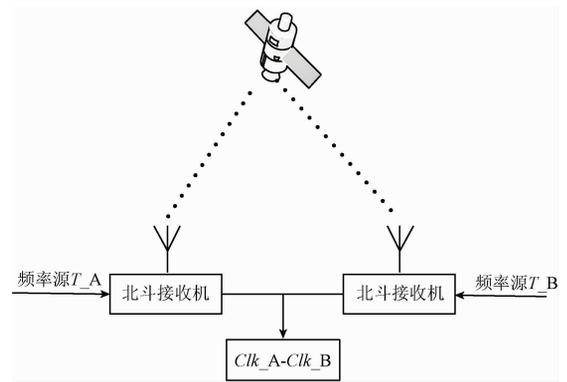


图 1 北斗 CV 时间传递示意图

Fig. 1 The principle of BeiDou CV time transfer

### 1.2 北斗载波相位的时间传递

基于北斗 CP 的时间传递方法与大地测量中的精密单点定位基本类似,区别之处在于基于北斗载波相位的时间传递中一般会有外接频率与时标接入,基于参考的脉冲和频率信号,接收机可以获得北斗载波相位观测值,并基于此获取本地参考时间与北斗系统时间的钟差值。两个及以上的站点分别获取本地时间和北斗系统时间,将北斗系统时间当作公共参考,即可实现站点之间的时间传递。

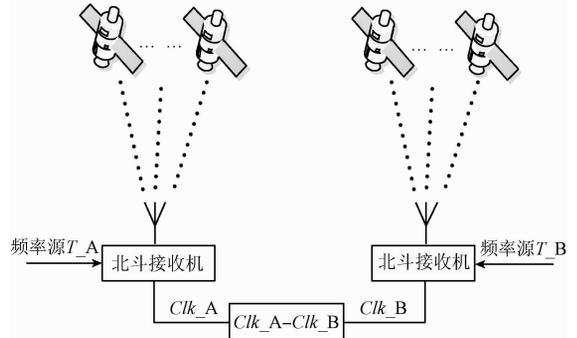


图 2 北斗 CP 时间传递示意图

Fig. 2 The principle of BeiDou CP time transfer

#### 1.2.1 数学模型

利用分析中心提供的精密卫星轨道和精密卫星钟差数据,基于无电离层双频组合观测值消除电离层一阶影响后,观测方程可表示为:

$$\begin{cases} P = \rho + c(dt_r - dt_s) + T + \varepsilon_p \\ \Phi = \rho + c(dt_r - dt_s) + T + \lambda N + \varepsilon_L \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $P$  为  $P_1$  和  $P_2$  的无电离层的伪距组合观测值,  $\Phi$  为  $L_1$  和  $L_2$  的无电离层的相位组合观测值,  $dt_r$  为接收机钟差,也就是接收机内部实际时间频率与北斗系统时间之差  $[T_x - BDT]$ ,  $dt_s$  为卫星钟差,  $c$  为真空中的光速,  $\lambda$  为波长,  $N$  为无电离层组合的载波相位模糊度,  $\varepsilon_p$ 、 $\varepsilon_L$  分别为两种组合观测值的观测噪声、多路径等未模型化的误

差影响,  $\rho$  为信号发射时刻的卫星位置到信号接收时刻的接收机位置之间的几何距离。

对式(2)进行线性化,并进一步得到误差方程:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{L} \quad (3)$$

$$\mathbf{X} = [x, y, z, dt_r, d_{\text{top}}, N] \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{A}$  为相应的设计矩阵,  $\mathbf{L}$  为相应的观测值减去忽略理论计算值得到的常数项,  $\mathbf{X}$  为待估参数总称, 主要包括测站的坐标  $[x, y, z]$ , 接收机钟差  $dt_r$ , 对流层延迟  $d_{\text{top}}$  以及观测到卫星的载波相位模糊度  $N$ 。

### 1.2.2 数据处理

在基于北斗 CP 的时间传递的过程中,接收机钟差  $dt_r$  与数据处理方法及各类误差的处理有着密切的关系,因此有必要对数据处理策略及误差处理方法进行详细说明。

利用式(3)建立的误差观测方程,由卡尔曼滤波算法逐历元按照白噪声随机模型进行接收机钟差估计。一般情况下,卡尔曼滤波器初始参数均以经验参数的形式获得,使得滤波器在 30 ~ 40 min 后才能收敛到分米量级<sup>[10]</sup>,严重影响了收敛时间过程中的时间传递工作。因此本文采用先反向滤波,再正向滤波的策略进行参数估计。具体做法:1)在单天最末历元处启动卡尔曼滤波器,初始参数可以按照经验参数给出,向前滤波到当天首个历元,此时首个历元处的状态参数均已得到了高精度的估计;2)将第一步已估计的状态参数作为正向滤波的初始参数条件,依次向后滤波。这样,收敛时间段被完全消除,相应时间段内即可进行准确时间传递。本策略可以有效消除在多天时间传递中,由于单天解算均存在收敛时间段而导致的多天钟差不连续现象。对于载波相位观测值的周跳探测中,采用 M-W (Melbourne-wiibena) 方法和电离层残差法联合进行探测,对发生周跳的卫星,在参数估计中对其模糊度重新初始化,有效避免了不准确的周跳修复对接收机钟差估计的影响。卫星轨道和钟差产品均采用德国地学中心提供的北斗轨道、钟差产品, GPS 卫星天线相位中心采用最新的绝对天线相位中心改正 (IGS08) 模型,北斗卫星天线相位中心由于暂时无法取得相关参数,因此本文未进行改正。基于 CP 时间传递数据处理的主要策略如表 1 所示。

表 1 各类误差处理策略

Table 1 Data processing strategies for error sources

误差源	处理策略
电离层误差	双频组合消电离层
对流层误差	Saastamoinen 模型 + 随机游走参数估计
卫星轨道及钟差	GPS 精密轨道及钟差产品
	BDS 精密轨道及钟差产品
卫星天线	GPS:IGS08 模型改正
相位中心	BDS:无参数,未改正
相对论效应	模型改正
潮汐改正	模型改正

## 2 试验与精度分析

### 2.1 试验数据

本文主要基于北斗卫星导航系统,从 CV 和 CP 方法的时间传递角度出发进行实验设计,其主要思想是提供一种能有效检验时间传递性能的外符合量同时削弱不同的时间频率源在时间传递过程中的变化对评价基于不同卫星系统时间传递性能的影响。因此,所有实验数据均采用相同时间频率源的数据,时间传递链路获得的传递钟差量的外符合真值原理上应该为零,但是考虑到各台 GNSS 接收机有不同观测天线、接收机硬件、相关线缆也不相同,钟差传递量则包含这些硬件延迟之差,在一定的时间内,这些时间延迟将保持一个相对平稳的量,更有利于进行性能分析。

受实验条件所限,最终共选择了 3 台接收机,其中一台为北斗/GPS 双模接收机,另外两台分别为 GPS、北斗单模接收机。北斗单模站的采样间隔为 1 min,另外两站均为 30 s。实验时间段为约化儒略日 (modified Julian day, MJD) 57 665 ~ 57 671 共 6 日,均是基于自主开发的 GNSS 远程时间传递软件 (precise time transfer solution, PPTslo) 分别对各站接收机钟差进行估计,卫星星历和钟差均采用广播星历。

### 2.2 基于北斗共视法的时间传递及精度分析

在实际工作中,基于北斗共视法的时间传递过程按照共视步骤进行数据处理,以各站接收机钟差为待估参数,历元间按照白噪声随机模型予以估计,与卫星有关的误差和与传播路径相关的误差通过共视组合即可消除或削弱,利用广播星历最终分别获得了 BDS 和 GPS 两个时间传递链路的 16 min 的钟差序列,如图 3、4 所示,并进一步对其进行了统计分析,如表 2 所示,并评价了其频率稳定度,如图 5 和表 3 所示。

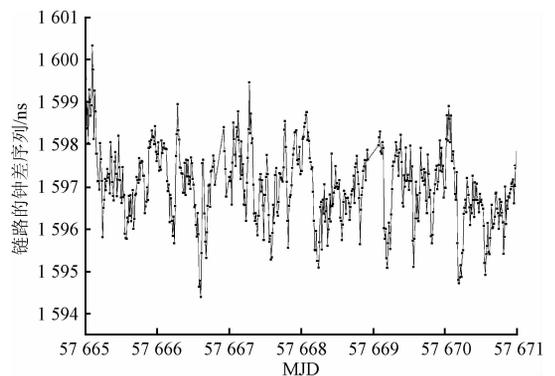


图 3 基于 CV 的 BDS 链路钟差序列

Fig. 3 The clock difference series based on BDS CV

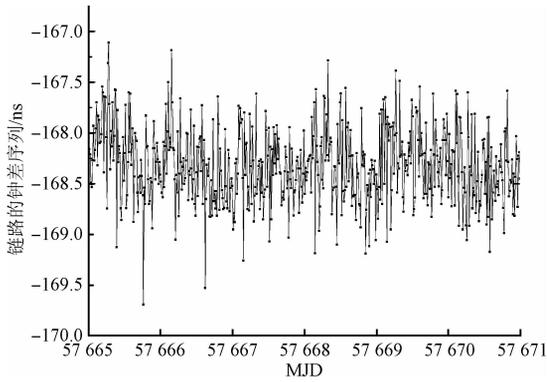


图 4 基于 CV 的 GPS 链路钟差序列

Fig. 4 The clock difference series based on GPS CV

表 2 基于 CV 的 BDS 链路及 GPS 链路钟差序列统计

Table 2 The statistical clock difference series based on BDS and GPS CV (ns)

链路	平均值	最大值	最小值	极差	标准差
BDS	1 596.98	1 600.32	1 594.39	5.93	0.88
GPS	-168.31	-167.11	-169.69	2.58	0.38

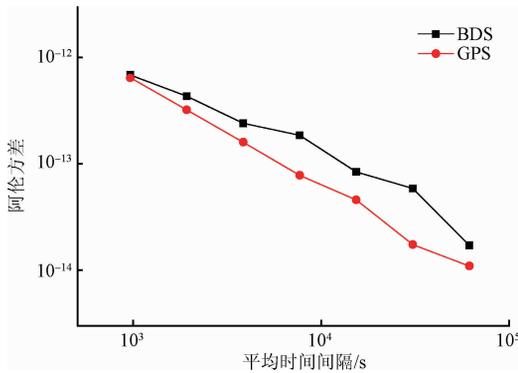


图 5 基于 CV 的 BDS 链路及 GPS 链路的频率稳定性对比

Fig. 5 The comparison of frequency stability based on BDS CV and GPS CV

表 3 基于 CV 的 BDS 链路及 GPS 链路的频率稳定性

Table 3 The frequency stability based on BDS and GPS CV

平均时间间隔/s	BDS	GPS
960	$6.84 \times 10^{-13}$	$6.45 \times 10^{-13}$
1 920	$4.31 \times 10^{-13}$	$3.21 \times 10^{-13}$
3 840	$2.41 \times 10^{-13}$	$1.60 \times 10^{-13}$
7 680	$1.86 \times 10^{-13}$	$7.81 \times 10^{-14}$
15 360	$8.38 \times 10^{-14}$	$4.59 \times 10^{-14}$
30 720	$5.87 \times 10^{-14}$	$1.74 \times 10^{-14}$
61 440	$1.71 \times 10^{-14}$	$1.10 \times 10^{-14}$

结合图 3 ~ 5 及表 2 ~ 3 可以看出,1) BDS 链路和 GPS 链路基于共视法的时间传递获得的同源时间链路的钟差序列都是呈白噪声分布;由于两条链路的不同的硬件延迟导致其钟差值并不相等,但钟差序列标准差可以有效反映时间传递的性能。BDS 链路及 GPS 链路钟差序列的标准差分别为 0.88 和 0.38 ns,极差分别为 5.93 和 2.58 ns;2) BDS 链路和 GPS 链路在不同时间间隔的稳定性表现比较一致,阿伦方差天稳定性均能达到  $10^{-14}$  量级;GPS 链路得到的稳定性符合典型的  $1/\tau$  规律,BDS 链路的则介于  $1/\tau$  和  $1/\sqrt{\tau}$  规律之间;3) 基于 BDS 的共视法时间传递采用伪距观测值可以达到纳秒量级的时间传递精度,与 GPS 共视时间传递精度相当。

### 2.3 基于北斗载波相位的时间传递及精度分析

在基于北斗载波相位的时间传递实施过程中,以各站接收机钟差为待估参数,同时估计了各站的坐标、对流层及模糊度参数,钟差历元间按照白噪声随机模型予以估计,按照数据采样间隔 1 min 进行计算,同时对各类误差进行处理,具体策略如表 1 所示。最终获取了 BDS 和 GPS 链路的钟差序列,如图 6、7 所示,时间分辨率为 1 min,同时对其进行统计分析,如表 4 所示。为了更进一步分析链路钟差稳定性,本文给出了阿伦方差 (Allan) 和时间方差 (time deviation, TDEV) 的频率稳定性,如图 8、9 所示。

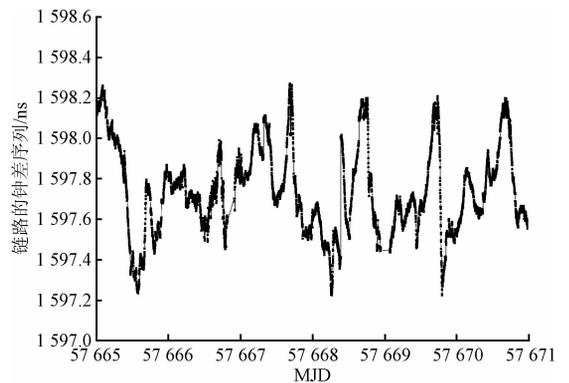


图 6 基于 CP 的 BDS 链路钟差序列

Fig. 6 The clock difference series based on BDS CP

表 4 基于 CP 的 BDS 与 GPS 链路钟差序列统计

Table 4 The statistical clock difference series based on BDS and GPS CP (ns)

链路	平均值	最大值	最小值	极差	标准差
BDS	1 597.74	1 598.26	1 597.22	1.04	0.22
GPS	-168.16	-168.05	-168.28	0.23	0.04

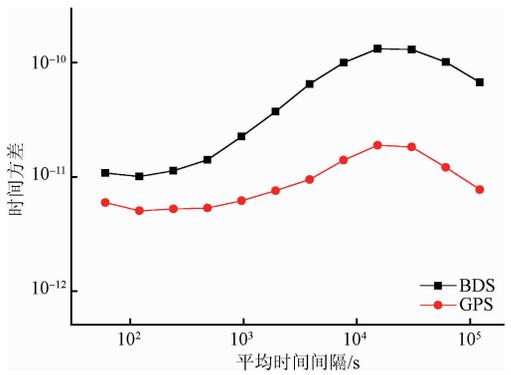
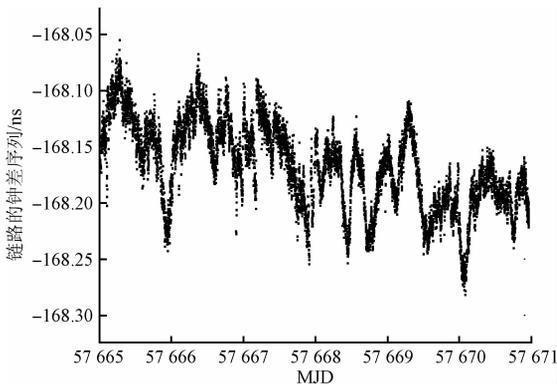


图7 基于CP的GPS链路的钟差序列

Fig. 7 The clock difference series based on GPS CP

图9 基于CP的BDS与GPS链路TDEV对比

Fig. 9 The comparison of time deviation based on BDS and GPS CP

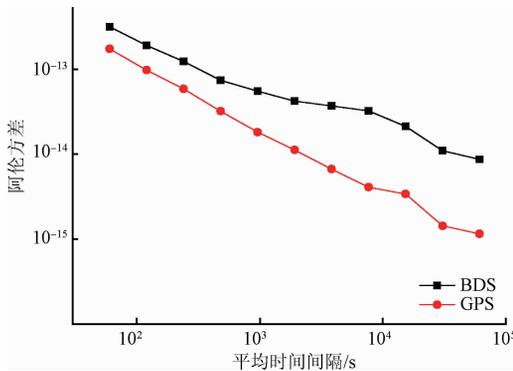


图8 基于CP的BDS与GPS链路Allan方差对比

Fig. 8 The comparison of Allan deviation based on BDS and GPS CP

结合图6~9、表4、5可以得出,1)当采用了载波相位观测值时,BDS链路与GPS链路基于PPP的时间传递钟差序列在每天开始阶段均有较大的起伏变化,这是由于单天解法造成的“天跳变”,从统计信息看,BDS链路钟差的标准差为0.22 ns,极差1.04 ns,GPS链路钟差的标准差为0.04 ns,极差为0.23 ns;2)从频率稳定度的角度看,BDS链路在Allan方差短期稳定度与GPS链路基本相当,长期稳定度上GPS链路相对较高,在TDEV上,GPS链路的TDEV曲线比BDS链路更加稳定,BDS的TDEV天稳定度达到 $10^{-11}$ ;3)BDS链路在计算过程中,没有考虑到卫星天线相位中心改正,采用的轨道也是GBM单个分析中心给出产品,因此从极差角度看,BDS链路PPP时间传递精度为亚纳秒~纳秒量级,GPS链路进行PPP时间传递能达到0.2 ns。

表5 基于CP的BDS与GPS链路频率稳定度

Table 5 The frequency stability based on BDS and GPS CP

平均时间间隔/s	Allan		TDEV	
	BDS	GPS	BDS	GPS
60	$3.11 \times 10^{-13}$	$1.7137 \times 10^{-13}$	$1.08 \times 10^{-11}$	$5.9365 \times 10^{-12}$
120	$1.88 \times 10^{-13}$	$9.6504 \times 10^{-14}$	$1.01 \times 10^{-11}$	$5.0284 \times 10^{-12}$
240	$1.22 \times 10^{-13}$	$5.7968 \times 10^{-14}$	$1.13 \times 10^{-11}$	$5.2159 \times 10^{-12}$
480	$7.32 \times 10^{-14}$	$3.1728 \times 10^{-14}$	$1.40 \times 10^{-11}$	$5.3213 \times 10^{-12}$
960	$5.45 \times 10^{-14}$	$1.8042 \times 10^{-14}$	$2.24 \times 10^{-11}$	$6.1505 \times 10^{-12}$
1 920	$4.18 \times 10^{-14}$	$1.1132 \times 10^{-14}$	$3.73 \times 10^{-11}$	$7.5486 \times 10^{-12}$
3 840	$3.66 \times 10^{-14}$	$6.6411 \times 10^{-15}$	$6.50 \times 10^{-11}$	$9.4565 \times 10^{-12}$
7 680	$3.20 \times 10^{-14}$	$4.0666 \times 10^{-15}$	$1.00 \times 10^{-10}$	$1.3967 \times 10^{-11}$
15 360	$2.11 \times 10^{-14}$	$3.3873 \times 10^{-15}$	$1.32 \times 10^{-10}$	$1.8881 \times 10^{-11}$
30 720	$1.09 \times 10^{-14}$	$1.4309 \times 10^{-15}$	$1.31 \times 10^{-10}$	$1.8235 \times 10^{-11}$
61 440	$8.62 \times 10^{-15}$	$1.1525 \times 10^{-15}$	$1.01 \times 10^{-10}$	$1.2077 \times 10^{-11}$
122 880	-	-	$6.74 \times 10^{-11}$	$7.7141 \times 10^{-12}$

### 3 结 论

本文主要分析研究了基于北斗的远程时间传递方法,分别从北斗伪距共视和载波相位时间传递的技术角度出发,分析了其基本数学模型级数据处理方法,研制了 GNSS 远程时间传递软件包 PPTSlo。本文选择了连接相同时间频率源的 GNSS 接收机,分析、对比了 BDS 和 GPS 的时间传递性能。

在北斗共视法时间传递实验中,从时间传递极差的角度看,BDS 链路能够达到 6 ns 以内的时间传递精度,GPS 链路优于 3 ns,Allan 方差频率稳定度两者基本相当。在北斗载波相位时间传递实验中,仅使用了单个分析中心提供的轨道和钟差产品,同时由于卫星天线相位中心改正量目前还未准确获得也没有进行相应的改正。因此,从时间传递的标准差的角度看,BDS 时间传递精度仅为 0.2 ns,GPS 时间传递精度为 0.04 ns;从时间传递的极差方面看,BDS 时间传递可达到纳米量级,GPS 优于 0.3 ns。

随着我国北斗导航卫星系统的不断建设和完善,基于北斗的特点建立的误差模型也将精化,利用北斗进行远程时间传递也将取得更加优越的性能。

### 参考文献

- [ 1 ] JIANG Z, LEWANDOWSKI W. Uses of GLONASS for UTC time transfer[J]. *Metrologia*, 2012, 49(1):57-61.
- [ 2 ] PETIT G, JIANG Z. Precise point positioning for TAI computation[C]. *IEEE International Frequency Control Symposium*, 2007,2008(2): 395-398.
- [ 3 ] DELPORTE J, MERCIER F, LAURICHESSE D, et al. Fixing integer ambiguities for GPS carrier phase time transfer [ C ]. *Proceedings of the joint European Frequency and Time Forum and IEEE Frequency Control Symposium*, 2007: 927-932.
- [ 4 ] 杨志强,张静,杨军.北斗一号时间传递能力的实验研究[J]. *电子测量技术*, 2009, 32(8):16-19.  
YANG ZH Q, ZHANG J, YANG J. Experimental research of the time transfer capability of compass[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2009, 32(8): 16-19.
- [ 5 ] 孙宏伟,李岚,苏哲斌.卫星位置误差对 GPS 共视时间比对的影响[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2009, 34(8): 968-970.  
SUN H W, LI L, SU ZH B. Effect of the error of satellite position on GPS common-view time transfer [ J ]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(8): 968-970.
- [ 6 ] 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 X H, CAI SH X, LI X X, 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.
- [ 7 ] 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 G W. Research on algorithms of precise clock offset and quality evaluation of gnss satellite clock [ D ]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [ 8 ] 袁媛,仲崇霞,张升康. GPS 载波相位时间传递软件的实现[J]. *宇航计测技术*, 2013, 33(5):43-47, 51.  
YUAN Y, ZHONG CH X, ZHANG SH K. Realization of GPS carrier phase time transfer software[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2013, 33(5): 43-47, 51.
- [ 9 ] 于合理,郝金明,刘伟平,等.附加原子钟物理模型的 PPP 时间传递算法[J]. *测绘学报*, 2016, 45(11): 1285-1292.  
YU H L, HAO J M, LIU W P, et al. A time transfer algorithm of precise point positioning with additional atomic clock physical model [ J ]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(11):1285-1292.
- [ 10 ] 张小红,陈兴汉,郭斐.高性能原子钟钟差建模及其在精密单点定位中的应用[J]. *测绘学报*, 2015, 44(4):392-398.  
ZHANG X H, CHEN X H, GUO F. High-performance atomic clock modeling and its application in precise point positioning [ J ]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(4):392-398.
- [ 11 ] 陈瑞琼,刘娅,李孝辉.基于改进的卫星共视法的远程时间比对研究[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(4): 757-763.  
CHEN R Q, LIU Y, LI X H. Study on remote time comparison based on improved satellite common-view method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(4):757-763.
- [ 12 ] 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 & Instrumentation*, 2016, 30(1): 38-44.
- [ 13 ] DEFRAIGNE P, BRUYNINX C, GUYENNON N. PPP and phase-only GPS time and frequency transfer [ C ]. *IEEE International Frequency Control Symposium*, 2007:

- 904-908.
- [14] DACH R, HUGENTOBLE U, SCHILDKNECHT T, et al. Precise continuous time and frequency transfer using GPS carrier phase [C]. Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, 2005: 329-336.
- [15] NAKAGAWA F, AMAGAI J, TABUCHI R, et al. Carrier-phase TWSTFT experiments using the ETS-VIII satellite [J]. Metrologia, 2013, 50(3): 200-207.
- [16] GUYENNON N, CERRETTO G, TAVELLA P, et al. Further characterization of the time transfer capabilities of precise point positioning (PPP): The sliding batch procedure [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2009, 56(8): 1634-1641.
- [17] 陈军, 李建文, 张成军. 白噪声 Kalman 滤波模型在 GPS 单向时中的应用 [J]. 海洋测绘, 2010, 30(1): 29-31.  
CHEN J, LI J W, ZHANG CH J. Application of white noise Kalman filter in GPS single time transfer [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2010, 30(1): 29-31.
- [18] 陈宪冬. 基于大地型时频传递接收机的精密时间传递算法研究 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 33(3): 245-248.  
CHEN X D. Precision time transfer methods based on geodetic time and frequency transfer receivers [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(3): 245-248.
- [19] WANG J, ZHANG Q, HUANG G W, et al. An enhanced global positioning technology and precision verification of BDS [C]. China Satellite Navigation Conference (CSNC), 2016: 263-276.
- [20] 郭海荣, 杨元喜, 何海波, 等. 导航卫星原子钟 Kalman 滤波中噪声方差-协方差的确定 [J]. 测绘学报, 2010, 39(2): 146-150.  
GUO H R, YANG Y X, HE H B, et al. Determination of covariance matrix of kalman filter used for time prediction of atomic clocks of navigation satellites [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(2): 146-150.
- [21] 朱峰, 李孝辉, 张慧君. 基于钟驱动模式的定时接收机绝对校准 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9): 1946-1954.  
ZHU F, LI X H, ZHANG H J. Absolute calibration of timing receiver based on clock-steering model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(9): 1946-1954.
- [22] 朱永兴, 冯来平, 贾小林, 等. 北斗区域导航系统的 PPP 精度分析 [J]. 测绘学, 2015, 44(4): 377-383.  
ZHU Y X, FENG L P, JIA X L, et al. The PPP precision analysis based on BDS regional navigation system [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(4): 377-383.

### 作者简介



张鹏飞, 2013 年于长安大学获得硕士学位, 现为中国科学院国家授时中心助理研究员、在读博士研究生, 主要研究方向为高精度 GNSS 定位及时间传递的方法与技术。

E-mail: zpf.333@163.com

**Zhang Pengfei** received his M. Sc. degree from Chang'an University in 2013. Now he is an assistant researcher and Ph. D. candidate in National Time Service Center, CAS. His main research interests include GNSS positioning and time transfer.



高玉平, 1987 年于中国科学院上海天文台获得硕士学位, 现为中国科学院国家中心研究员、博士生导师, 主要研究方向为守时理论方法与技术、GNSS 远程时间传递、脉冲星导航与计时以及地球自转参数的测量

E-mail: gaoyup@ntsc.ac.cn

**Gao Yuping** received his M. Sc. degree from Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences in 1987. Now he is a research fellow and Ph. D. supervisor in National Time Service Center, CAS. His main research interests focus on the theory, method and technology of time-keeping, GNSS remote time comparison, pulsar navigation and timing, and estimation of earth rotation parameters (ERP).