引文格式：赵娜娜. GNSS载波相位应用于守时系统远程性能评估方法研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(12):95-98. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.12.021

GNSS载波相位应用于守时系统远程性能评估方法研究

赵娜娜[1]
（1. 西安城市建设职业学院，陕西 西安 710000）

摘　要：为了准确评估在建守时系统的性能表现，设计并实施了一项依托全球导航卫星系统（GNSS）载波相位技术的远程评估方法。采用国家标准时间UTC（NTSC）作为基准，从位于中国西安与北京的2个地点，精心选取4个观测站点，连续15 d不间断收集了丰富的GNSS数据。在数据处理流程中，采用精密单点定位（PPP）与载波相位共视（PCV），以精确测定待测守时系统与UTC（NTSC）之间的时间偏差。在此基础上，进一步剖析了该守时系统的多项关键性能指标，特别是相对频率偏差和频率稳定性这2个方面。通过数据分析与对比，得出结论：PCV与PPP具有优越的时间传递性能，系统误差较小，达到了较高的精度水平，能够满足对远程守时系统频率稳定性和相对频率偏差进行精确评估的需求。本研究为国产守时系统的远程测试提供了有力的技术支撑，在提升时间同步技术精准度方面迈出了坚实的一步。

关键词：守时系统；性能评估；GNSS载波相位；精密单点定位；载波相位共视
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）12-0095-04

Research on Remote Performance Evaluation Methods of Timekeeping Systems Based on GNSS Carrier Phase

ZHAO Nana[1]
(1. Xi'an Urban Construction Vocational College, Xi'an 710000, China)

Abstract: To accurately assess the performance of timekeeping system, we designed and implemented a remote evaluation method relying on global navigation satellite system (GNSS) carrier phase technology. Utilizing national time service center's UTC (NTSC) as the reference, we meticulously selected four observation stations from two locations in Xi'an and Beijing, China, where abundant GNSS data were continuously collected for 15 days without interruption. In the data processing workflow, we employed precise point positioning (PPP) and phase common view (PCV) to precisely determine the time deviation between the timekeeping system under test and UTC (NTSC). On the basis of this, we further analyzed the multiple key performance indicators of the timekeeping system, particularly focusing on relative frequency deviation and frequency stability. Through data analysis and comparison, it was concluded that PCV and PPP exhibit superior time transfer performance with small systematic errors, achieving a high level of accuracy that meets the requirements for precise evaluation of frequency stability and relative frequency deviation in remote timekeeping systems. The research provides robust technical support for the remote testing of domestic timekeeping systems and represents a solid step forward in enhancing the precision of time synchronization technology.

Key words: timekeeping system, performance evaluation, GNSS carrier phase, PPP, PCV

高精度远程时间同步是衡量时钟精确度和守时系统性能的重要标尺。目前，远程时间传递主要依赖光纤时间频率传输、全球导航卫星系统（GNSS）时间频率传递和双向卫星时间频率传递（TWSTFT）[1-8]。本文采用GNSS精密单点定位（PPP）与载波相位共视（PCV）方法，对守时系统进行远程性能评估。结果表明，二者可实现百皮秒级时间精度与10^{-15}/d级频率稳定度测量，为守时系统的实时监测与验收维护提供了可靠的技术保障。

1　GNSS CP TT数学模型

1.1　PPP时间传递数学模型

双频无电离层组合模型基于电离层延迟与频率的平方成反比的特性，通过利用2个不同频率的原始观测方程进行组合，可以消除电离层延迟参数，从而得到更加精确的观测值[9-10]。该原理使得双频无电离层组合模型成为PPP中的重要组成部分，表示为：

项目来源：高职院校工程测量技术专业的“双师型”教师队伍建设研究项目（JKY20240105）。
作者简介：赵娜娜（1991—），硕士研究生，讲师，研究方向为大地测量与卫星定位技术、无人机摄影测量技术，E-mail：3344864549@qq.com。

$$P_{IF}=\frac{f_1^2P_1-f_2^2P_2}{f_1^2-f_2^2}=r+c(T_u-T^s)+d_{\text{trop}}+d_{P_{IF}}+d_{\text{mul}/P_{IF}}+\varepsilon_{P_{IF}} \quad (1)$$

$$L_{IF}=\frac{f_1^2L_1-f_2^2L_2}{f_1^2-f_2^2}=r+c(T_u-T^s)+d_{\text{trop}}+d_{L_{IF}}+\lambda_{IF}N_{IF}+d_{\text{mul}/L_{IF}}+\varepsilon_{L_{IF}} \quad (2)$$

式中，P_{IF}、L_{IF}为伪距观测值、载波相位观测值；r为卫星到接收机的几何距离；c为真空中的光速；T^s为卫星在信号发射时相对于GPS时间的钟差；f_1、f_2为载波频率；T_U为接收机在信号接收时相对于GPS时间的钟差；d_{trop}为对流层延迟参数；l_{IF}为波长；N_{IF}为组合模糊度；$d_{P_{IF}}$、$d_{L_{IF}}$为时延参数；$d_{\text{mul}/P_{IF}}$、$d_{\text{mul}/L_{IF}}$为多路径误差；$\varepsilon_{P_{IF}}$、$\varepsilon_{L_{IF}}$为未模型化的误差。

1.2 PCV时间传递数学模型

相比之下，PCV采用站间差分载波相位法，通过选择合适的参考站和移动站、采集高质量的数据、进行差分运算和解算坐标等步骤，可以实现高精度定位，观测模型为[11]：

$$\Delta P_{IF}=\Delta r+c\Delta T_u+\Delta d_{\text{trop}}+\Delta d_{P_{IF}}+\Delta d_{\text{mul}/P_{IF}}+\Delta\varepsilon_{P_{IF}} \quad (3)$$

$$\Delta L_{IF}=\Delta r+c\Delta T_u+\Delta d_{\text{trop}}+\Delta d_{L_{IF}}+\lambda_{IF}\Delta N_{IF}+\Delta d_{\text{mul}/L_{IF}}+\Delta\varepsilon_{L_{IF}} \quad (4)$$

式中，Δ为2个观测站点间某一特定参数变动量，其他符号则遵循PPP时间传递模型的定义。相较于PPP，PCV在削弱卫星轨道误差及卫星时钟误差的影响上表现出显著的优越性，能够直接、精确地测量两地间的时差。

1.3 守时系统远程性能评估原理

利用GNSS CP TT，构建一个守时系统远程性能测试评估框架，在采集待测端与参考端的数据时，GNSS接收机能够精确计算出$T_{A_{\text{OUT}}}$、$T_{B_{\text{OUT}}}$相对于参考时间REFT的偏移ΔT_A和ΔT_B。

$$\Delta T_{A/B}=T_{A_{\text{OUT}}/B_{\text{OUT}}}-\text{REFT} \quad (5)$$

这一计算依赖于IGS/MGEX提供的精密星历和精密时钟数据，这些数据通常以国际GNSS服务时间（IGST）或外部时钟REFCLK为基准进行校准[12]。基于这些数据，进一步推导出卫星钟差和接收机钟差，从而确定A、B两地时间频率标准的差异ΔT_{AB}：

$$\Delta T_{AB}=(T_{A_{\text{OUT}}}-\text{IGST/REFCLK})-(T_{B_{\text{OUT}}}-\text{IGST/REFCLK})=\Delta T_A-\Delta T_B \quad (6)$$

2 实验分析

2.1 实验设计

选取西安临潼的国家标准时间UTC（NTSC）作为基准，全面对比分析了GNSS PPP与PCV在远程守时系统性能评估中的效果。测试时间从2023年3月30日持续至4月13日（MJD：60033~60047），在西安和北京两地共设立了4个观测站点，利用GNSS远程测试设备连续15 d不间断进行数据采集。特别挑选XIA6观测站，与其他6个观测站分别构建了时间同步链路，包括零基线（XIA6–SE22）、短基线（XIA6–NU17）和长基线（XIA6–GT01），观测站配置信息如表1所示。

表1 所选测站信息

测站	外接参考	接收机类型
XIA6	UTC（NTSC）	SeptentrioPolarx5TR
SE22	UTC（NTSC）	SeptentrioPolarx5TR
NU17	氢钟	Septentrio mosaic-T
GT01	某守时系统	–

2.2 数据预处理

在实验过程中，运用了PPP和PCV这2种时间传递方法，目的是测量和比较2个地点的时差，以及它们相对于UTC（NTSC）标准时间的偏移程度。图1和图2分别为这2种技术的数据处理步骤[13-14]。在本次实验中，PCV和PPP时间传递都采用了静态分析模式，具体的参数设置如表2所示。

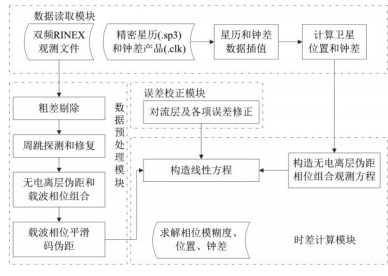


图1 PPP时间传递流程

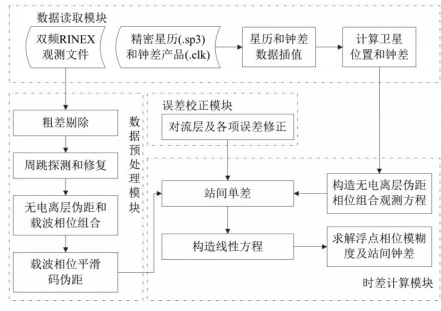


图2 PCV时间传递流程

3 结果分析

3.1 性能评估方法

在守时系统性能的评估中，聚焦于2个核心参

表2　PPP/PCV参数估计方案

参数选项	设置	参数选项	设置
高度角	10°	参数估计方法	扩展卡尔曼滤波
滤波方式	前向滤波	钟差估计	白噪声
精密轨道/钟差	GBM精密产品	码偏差	CODE.DCB
观测值	GPS:L1/L2	对流层修正	Saastamoinen+参数估计
跟踪站坐标	静态解算	电离层修正	双频无电离层组合

数：频率稳定度与相对频率偏差[15-16]。为了区分调相闪烁噪声与调相白噪声，首先收集被测守时系统与参考系统之间的时差，并选用修正阿伦偏差（MDEV）作为指标衡量频率的稳定性[17]。依据这个指标，被测守时系统的频率稳定度要达到参考系统的3倍或更高水平。

3.2　零基线实验

在临潼园区的预设地点，设立了2个测站，并部署了XIA6–SE22零基线链路，对PCV和PPP时间传递的性能展开分析，结果如图3所示。通过对比分析，发现PCV在时间传递上展现出了更高的稳定性，其标准偏差（STD）仅为0.030 ns，远低于PPP的0.090 ns，凸显了PCV在降低链路噪声方面的优越能力。究其原因，PCV方法通过站间差分，可以有效地消除或减弱一些与站点位置相关的系统性误差，如固体潮、海洋潮汐等引起的位置偏移，以及天线相位中心偏差（PCO）和天线相位中心变化（PCV）等。这些误差在单点定位中可能难以完全消除，但在站间差分中可以得到较好的抑制。

图4所示为PCV与PPP在时间传递的频率稳定性，分别为2×10^{-16}/d、5×10^{-16}/d。

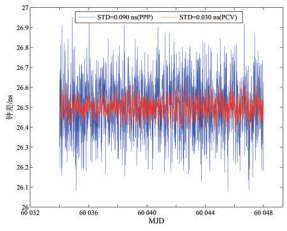


图3　时间传递（XIA6–SE22链路）

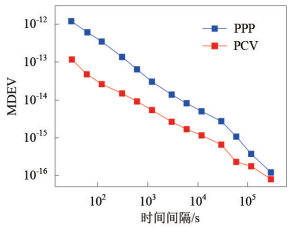


图4　时间传递频率稳定性（XIA6–SE22链路）

3.3　短基线实验

在西安临潼的XIA6站点与航天城的NU17站点间，构建一条33 km长的短基线链路，命名为XIA6–NU17，NU17站点配备了国产氢原子钟，保持时间频率的高精确度。图5所示为XIA6–NU17链路在使用PCV与PPP时的时间传递结果。数据表明，PCV的标STD仅为0.590 ns，远低于PPP的0.890 ns，凸显了PCV在降噪方面的显著优势。

图6所示为PCV与PPP在频率稳定度上的对比结果，两者均表现出色，达到了约4×10^{-14}/d的水平，

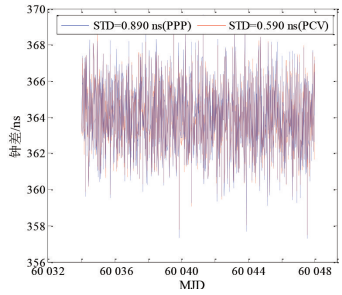


图5　时间传递（XIA6–NU17链路）

充分验证了PCV与PPP都能准确反映NU17站点氢原子钟的频率稳定性。进一步地分析发现，在时长不超1 000 s的时段内，PCV与PPP的频率稳定度表现几乎相当。然而，当时间跨度延长至1 000 s~1 d的范围内时，PPP的频率稳定度低于PCV，这主要是由于PPP在此时间尺度上更容易受到链路噪声的影响，在一定程度上降低了其频率稳定度的表现。

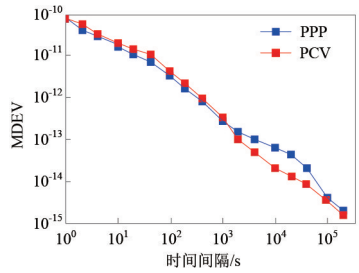


图6　时间传递频率稳定性（XIA6–NU17链路）

利用PCV与PPP 2种方法，对NU17与XIA6之间链路进行解算，得到相对频率偏差如图7所示。计算结果显示，PCV的平均相对频率偏差为6.55×10^{-15}，而PPP的平均相对频率偏差则为7.24×10^{-15}，均远低于国产氢钟通常所表现出的5×10^{-14}的相对频率偏差水平。进一步强化了它们在测量待测氢原子钟相对频率偏差中的精确性。

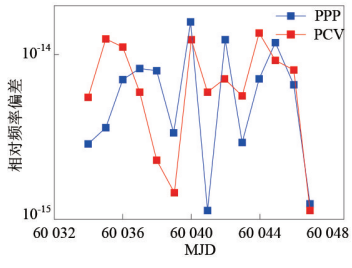


图7　时间传递相对频率偏差（XIA6–NU17链路）

3.4　长基线实验

此外，本研究构建一条跨越1 100 km的长基线链路，命名为XIA6–GT01，该链路起始于临潼园区的XIA6测站，终点则是位于北京的GT01测站。GT01测站目前已经整合进国家时间频率体系最新研发的守时系统中。这一守时系统采用了先进的氢–铯守时方案，并且配备了规模庞大的钟组，以确保系统的性能，

系统的频率稳定度达到了的3×10^{-15}。

图8反映出XIA6–GT01链路在采用PCV与PPP时的时间传递性能，经计算，PCV的时间传递STD为1.080 ns，而PPP则为1.152 ns，两者均展现出了较高的时间传递精度。从图中可以看到，无论是PPP还是PCV，它们的时间传递曲线在天与天交界时都会呈现出一种规律性的波动，PCV的波动幅度相对较小。这种规律性的波动，主要是由于二者均采用了以天为单位的数据处理流程，同时，码噪声以及卫星精密产品在不同日期时间基准上的不一致性也是造成这种波动的重要原因。值得注意的是，PCV在时间传递过程中无需使用卫星精密钟差产品，因此与PPP相比，PCV在日界处产生的误差突变情况更少。此外，图中还突出了守时系统面临的一个关键问题：氢原子钟组存在频率漂移，可能威胁到守时系统的长期稳定运行。

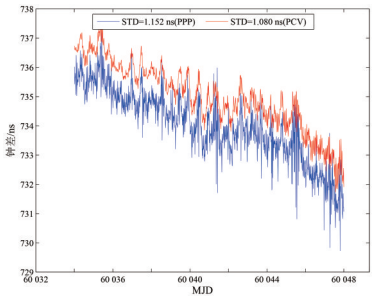


图8 时间传递（XIA6–GT01链路）

通过图9进一步表示XIA6–GT01链路时间传递的频率稳定性，确认了PCV与PPP在时间传递中频率稳定度的高度一致性，均保持在约3.2×10^{-15}/d的高水平。随着观测时间的不断延长，PPP链路的频率稳定表现越接近PCV，有力地验证了在长时间监测的条件下，PCV与PPP均展现出高精度时间参考系统的频率稳定特性。此外，分析不同链路时间传递的频率稳定性可知，零基线及长基线实验中，PCV方法在开始时表现出更高的频率稳定性，主要由于其差分技术和对噪声的有效消除。然而，在短基线实验中，由于基线长度的缩短和其他潜在因素的影响，PCV方法的优势没有太大，导致MDEV的增加速度与PPP方法相近。

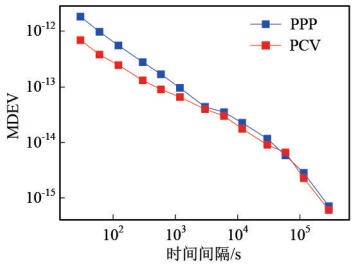


图9 时间传递频率稳定性（XIA6–GT01链路）

利用PCV与PPP2种方法，对XIA6–GT01链路进行解算，得到相对频率偏差如图10所示。通过计算得知，PCV的平均相对频率偏差为3.89×10^{-15}，而PPP的平均相对频率偏差则为4.95×10^{-15}。

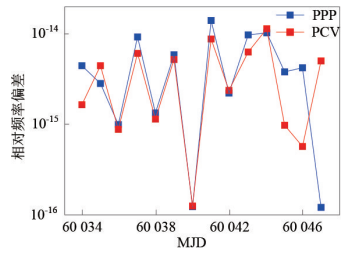


图10 时间传递相对频率偏差（XIA6–GT01链路）

基于实验数据推测：随着基线长度的延长，PCV与PPP在时间传递中的STD差异将趋于减小。特别是在长基线的特定场景下，PPP的STD低于PCV，主要原因是随着基线长度的增加，PCV所能接入并利用的卫星数量会相应减少，在一定程度上限制了PCV在时间传递方面的性能发挥。相比之下，PPP则表现出了更强的适应性和稳定性，其在长基线场景下的性能并未受到明显影响，在某些情况下，PPP的表现还要优于PCV。本研究为深入理解PCV与PPP的性能差异，以及在不同应用场景下如何合理选择时间传递方法提供了宝贵的参考。

4 结 语

本文构建一套远程测试与性能评估流程，其核心在于对在建守时系统运行性能与现状的精准评估。以国家时间标准UTC(NTSC)为基准，通过选取4个监测站点，构建了多种基线时间链路，并实施了为期15 d的实验验证。实验结果归纳如下：①在抑制噪声、提高测量精度以及维持长期频率稳定方面，PCV时间传递链路相较于PPP展现出一定优势。②结合PCV与PPP时间传递方法，意在全面评估高精度守时系统的各项性能参数，分析各项性能参数的变化，为守时系统性能的不断提升打造了一个稳固的技术支撑架构。

参考文献

[1] 索世恒，韩昆，张永峰. 伽利略高精度服务产品与其全球定位性能评估[J]. 地理空间信息，2024，22(11):100-104

[2] 许明佳，董坤烽，郭天伟. DCB对伪距单点定位/精密单点定位的影响分析[J]. 地理空间信息，2024，22(2):89-91

[3] 王宇谱，马保印，赵营营，等. GPS Ⅲ星载原子钟长期性能评估[J]. 大地测量与地球动力学，2024，44 (11):1 148-1 154

[4] 尹宏杰. BDS-3单频PPP定位精度与收敛性分析[J]. 地理空间信息，2023，21(6):112-115

（下转第132页）