

引用格式:武美芳,董孝松. 基于 iGMAS 的亚纳秒级实时时间服务系统设计与实现[J]. 时间频率学报, 2022, 45(4): 262-269.

基于 iGMAS 的亚纳秒级实时时间 服务系统设计与实现

武美芳¹, 董孝松²

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

2. 山东理工大学, 淄博 255000)

摘要:全球导航卫星系统(GNSS)时间服务精度为 10~50 ns, 是目前广泛使用和精度较高的时间服务技术之一。现代信息社会的快速发展, 对时间服务精度和时效性提出了更高的要求。鉴于此, 本文设计并实现了基于国际 GNSS 监测评估系统(iGMAS)的亚纳秒级实时时间服务系统。该系统由跟踪网、服务平台、播发平台和用户平台组成。系统工作原理为: 以 iGMAS 作为平台, 建立 GNSS 与 UTC(NTSC)的紧密联系, 用户通过多种定时模式, 实时获得本地时钟与 UTC(NTSC)的偏差, 从而实现精密时间服务, 预期静态时间服务精度达到亚纳秒量级。根据应用场景不同, 用户可选择精密单点定位(PPP)定时模式或实时动态定时模式完成时间服务过程。测试表明, 用户端采用 PPP 定时模式或实时动态定时模式, 系统均可提供精度优于 1 ns 的时间服务。与 GNSS 时间服务相比, 基于 iGMAS 的亚纳秒级实时时间服务系统将时间服务精度提高 1~2 个量级。

关键词:国际 GNSS 监测评估系统; 亚纳秒; 时间服务; 实时; UTC(NTSC)

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2022-04-0262-08

Design and implementation of sub-nanosecond real-time time service system based on iGMAS

WU Mei-fang¹, DONG Xiao-song²

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

2. Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: The precision of GNSS-based time service is typically 10~50 ns, which is one of the most widely used and precise time service technologies. With the rapid development of modern information society, the precision of tens of nanoseconds, however, can not meet the demands of diverse sources. Based on the above problems, a sub-nanosecond real-time time service system based on international GNSS Monitoring and Assessment System(iGMAS) is designed and implemented. The system consists of the tracking network, the service platform, the broadcast platform and the user platform. With the help of the iGMAS service, a close relationship between the GNSS-based timing results and the UTC(NTSC) is established. Users can obtain the deviation between their local clocks and the UTC(NTSC) in real-time

收稿日期: 2021-10-17; 接受日期: 2022-03-25

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(12003041); 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部青年学者”B类资助项目(XAB2018B19)

through a variety of timing modes, so as to realize precision time service. It is expected that the static timing accuracy will reach the sub-nanosecond level. According to different application scenarios, users can select precise point positioning (PPP) timing mode or real-time kinematic timing mode to complete the time service process. The tests showed that when the user adopts PPP timing mode or real-time kinematic timing mode, the prototype system can provide time service with precision better than 1 ns. Compared with the traditional GNSS-based time service technology, the system improves the time service precision by 1~2 orders of magnitude.

Key words: international GNSS Monitoring and Assessment System (iGMAS); sub-nanosecond; time service; real-time; UTC (NTSC)

0 引言

时间是自然界中基本物理量之一^[1],高精度的时间服务攸关国家安全,也是国计民生中不可或缺的一部分。时间服务系统需溯源至国家标准时间,这是国际电信联盟对时间服务系统的要求^[2]。由中国科学院国家授时中心负责产生、保持和发播的 UTC (NTSC) (coordinated universal time, UTC; National Time Service Center, NTSC) 是我国的国家标准时间,也是国际标准时间 UTC 在我国的物理实现之一^[3]。目前,GNSS 授时因其 10~50 ns 较高的时间服务精度,广泛的信号覆盖,已成为使用最多的时间服务技术之一。

科学研究、工业应用等领域的快速发展对时间服务提出了更高的要求,精度从纳秒级逐步到亚纳秒级,时效性从事后到实时。目前已有的时间服务精度以及事后的工作模式已无法满足需求。因此,越来越多的机构和学者致力于研究高精度的、实时的时间服务系统。

2012年,Xu Longxia 等^[2]提出了基于共视原理的卫星授时方法,基于该方法可获得优于 5 ns 的实时时间服务精度,该系统包括地面监测站、上行注入站、通信卫星等组成部分。2015年,欧盟^[3-4]发起了“Horizon 2020”研究计划,并设计了“时间监测与控制”模块。该模块下,服务端利用事后 PPP (precise point positioning) 技术每小时向用户发送用户钟和 UTC (k) 之间的时间偏差。由于利用了事后 PPP 技术,该模块提供的时间服务滞后 1 h。2019年,Guo Wenfei 等^[5]搭建并测试了高精度实时 GNSS 单向授时系统,该系统基于一个新的时间参考实现,而不是国家标准时间,该系统输出了天稳优于 1 ns 的 1 PPS 信号。2021年,Wu Meifang 等^[6]研究并搭建了基于 UTC 的单向 GNSS 时间服务系统,该系统基于 PPP 技术实现,因此,只能为用户提供单一的定时模式。

UTC (NTSC) 是我国国家标准时间,为时间服务提供基准。国际 GNSS 监测评估系统 (international GNSS Monitoring and Assessment System, iGMAS) 是我国倡导和建立的一套系统^[7],旨在建立 GNSS 全球跟踪网,并生成各类高精度产品,例如精密星历、卫星钟差等,服务于科学研究和各类应用。本文利用 UTC (NTSC) 物理信号和 iGMAS 提供的数据及相关产品,设计并实现了亚纳秒级实时时间服务系统。基于该系统,用户可根据自身需求,选择 PPP 或实时动态这两种不同的定时解算模式,以获得亚纳秒级的实时国家标准时间服务。与此同时,该系统实现简便,利于推广应用。

1 系统原理

如图 1 所示,基于 iGMAS 的亚纳秒级时间服务系统包括卫星端、服务端、用户端和通信网络。外接 UTC (NTSC) 信号的基准站、iGMAS 跟踪网、国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 跟踪网和数据分析处理中心共同构成了服务端。用户端由 GNSS 接收机和定时解算模块构成。系统基本原理为:以 iGMAS 作为平台,建立 GNSS 与 UTC (NTSC) 的紧密联系,用户通过多种定时模式,实时获得本地时钟与 UTC (NTSC) 的偏差,从而实现精密时间服务,预期静态时间服务精度达到亚纳秒量级。

根据用户站与基准站间形成的长度不同的基线,用户端可选择 PPP 定时模式或实时动态定时模式,解算本地钟与国家标准时间 UTC (NTSC) 的钟差,以完成时间服务过程。

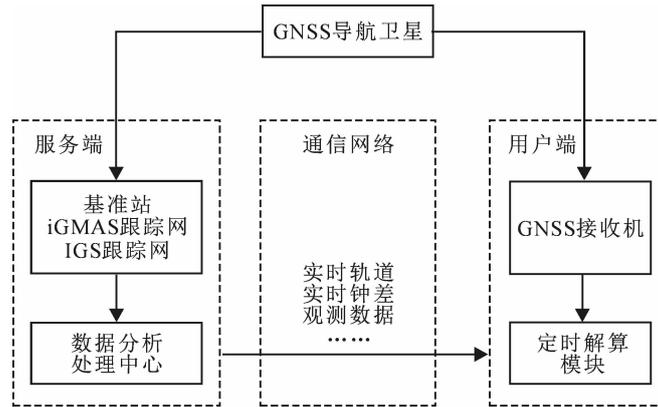


图 1 基于 iGMAS 的亚纳秒级实时时间服务系统工作原理

1.1 服务端

从图 1 可知,当用户端采用 PPP 定时模式时,以 UTC(NTSC)为参考的,高精度实时卫星钟差产品是基于 iGMAS 的亚纳秒级实时时间服务系统实现的关键前提保证。当前部分 iGMAS 和 IGS 分析中心已经实现了厘米级实时卫星轨道(MEO/IGSO 卫星)和百皮秒级实时卫星钟差产品的产生与播发^[8]。但是,实时卫星钟差产品存在两方面不足:① 卫星钟差产品的参考基准不连续、不固定,只能用来进行定位(基准偏差被接收机钟差吸收),不能用于定时;② 基于实时流产生与播发,对网络通讯依赖性较大,可靠性较差^[9]。因此,高精度的以 UTC(NTSC)为参考时间的实时钟差是该系统实现的基础。

基于 iGMAS 的亚纳秒级实时时间服务系统采用了基于高频观测文件拼接的实时钟差确定方法生成高精度实时钟差,且该实时钟差的参考时间为 UTC(NTSC)。一方面,以 UTC(NTSC)为基准的实时钟差产品克服了由于钟差产品基准不连续而导致的时间服务结果不连续的问题,另一方面利用高频观测文件实现实时钟差算法,而不是常用的实时观测数据流,使实时钟差产品的可靠性和可用性得到提高。基于高频观测文件拼接的实时钟差确定算法,在钟差估计的基础上进行超短期钟差预报,以确定实时卫星钟差。目前 iGMAS 和 IGS 提供的观测文件,根据时长,可分为天文件、小时文件和 15 min 文件。天文件时延太长,因此,基于高频观测文件拼接的实时钟差确定方法可根据更新周期选择小时文件或 15 min 文件。

基于高频观测文件拼接的实时钟差确定算法充分考虑时钟建模,采用 15 min 或小时更新的文件形式观测数据生成实时精密钟差产品,并利用外接 UTC(NTSC)主钟 1 PPS 和 10 MHz 信号的接收机,将钟差产品的参考时间固定为 UTC(NTSC)。根据卫星钟的运行特性进行建模,进而实施卫星钟差超短期预报,采用文件的形式向用户播发。

在星钟差解算的过程中,首先,设置外接 UTC(NTSC)信号的基准接收机,需精确测量连接链路的设备时延。其次,实时星钟差解算时,包含基准接收机数据,并将基准接收机固定为卫星钟差基准,解算其他各星钟相对于该基准的钟差。此时,生成以 UTC(NTSC)为参考时间的卫星钟差。

另外,基于高频观测文件拼接的实时钟差确定算法还包括超短期钟差预报。数据质量控制是钟差预报中不可或缺的部分,例如:粗差探测及修复、钟跳探测及修复^[10-11]等。由于生成的实时钟差更新频率较快,系统采用了 Huang Guanwen 等^[12]提出的自适应钟差预报模型进行超短期预报,此处不再赘述。

钟差预报生成了高精度的文件格式的实时钟差产品。为了满足实时用户需求,可将其生成状态空间表示(state space representation, SSR)格式的广播星历改正数,并通过 BNC 软件播发。需要明确的是,广播星历钟差并没有修正相对论效应,而生成的文件格式的实时钟差产品已精确修正相对论效应,因此需要将其二者相匹配后再进行播发。

1.2 用户端

考虑到不同用户站与基准站间形成基线长度各异,基于 iGMAS 的亚纳秒级实时时间服务系统设计时,

在用户端提供两种定时模式。当基线较长时,用户端利用 PPP 定时模式,解算本地钟与 UTC(NTSC)的钟差,完成时间服务过程。当基线较短时,用户端利用实时动态模式,解算本地钟与 UTC(NTSC)的钟差。

1.2.1 PPP 定时模式

服务端将基于 UTC(NTSC)的实时卫星钟差广播至用户端。用户端接收实时卫星钟差产品、实时卫星轨道、测站坐标等,利用式(1)和(2),基于非差消电离组合,生成用户端本地钟相对于 UTC(NTSC)的时间偏差,完成时间服务。

$$t_k(i) = \frac{\lambda\Phi_k^j(i)}{c} - \frac{\rho_k^j(i)}{c} + t^j(i) - \frac{\delta\rho_{k,\text{trop}}^j}{c} - \frac{\lambda N_k^j}{c} - \epsilon_{k,\Phi}^j(i), \quad (1)$$

$$t_k(i) = \frac{P_k^j(i)}{c} - \frac{\rho_k^j(i)}{c} + t^j(i) - \frac{\delta\rho_{k,\text{trop}}^j}{c} - \epsilon_{k,P}^j(i), \quad (2)$$

式(1)和(2)中: k 为测站号; j 为卫星号; i 为相应的观测历元; c 为真空中光速; t_k 为接收机钟差; t^j 为卫星钟差; $\delta\rho_{k,\text{trop}}^j$ 为对流层延迟影响; $\epsilon_{k,\Phi}^j$ 、 $\epsilon_{k,P}^j$ 为多路径、观测噪声等未模型化的误差影响; P_k^j 、 Φ_k^j 为相应卫星、测站和历元的消除了电离层影响的伪码距、载波相位组合观测值; λ 为相应的波长; ρ_k^j 为信号发射时刻的卫星位置到接收机位置之间的几何距离。

1.2.2 实时动态定时模式

实时动态定时模式借鉴了实时动态(real-time kinematic, RTK)定位思想,在基线较短(通常小于 100 km)的情况下,利用码伪距和载波相位观测值,用户站和基准站之间进行站间单差,得到用户站本地钟与基准时间之间的时间偏差,从而实现定时。实时动态定时模式有 3 个显著优势:① 仅使用广播星历,不再依赖实时精密轨道和钟差产品;② 因为使用了载波相位观测值,可达到亚纳秒的定时精度;③ 该方法所需收敛时间较短,且原理简单并易于实现。

基准站接收机和用户站接收机均实时接收 GNSS 伪距和相位观测数据,如式(3)和(4)所示。

$$P_k^j(t) = \rho_k^j(t) + c(t_k(t) - t^j(t)) + T_k^j(t) + I_k^j(t) + \xi_{k,P}^j, \quad (3)$$

$$L_k^j(t) = \rho_k^j(t) + c(t_k(t) - t^j(t)) + T_k^j(t) - I_k^j(t) + \lambda N_k^j + \xi_{k,L}^j, \quad (4)$$

式(3)和(4)中: T_k^j 为对流层延迟, I_k^j 为电离层延迟, $\xi_{k,P}^j$ 、 $\xi_{k,L}^j$ 为未模型化的误差, P_k^j 、 L_k^j 为伪距和相位观测值, N_k^j 为相位模糊度,其他变量含义同式(1)和(2)。

基准站将接收到的 GNSS 观测数据通过网络实时转发给用户端定时模块。用户端定时模块将用户端观测数据与基准站观测数据做站间单差,如式(5)和(6)所示。

$$P_{1,2}^j(t) = \rho_{1,2}^j(t) + c t_{1,2}(t) + \xi_{1,2,P}^j, \quad (5)$$

$$L_{1,2}^j(t) = \rho_{1,2}^j(t) + c t_{1,2}(t) + \lambda N_{1,2}^j + \xi_{1,2,L}^j, \quad (6)$$

式(5)和(6)中: $P_{1,2}^j(t)$ 为基准站和用户站的单差伪距观测值; $L_{1,2}^j(t)$ 为单差相位观测值; $\rho_{1,2}^j(t)$ 为两站几何距离差; $N_{1,2}^j$ 为单差载波相位模糊度; $t_{1,2}(t)$ 为用户站和基准站的钟差。

由式(5)和(6)可知,站间单差观测值中消除了卫星端相关误差项,例如卫星钟差、卫星端硬件延迟等。当两测站间基线较短(例如 30 km 以内),空间相关性较强的误差项,例如,电离层延迟、对流层延迟等也可忽略。但是,接收机天线相位中心需要修正。

式(5)和(6)中, $P_{1,2}^j(t)$ 和 $L_{1,2}^j(t)$ 为已知观测值。当精密测定用户站坐标时,结合广播星历, $\rho_{1,2}^j(t)$ 为已知量。可对未知量 $N_{1,2}^j$ 、 $t_{1,2}(t)$ 进行参数估计。由于基准站外接 UTC(NTSC),即可获得本地时间与标准时间的偏差。

2 系统设计

我国国家标准时间 UTC(NTSC)中长期稳定度为 $10^{-15} \sim 10^{-16}$ 量级^[2],由国家授时中心负责产生、保持和发播。与此同时,国家授时中心还拥有 iGMAS 跟踪站之一、iGMAS 分析中心和数据中心之一,为基于

iGMAS 的亚纳秒级实时时间服务系统的搭建提供了便利条件。

如图 2 所示,跟踪网、分析处理服务平台、播发平台及用户平台共同构成了基于 iGMAS 的亚纳秒级实时时间服务原型系统。其中,分析处理服务平台有服务器及分析处理软件;播发平台包括 CASTER、BNC 等软件;用户平台包括全球分布的各种类型的接收机;跟踪网包括 IGS/iGMAS 跟踪站,以及外接 UTC (NTSC)的基准站。

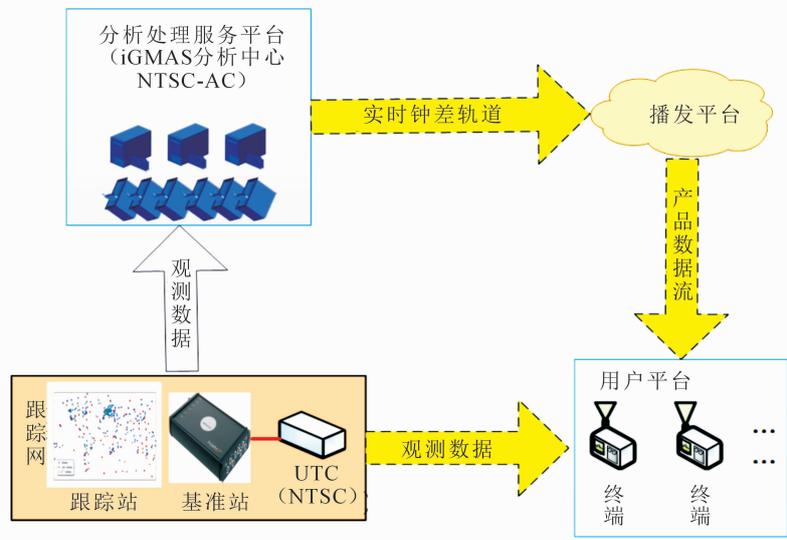


图 2 基于 iGMAS 的亚纳秒级实时时间服务原型系统

外接 UTC(NTSC)信号的基准站设置于国家授时中心,记为 XIA6,并精密测定连接链路时延。根据用户站与基准站形成的基线长度不同,设计 PPP 和实时动态两种定时模式。基准站及用户站信息如表 1 所示。

表 1 基准站与用户站信息表

测站类别	测站名称	测站位置	接收机类型	天线类型	基线长度	定时模式
基准站	XIA6	临潼	Septentrio Polarx5TR	SEPCHOKE_B3E6	/	/
用户站	XIA9	西安	Trimble NetR9	TRM59800	3 m	实时动态
用户站	CAP1	西安	Trimble NetR9	TRM59800	32.7 km	PPP/实时动态
用户站	BRUX	Brussels	Septentrio Polarx5TR	JAVRINGANT_DM	7 537.4 km	PPP
用户站	WTZR	Wetzell	LEICA GR25	LEIAR25. R3	7 184.5 km	PPP

当用户端采用 PPP 定时模式时,系统流程为:

- ① 基准站接收机接入 UTC(NTSC)物理信号,包括 1 PPS 和 10 MHz,需精密测量连接链路时延;
- ② 利用 iGMAS/IGS 发布的小时观测文件,分析处理平台生成实时轨道及基于 UTC(NTSC)的实时星钟差产品;
- ③ 播发平台归算实时钟差和轨道改正数,并利用 CASTER 软件,将其播发给用户测试平台,实时改正数记为 TEST0;
- ④ 用户测试平台一方面接收 TEST0 改正数,另一方面获取实时观测数据和广播星历,基于 PPP 模式,计算本地站钟与 UTC(NTSC)的时间偏差。

当用户端采用实时动态定时模式时,系统流程如下:

- ① 基准站接收机接入 UTC(NTSC)物理信号,包括 1 PPS 和 10 MHz,需精密测量连接链路时延;

- ② XIA6 将观测数据发送至各用户站;
- ③ 各用户站利用收到的 XIA6 观测数据和自身观测数据,做站间差分;
- ④ 结合广播星历,解算用户站本地时钟与基准站 UTC(NTSC)的偏差,完成定时。

3 系统测试

利用 iGMAS 或 IGS 发布的快速钟差和轨道产品, GPS PPP 站间时间比对精度(标准差)可达 0.1 ns 。因此,可利用其作为“真值”来评估原型系统提供的实时时间服务精度。本文采用基准站和各用户站之间的事后 PPP 时间传递结果,对原型系统展开评估。评估步骤如下:

① 原型系统利用 PPP 和实时动态两种定时模式,分别提供时间服务,用户站归算本地钟与 UTC(NTSC)的时间偏差;

② 基于 iGMAS 或 IGS 发布的快速钟差和轨道产品,利用 PPP 手段,生成用户站与基准站之间的链路时间比对结果。基准站外接 UTC(NTSC)信号,因此,用户站与基准站之间的链路结果即为用户站与 UTC(NTSC)的事后时间比对结果;

③ 结果①和结果②做差,并进行统计,即为原型系统时间服务精度评估结果。

通常,授时误差包含 A 类不确定度和 B 类不确定度。A 类不确定度也称为抖动,常用标准差表示。B 类不确定,也称为偏差,可通过校准的方式扣除。在本文中,涉及的时间服务精度均指 A 类不确定度,采用标准差表示。

3.1 PPP 定时模式测试

依据评估方法,图 3 显示了用户测试平台中 3 个用户站 CAP1、WTZR 和 BRUX 年积日(day of year, DOY)2021-48/2021-54 共 7 d 的实时在线评估结果,其中, BRUX 在 DOY54 由于数据中断,没有结果。

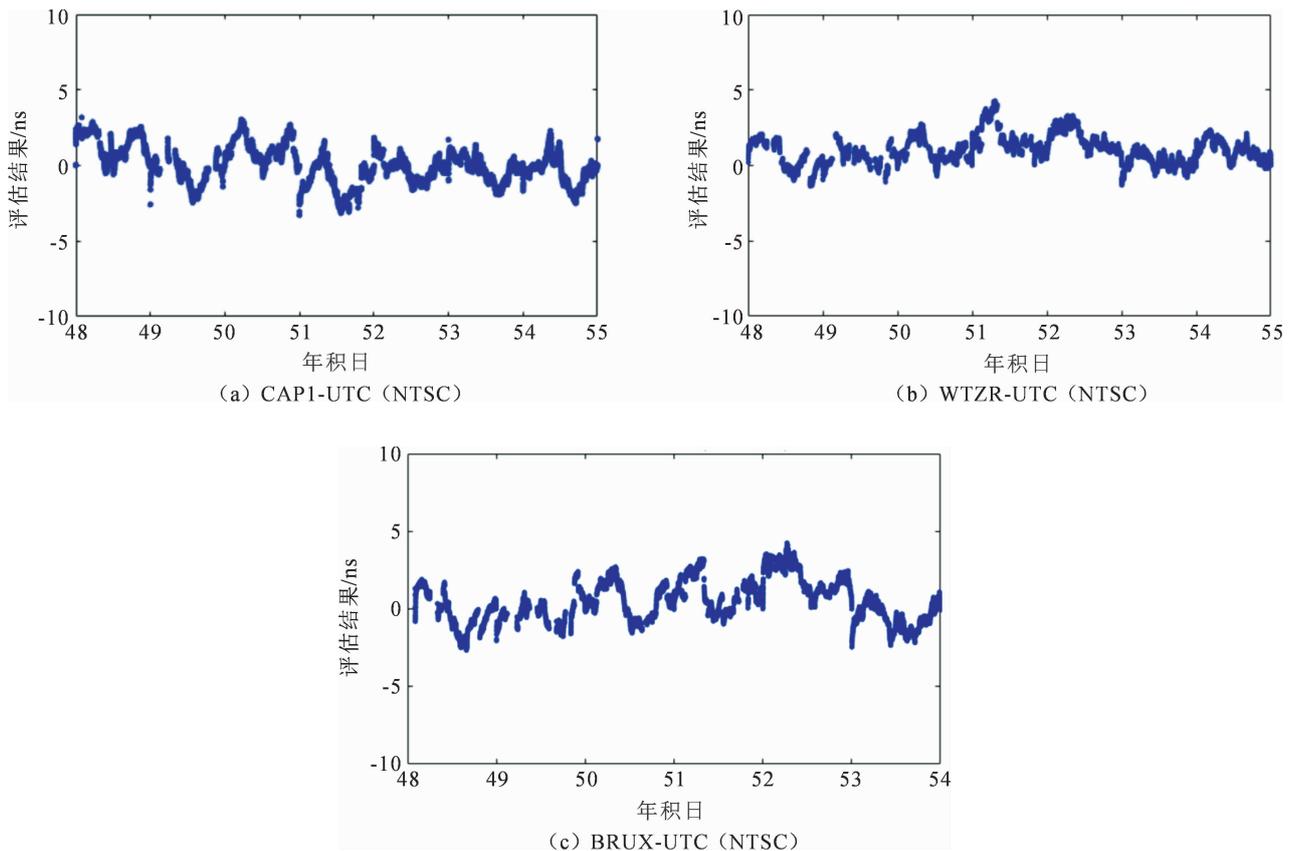


图3 原型系统各用户站连续7 d 时间服务精度评估结果(PPP 定时模式)

从图 3 可以看出,7 d 连续的评估结果显示,各用户站的时间服务评估精度为:CAP1 为 0.92 ns,WTZR 为 0.75 ns,BRUX 为 0.83 ns,各用户站起伏范围在 4 ns 以内。与此同时,WTZR 和 BRUX 所有天和 CAP1 绝大多数天的单天时间服务精度评估结果均优于 1 ns。

表 2 用户站连续 7 d 评估精度、平均多路径误差及与基准站形成的基线长度

用户站	评估精度/ns	多路径误差/m	基线长度/km
CAP1	0.92	0.48	32.7
WTZR	0.75	0.23	7 184.5
BRUX	0.83	0.31	7 537.4

对图 3 中各用户站时间服务精度评估结果进一步分析,包括各用户站多路径误差和各用户站与基准站形成的基线长度。如表 2 所示,各用户站评估精度与其多路径误差强相关。这是因为,原型系统采用 PPP 模式进行时间服务时,观测数据的多路径误差会影响 PPP 解算结果。而用户站与基准站之间形成的基线长度,对 PPP 模式影响甚微。从上述分析可以看出,原型系统时间服务精度的主要影响因素为用户站观测数据质量。另外,卫星钟差和轨道精度也是影响原型系统时间服务精度的一个重要因素。

3.2 实时动态定时模式测试

依据评估方法,图 4 显示了用户测试平台中使用实时动态定时模式的 2 个用户站 XIA9 和 CAP1 年积日 2021-122/2021-128 共 7 d 的实时在线评估结果。

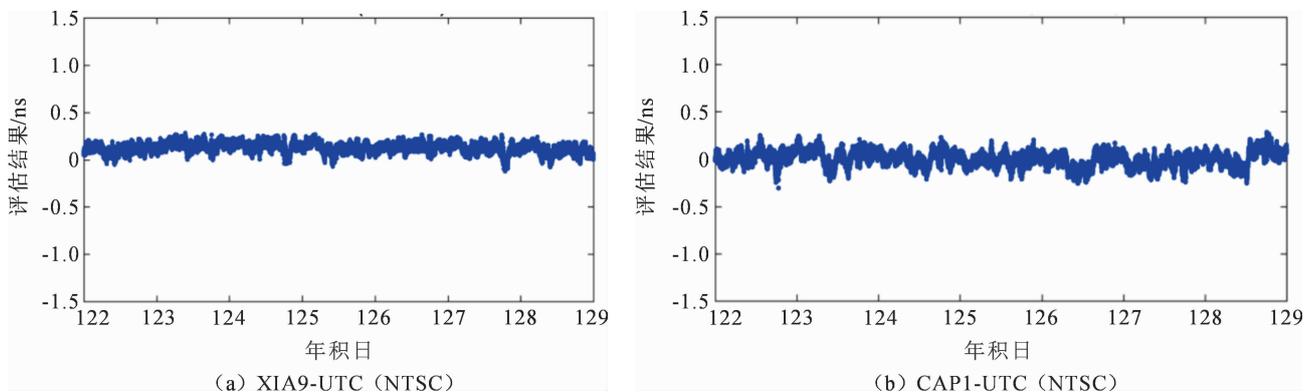


图 4 XIA9 和 CAP1 站连续 7 d 时间服务精度评估结果(实时动态定时模式)

如图 4 所示,利用实时动态定时模式获得时间服务结果与事后 PPP 时间传递结果符合较好。XIA9 和基准站 XIA6 形成超短基线,XIA9-UTC(NTSC)的评估结果在 0.5 ns 范围内波动,STD 为 0.09 ns,平均值为 0.098 ns。XIA6 和 XIA9 两台接收机天线相位中心修正值之差为 0.026 m,接近 XIA9-UTC(NTSC)的评估结果均值。CAP1 与 XIA6 形成短基线,CAP1-UTC(NTSC)时间服务结果,同样在 0.5 ns 以内起伏,STD 为 0.12 ns。利用实时动态定时模式完成时间服务时,评估结果起伏波动的主要原因可能为接收机天线相位中心修正误差。

另外,比较图 4 和图 3 中用户站 CAP1 分别利用 PPP 定时模式和实时动态定时模式进行时间服务的评估结果,CAP1 利用实时动态定时模式获得的时间服务精度明显优于利用 PPP 定时模式。其原因在于,一方面,实时动态定时模式完全消除了卫星钟差的影响,削弱了轨道误差的影响;另一方面,两测站间基线较短,电离层延迟和对流层延迟等误差项在一定范围可忽略不计。因此,当用户站与基准站形成基线较短时,应优先选择利用实时动态定时模式完成时间服务。

从图 3 和图 4 可知,用户端不论采用 PPP 定时模式,还是实时动态定时模式,原型系统均可提供亚纳秒级精度的实时时间服务。

4 结语

信息时代的快速发展对时间服务的精度和时效性提出了更高的要求,常规的几十纳秒到纳秒级的时间服务精度以及事后处理的工作模式已无法满足需求。针对上述问题,设计并搭建了基于 iGMAS 的亚纳秒级实时时间服务系统,详细阐述了其系统原理和组成。依据用户站和基准站形成不同长度的基线,在原型系统用户端部分创新性的集成设计了两种不同的定时模式,PPP 定时模式和实时动态定时模式。PPP 定时模式适用于大规模广域的高精度时间用户;而实时动态定时模式则可以满足分布范围不大的局域网用户的时间服务需求。

基于两种不同定时模式,对原型系统时间服务性能开展详细测试和分析。结果显示,原型系统可基于 PPP 定时模式或实时动态定时模式提供亚纳秒级精度的实时时间服务。与目前广泛应用的 GNSS 授时技术相比,基于 iGMAS 的亚纳秒级实时时间服务系统将实时时间服务精度提高了 1~2 个量级,可满足某些特定领域对时间服务的需求。

另外,本文仅基于 GPS 对原型系统时间服务精度进行测试。基于 BDS 的测试方案和结果还在进一步完善中。

参考文献:

- [1] 漆贯荣. 时间科学基础[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [2] XU Long-xia, LI Xiao-hui, XUE Yan-rong, et al. Study of a new one-way timing method[J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2012(55): 2476-2481.
- [3] TAVELLA P, SESIA I, GERRETTO G, et al. The Horizon 2020 DEMETRA project: DEMonstrator of EGNSS services based on Time Reference Architecture[C]//2015 IEEE Metrology for Aerospace (Metro Aero Space) Benevento: IEEE, 2015: 95-102.
- [4] HUANG W, DEFRAIGNE P, SILGNORILE G, et al. Improved multi-GNSS PPP software for upgrading the DEMETRA project time monitoring service[J]. Sensors, 2019, 19(20): 4389.
- [5] GUO Wen-fei, SONG Wei-wei, NIU Xiao-ji, et al. Foundation and performance evaluation of real-time GNSS high-precision one-way timing system[J]. GPS Solutions, 2019, 23(1): 23.
- [6] WU Mei-fang, SUN Bao-qi, WANG Yuan-xin, et al. Sub-nanosecond one-way real-time time service system based on UTC [J]. GPS Solutions, 2021, 25(2): 44.
- [7] GNSS 监测评估. 国际 GNSS 监测评估系统[EB/OL]. (2014-01-01)[2021-11-01] <http://www.igmas.org/Home/Index/homedetail.html>.
- [8] HADAS T, BOSY J. IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time[J]. GPS Solutions, 2015(19): 93-105.
- [9] LYU Yi-fei, ZHAO Qi-le, YANG Sheng, et al. Improved short-term clock prediction method for real-time positioning[J]. Sensors, 2017, 17(6): 1308.
- [10] DACH R, LUTZ S, WALSER P, et al. Bernese GNSS Software Version 5. 2[M]. Bern: Astronomical Institute, University of Bern, 2015.
- [11] TEUNISSEN PJG, MONTENBRUCK O. Springer handbook of global navigation satellite systems[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2015.
- [12] HUANG Guan-wen, ZHANG Qin, XU Guo-chang. Real-time clock offset prediction with an improved model[J]. GPS Solutions, 2014(18): 95-104.