

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.01.017

GNSS 超快速产品在全球标准时间复现中的应用

许龙霞^{1,2}, 樊多盛¹, 刘 娅¹, 陈瑞琼^{1,2}, 李孝辉^{1,2,3}

(1. 中国科学院国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600;

3. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 101048)

摘 要:为满足大跨度空间范围内的时间同步需求,对基于共视时间比对原理的标准时间复现系统进行改进,采用全视时间比对方法解决原系统应用基线受限的问题。考虑实时性的要求,使用全球卫星导航系统(GNSS)超快速产品(预测部分)提供卫星位置和卫星钟差,以尽可能消除广播星历和钟差对复现结果的影响。分析了常用的几家机构发布的GNSS超快速产品,并且结合复现系统的具体应用场景要求,研究了GNSS超快速产品的选择、下载和使用方法,以及使用时需要注意的关键问题,包括产品文件的更换以及产品的时间参考基准对标准时间复现的影响。

关键词:时间同步;GNSS超快速产品;共视时间比对;全视时间比对;钟驾驭

中图分类号:TN913.6

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2022)01-0134-07

Application of GNSS Ultra-rapid Products in Standard Time Reproduction

XU Long-xia^{1,2}, FAN Duo-sheng¹, LIU Ya¹, CHEN Rui-qiong^{1,2}, LI Xiao-hui^{1,2,3}

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

2. Key Laboratory of Precision Navigation and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

3. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101048, China)

Abstract: To meet the needs of time synchronization between long distances, the all-in-view time transfer technique is adopted to solve the problem of the common-view time transfer based standard time reproduction system being only effective in limited range. The GNSS ultra-rapid products (the prediction part) are used to provide the satellite positions and clock biases to eliminate the influence of ephemeris errors and clock errors on the reproduction results. This paper analyzes the different ultra-rapid products released by several institutes, and some methods are discussed to select, download and apply the ultra-rapid products in time reproduction. Besides, the influence of changing products of different institutes and the different time reference of clock biases on all-in-view based standard time reproduction are mainly discussed.

Key words: Time synchronization; GNSS ultra-rapid products; Common-view time transfer; All-in-view time transfer; Clock steering

收稿日期:2021-06-17; **修订日期:**2021-07-16

基金项目:国家自然科学基金面上项目(12073033);中国科学院西部青年学者项目(XAB2020YN07);中国科学院青年创新促进会项目(1188000XLX)

作者简介:许龙霞(1981-),女,博士,硕士生导师,主要从事授时方法与时间同步技术方面的研究。

0 引言

随着社会的进步和科学技术的发展,人们对时间同步精度的要求越来越高,天文观测、国防安全、基础科学、通信以及金融等相关领域均需要高精度的时间信息。目前,卫星导航系统的授时和时间同步技术应用范围较广^[1],时间精度需求在纳秒量级的用户,主要使用基于导航系统的共视时间比对^[2]、全视时间比对^[3]、基于通信卫星的双向时间比对^[4-5]以及光纤时间传递等手段。这几种方法主要适用于国际守时实验室之间的时间比对和卫星导航系统地面监测站之间的时间同步等少数特殊应用场景,不能满足计量校准、通信、仪器制造、金融和证券交易以及军事等各行业普通用户对标准时间频率信号的需求。

随着各行各业用户对高精度时间频率信号资源需求的增加,国内外的守时实验室均开发了基于导航卫星共视的时间比对服务^[4-6]。美国国家技术标准研究院(National Institute of Standard and Technology, NIST)较早建立了基于全球定位系统(Global Positioning System, GPS)共视比对的时间测量与分析服务系统^[4],可服务于任何需要保持精确本地时间的用户。该系统连续监测用户本地时间与 UTC(NIST)的偏差,每 10min 将监测结果通过互联网发送给用户。系统还可为用户提供基于铷钟和铯钟的可驯钟,为用户提供同步到标准时间 UTC(NIST)的时间频率信号,相当于在用户本地复现了国家标准时间。该系统的时间比对不确定度为 10ns,频率比对不确定度为 1×10^{-14} (1σ , 1 天平均)。英国国家物理实验室(National Physical Laboratory, NPL)也开发了类似的系统^[5],为用户提供溯源至标准时间 UTC(NPL)的时间校准服务,通过共视终端在用户本地复现出与 UTC(NPL)同步的时间频率信号,同时可以保证服务的完好性。该服务的时间比对不确定度为 10ns (1σ),频率不确定度为 5×10^{-14} (1σ , 1 天平均)。随着 Galileo 系统的逐步建设,欧洲在其 2010—2020 十年规划中提出建设基于 Galileo 和欧洲地球同步卫星导航增强服务系统(European Geostationary Navigation Overlay Service, EGNOS)的鲁棒授时与时间同步服务系统^[6]。已建成了基于 Galileo 和 EGNOS 的试验验证系统,该系统可以通过电视/广播、网络、光纤、通信卫星等链路发播时间同步服务,满足不同精度用户对时间的需求。

国内的中国计量研究院^[7]、航天科工 203 所和中国科学院国家授时中心^[8-10]也都研制了提供类似时间测量的服务系统。中国计量研究院研制的高准确度远程时间溯源系统,实现了用户与 UTC(NIM)的实时同步,时间偏差不超过 ± 20 ns。中国科学院国家授时中心研制了基于卫星共视比对的远程时间配送系统,开发了基于氢钟、铯钟、高性能铷钟、普通铷钟和恒温晶振等不同精度类型的配送终端。该系统 2000km 内的配送精度优于 5ns,目前用户已覆盖陕西、天津和北京,并与中兴通信合作计划将该系统应用于 5G 时间同步网。

基于卫星共视比对的时间复现系统主要包括基准终端、复现终端和数据处理中心三部分。基准终端以守时实验室的时间频率信号作为参考,接收全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)信号,监测导航系统时间与参考时间的偏差,以固定的间隔生成时差数据。复现终端以本地钟的时间频率信号作为参考,监测卫星导航系统时间与用户本地时间的偏差,按规定的间隔保存数据,完成一个测量周期后,基准终端和复现终端同时将观测数据发送至数据处理中心。基于 GNSS 共视的原理,根据基准终端和复现终端观测的共同卫星,计算当前观测周期用户钟本地时间与 UTC(NTSC)的时差值。将该时差值发送给用户本地钟,结合历史时差值计算调整量,驾驭终端内部时钟,输出与 UTC(NTSC)同步的 1PPS 和 10MHz 信号。

上述时间服务系统均是基于 GNSS 卫星共视比对原理实现的。共视时间传递方法的局限性在于共视比对精度受比对两地之间基线长度的限制,基线越长,两地共同可视的卫星数目越少,且星历误差和电离层延迟误差在卫星至比对两地方向的相关性越低,比对精度越差。因此,共视时间比对方法的固有缺陷制约了时间服务系统的服务范围,不适宜为超远距离用户提供时间服务^[11]。

1 基于 GNSS 超快速预报产品的标准时间全球复现原理

为解决基于卫星共视比对的时间复现系统的服务范围问题,需要从根本上改变时间比对方式。全视比对广泛应用于守时,实现了不同守时实验室原子钟间的时差精确测量。为尽可能消除星历和星钟误差对测量值的影响,一般使用最终精密星历和钟差产品,滞后实现任意守时实验室间钟差的测

量。复现系统采用全视比对方法,但是需要实时计算比对时差,以满足实时驾复现终端内部时钟的需求。考虑到实时的要求,在损失部分比对精度但满足复现终端性能指标的前提下,使用 GNSS 超快速预报产品实现。下面先介绍基于全视比对的标准时间复现方法,然后介绍超快速预报产品的具体使用方法。

基于全视比对的标准时间复现方法如图 1 所示,时间服务基准终端以守时实验室时频信号作为参考输入,测量获得 GNSS 卫星观测数据。基于 GNSS 超快速产品(预测部分)提供的轨道与钟差数据,通过多项式内插得到观测时刻的卫星位置和钟差,精确改正星历误差和星钟误差。基于双频观测值确定电离层延迟改正值,采用经验模型改正对流层延迟。此外,还需进行 Sagnac 效应改正、卫星天线相位中心改正及卫星硬件延迟改正。

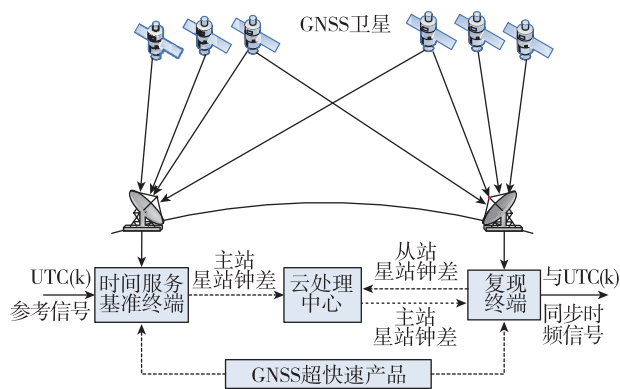


图 1 基于全视比对的标准时间复现方法

Fig. 1 Comparison of ultra-rapid products of different institutes

接收机端进行硬件延迟改正、天线电缆延迟改正和参考信号延迟改正。结合内部计数器模块测得外部参考信号与接收机 1PPS 的时差,得到当前历元参考信号与可视卫星之间的钟差。对同一历元卫星钟差按高度角加权,得到基准端在当前历元的全视星站钟差,简称为主站星站钟差。

复现终端以晶振或原子钟输出的时频信号为参考,通过观测 GNSS 卫星,同理获得终端本地时间与可视卫星时间之间的钟差,经加权综合,得到从站星站钟差。

主从站星站钟差均发送到云处理中心,通过配置主从站点,实现基准终端与复现终端、复现终端之间的任意配对,完成数据转发。复现终端实时接

收基准终端的星站钟差并计算校准量,根据校准量计算驾复参数,控制复现终端内部时钟,使其输出与 UTC(k) 同步的时间频率信号。

主从星站钟差为本地时间与超快速产品钟差参考时间基准的差值,互差计算校准量的过程中,消除了产品参考时间基准的影响,得到 UTC(k) 与复现终端本地时间的差值。因此,只要保证基准终端和复现终端在同一时刻使用相同的超快速产品即可。

从上述过程可以看出,由于不需约束基准终端和复现终端必须同时可视相同卫星,该方法复现的时频信号精度与距离无关。目前,国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS) 和国际 GNSS 监测评估系统(International GNSS Monitoring & Assessment System, iGMAS) 产品综合中心以及多家数据分析中心都发布了卫星导航系统的超快速轨道和钟差产品。

2 GNSS 超快速产品特点分析与使用

IGS 和 iGMAS 等机构提供了多种类型的数据产品,可满足事后和实时应用,最终产品多用于事后数据处理和精密分析。对于实时应用,目前有超快速预报产品和实时数据流产品可用。设计要求复现终端输出时间信号的精度优于 5ns,主要受时间比对和钟驾的影响。对于复现终端内部不同类型的时钟,设计的控钟算法可以将钟驾误差控制在 1ns 以内。因此,要求时间比对精度优于 5ns,分解到星历和星钟,要求这两部分误差控制在 3ns 以内。

实时数据流采用互联网国际海运事业无线电技术委员会(Radio Technical Commission for Maritime services, RTCM) 制定的网络传输协议(Networked Transport of RTCM via Internet Protocol, NTRIP) 格式播发,实时数据接收受限于网络通信的影响,可能存在数据延迟或中断。轨道精度优于 5cm,钟差精度优于 0.3ns。超快速产品(预测部分)轨道优于 5cm,钟差优于 3ns,均为均方根值,以文件形式提前一天发布。不同分析中心发布超快速产品的更新间隔不同,有每 1h、每 6h、每天不等,每个文件至少包含一天的预测时长。鉴于实时数据流存在的问题,复现系统中采用超快速产品。实际应用中需要考虑产品文件是否按时上传,这是选择下载产品文件的首要条件,文件是否按时上传将直接影响实时应用。此外,文件下载速度和产品文件的大小等因素也要考虑。相同网络环境下获取国外分析中心产品文件的速度低于国内分析中心。

此外,为保证终端的长期稳定运行,解压后的产品文件占用硬盘空间大小也是需要关注的因素。

表 1 从文件大小、更新频度、产品覆盖的卫星导航系统等方面比较了欧洲定轨中心(Centre for Orbit Determination in Europe, CODE)、iGMAS、IGS

和武汉大学四家超快速产品,其中选用 CODE 预报一天的产品(.EPH_P 文件)、iGMAS 综合数据分析中心的超快速文件、IGS IGN 数据分析中心发布的 IGU 产品文件,以及武汉大学数据分析中心发布的小时超快速产品文件。

表 1 不同机构超快速产品特点对比

Tab. 1 Comparison of ultra-rapid products of different institutes

数据来源	更新频度	导航系统	文件大小	一天大小	数据时长	数据间隔	钟差轨道参考点
CODE	1 次/天	G/R/E	约 580KB	约 580KB	预测 1 天	15min/组	BRD/PCV;IGS14
IGS	4 次/天	G	约 500KB	约 2MB	观测 1 天+预报 1 天	15min/组	CMB/PCV;IGS14
WHU	24 次/天	G/R/C/E	约 4.5MB	约 108MB	观测 1 天+预报 1 天	5min/组	CoN/PCV;IGS14_2132
iGMAS	4 次/天	G/R/C/E	约 1.75MB	约 7MB	观测 1 天+预报 1 天	15min/组	CMB/PCV;IGS14_2148

2.1 产品文件无重叠时使用方法

以 CODE 发布的超快速产品为例,每天更新一个文件,数据时标为 GPS 时间(GPS Time, GPST)。CODE 发布两类轨道(含钟差)预测文件,一类为预测未来第 1 天的轨道钟差值,文件后缀为 EPH_P;另一类为预测未来第 2 天的轨道钟差值,文件后缀为 EPH_P2,选择使用第一类即可满足要求。

复现系统内部计算时标采用 UTC,因此终端输出观测数据时标转换为 UTC。图 2 给出了产品文件不重叠时的使用方法。考虑到 UTC 与 GPST 之间当前存在 18s 的闰秒,第一天的 .EPH_P 文件的最后一组数据时标为 UTC 23h:44m:42s,通过内插 15min 的轨道和钟差值,可以得到截止 UTC 23h:59m:42s 之前时段的轨道和钟差值。第二天的产品文件的第一组数据时标为第一天的 UTC 23h:59m:42s,通过内插可以得到第一天自 UTC 23h:44m:42s 开始的轨道和钟差值。因此,相邻 2 天的产品文件在 UTC 23h:44m:42s~UTC 23h:59m:42s 期间均可用,可在此期间完成文件更换。

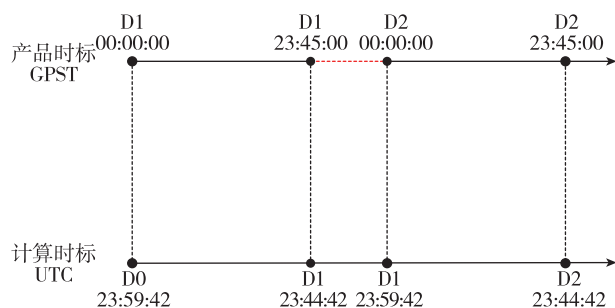


图 2 产品文件不重叠时的使用方法

Fig. 2 Method of usage with non-overlapping products files

CODE 超快速产品文件均是从当天 GPST 的零点到 23h:45m:00s,看似相邻文件之间不存在重叠,实际使用中通过内插可以将文件的有效使用时长向前、向后分别延长 15min。在相邻 2 天产品文件的延长重叠时段完成文件更新即可。

更换文件时间确定后,也就约束了产品文件的下载时间,要求第二天的产品文件在更换之前下载完成。实际中,为保证文件下载成功,超前于文件使用时刻 2h 启动下载,间隔一定的时间,如 5min,检测文件是否下载成功。

实际中,CODE 提前一天更新后一天的预测文件(周日更新的时间相对较晚),可以使用连续 2 天的超快速文件。采用 10 阶拉格朗日多项式对 15min 一组的卫星位置和钟差进行内插,内插的频度为每秒。因此,只需提前 1h15min 联合使用后天一天的超快速产品文件即可。

2.2 产品文件有重叠时使用方法

以 IGS 超快速产品为例说明,每天更新 4 次,每个文件的有效时长为 24h。为保证尽可能使用最新的、精度最高的数据,每天定时在文件更新后下载,下载成功后即更换使用新文件,每个文件的实际使用时长约 6h。

此情况相对简单,各文件之间数据存在重叠时段。图 3 所示为产品文件有重叠情况下的使用方法,箭头所示为产品文件的下载时刻,滞后 3h 更新。更新后即下载,下载成功后使用当前文件中的最近 6h 数据;等下一个文件上传后,再下载使用最新文件中的 6h 数据,依次类推。

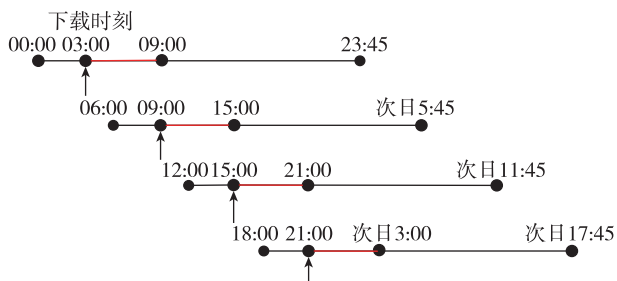


图 3 产品文件重叠时的使用方法

Fig. 3 Method of usage with overlapping products files

2.3 产品文件备用下载

实际应用中,为防止单一数据源产品文件上传不及时,除了主用下载地址外,还要设置至少 1 个备用下载地址。在主用下载地址数据失效前切换使用备用地址下载产品文件,当主用地址文件更新后及时切换回来。

此外,主用与备用数据源的时间参考基准要保持一致,这样才能在切换使用备用地址产品文件后,获得与主用地址一致性较好的数据,避免出现阶跃式跳变。

此外,IGS 与 iGMAS 提供的 GNSS 产品的数据时标不同,IGS 超快速产品时标为 GPST,超前 UTC 18s; iGMAS 超快速产品时标为 BDT,超前 UTC 4s。而观测数据以 UTC 为时标,在使用不同机构的产品数据时,需要考虑不同产品的时标转换问题。

3 GNSS 超快速预报产品的钟差参考基准

在解算 GNSS 超快速产品时,数据分析和产品综合中心对钟差参考基准的处理策略不同。

数据分析中心解算钟差的策略是先固定某一参考钟(可以为卫星钟或接收机钟),再确定其他接收机和卫星与参考钟的相对钟差。固定参考钟后,卫星绝对钟差相对于参考钟绝对钟差的差值即为相对钟差,产品文件中的钟差均为相对钟差^[12]。因此,各数据分析中心的钟差产品与选定的卫星钟和接收机钟的变化趋势一致。

产品综合中心接收各数据分析中心解算的钟差解,将各数据分析中心的钟差参考基准统一到广播星历的钟差参考基准或地面保持的时间尺度后,如 IGST,再进行加权综合。使用一次多项式模型表征不同数据分析中心参考基准相对于广播星历钟差参考基准的偏差^[12-13]。因此,产品综合中心钟差产品的参考基准与选定的参考基准变化一致。

在严格控制主从站在相同时刻使用同一产品文件的情况下,可以忽略产品钟差参考基准对校准量的影响。但实际中,由于数据处理速度的影响,大部分情况下无法实现严格的同步,造成校准量出现跳变。而实时钟驾驭对校准量的变化非常敏感,为尽可能降低钟差产品参考基准对复现时频信号的影响,要求产品参考基准尽可能变化平稳。下面以武汉大学的产品为例,说明主从站使用产品精确同步与不同步情况下对复现结果的影响。

3.1 主从站使用超快速产品精确同步下钟差参考对钟驾驭的影响

测试时段:主从站近零基线,2021.4.25 4:00~2021.4.26 7:00,共 27h。

测试站点:22 号站为基准终端,简称主站,工作在测量模式;23 号站为复现终端,简称从站,工作在驾驭模块模式^[14]。主站外接 UTC(NTSC)时频信号,测得星站钟差为 UTC(NTSC)与超快速产品的钟差参考时间的偏差。

星站钟差获取方式:GPS 全视(All-in-View, AV)。

超快产品来源:使用武汉大学 IGS 数据分析中心的超快速产品,每 1h 更新一个数据文件。实际使用中为减少数据下载频度,每 6h 下载一次,使用最新的数据文件。

从图 4 可以看出,由于钟差产品的参考时间存在单向变化,导致主站的全视星站钟差存在单向漂移。因 UTC(NTSC)变化平稳,可初步推算该产品钟差参考基准一天漂移约 26ns,对应频偏约为 $26\text{ns}/86400\text{s}=3\times 10^{-13}\text{s/s}$ 。

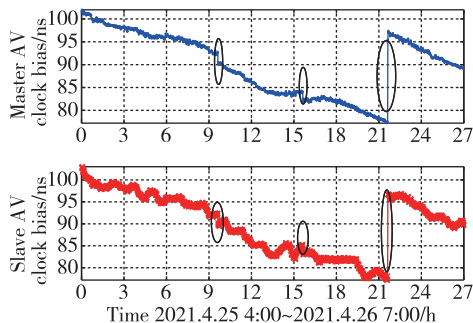


图 4 主从站星站钟差数据

Fig. 4 Clock bias of master and slave stations

在主从站通信网络理想、两站下载和使用数据产品的时刻严格同步时,主站和从站星站钟差同时发生跳变,如图 4 所示。数据交换后,对应时刻的校

准量无跳变,对实时钟驾驭无影响,如图 5 所示。

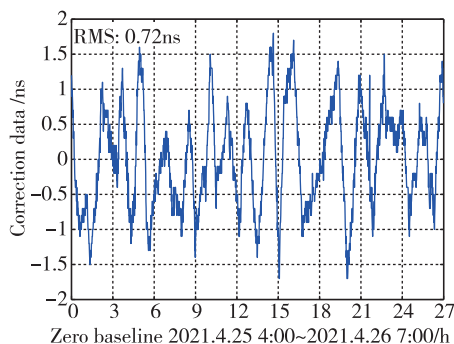


图 5 主从站同步下的校准数据

Fig. 5 Correction data when master-slave stations are synchronized

从站星站钟差变化的总体趋势与主站一致,不同的是其局部变化相对波动大,主要受钟驾驭策略的影响。

3.2 主从站使用超快速产品不同步下钟差参考对钟驾驭的影响

测试时段:主从站近零基线,2021.4.21 9:00~2021.4.22 2:00,共 17h。

测试站点:22 号站为基准终端,简称主站,工作在测量模式;23 号站为复现终端,简称从站,工作在驾驭铷模块模式。

星站钟差获取方式:GPS 全视(AV)。

超快产品来源:武汉大学 IGS 数据分析中心。

图 6 所示为主从站使用产品文件不同步时的星站钟差值。从图 6 可以看出,在新产品文件更新时,从站使用新文件的时刻滞后于主站使用新文件的时刻,导致两者校准数据在延迟时段内出现二十几纳秒的跳变,如图 7 所示。

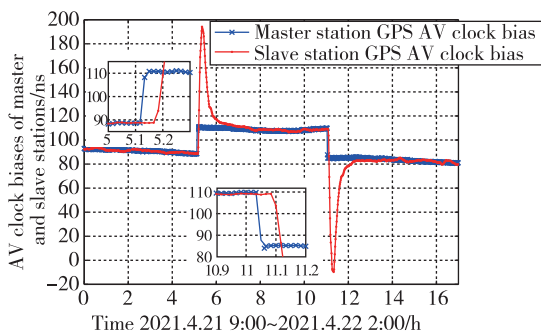


图 6 主从站星站钟差

Fig. 6 Clock biases of master station and slave station

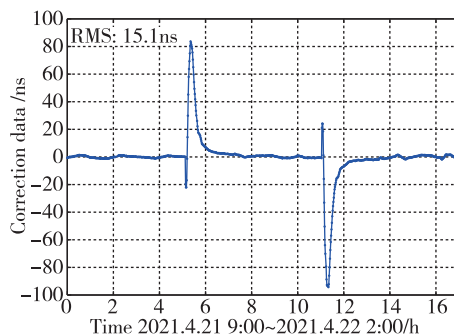


图 7 主从站不同步下的校准数据

Fig. 7 Correction data when master-slave stations are nonsynchronized

该跳变量直接影响计算的校准量,驾驭算法对校准量的阶跃式变化非常敏感,快速调整铷模块的频偏,发生过调现象。二十多纳秒的阶跃导致出现反向 80ns~100ns 的振荡,而后逐渐恢复到稳定状态。

从 3.1 节和 3.2 节的分析可以看出,在钟差产品参考时间不平稳的情况下,主从站使用产品文件时刻不同步会对实时钟驾驭造成明显的影响。实际中,受处理速度等因素的影响,很难保证主从端严格同步。因此,在选择超快速产品文件时,钟差产品的参考基准是需要考虑的一个重要因素。

要求钟差产品的参考基准是驾驭后的,例如守时实验室的时间尺度,维持在恒定值,不能存在明显的频偏。例如,可以以卫星导航系统时间为参考,也可以以守时实验室保持的时间尺度为参考,还可以建立维持一个与守时实验室时间同步的时间尺度。

4 结论

在全视标准时间复现系统中,采用超快速产品实时改正卫星钟差和星历误差。基于基准端和复现端的星站钟差值计算校准量,实时驾驭终端内部时钟。本文详细讨论了超快速产品文件的使用方法和钟差参考基准对钟驾驭的影响,得出如下几点重要结论:

1)实时钟驾驭与事后处理差别较大,对超快速产品数据的质量要求非常高,应尽量避免校准数据中出现阶跃式变化。

2)可以提供超快速产品文件的机构较多,但并不是每家的产品都能满足钟驾驭的要求。选择产品时需要考虑产品的时间参考、产品的下载时间和使用时间等因素。

3)为满足工程应用,产品文件的大小、下载频率、下载时间等均是需要考虑的因素。此外,为保证运行的连续性和可靠性,应设置不止一个下载地址,且从主备地址获取的产品文件中的钟差数据要求具有相同的参考基准。

参考文献

- [1] Levine J. A review of time and frequency transfer methods[J]. *Metrologia*, 2008, 45(6): S162-S174.
- [2] 许龙霞. 基于共视原理的卫星授时方法[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
Xu Longxia. A new common-view based timing method[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012(in Chinese).
- [3] Petit G, Jiang Z. GPS all in view time transfer for TAI computation[J]. *Metrologia*, 2008, 45(1): 35-45.
- [4] Lombardi M A. Time measurement and analysis service [DB/OL]. [2009-02-10]. [2021-06-30]. <https://www.nist.gov/programs-projects/time-measurement-and-analysis-service-tmas>.
- [5] <http://www.npl.co.uk/science-technology/time-frequency/products-and-services/time/gps-common-view>.
- [6] Zelle H, Veerman H. European global navigation satellite system robust timing and synchronization service[C]// *Proceedings of the IEEE EFTF-IFCS*. IEEE, 2017.
- [7] 陈庆医. 基于参考端时标信号诊断和多数据融合的NIMDO系统改进[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
Chen Qingyi. Improvement of NIMDO system based on reference-time time-scale signal diagnosis and multi-data fusion[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019(in Chinese).
- [8] 刘娅, 陈瑞琼, 赵志雄, 等. UTC(NTSC)远程高精度复现方法研究及工程实现[J]. *时间频率学报*, 2016, 39(3): 178-192.
Liu Ya, Chen Ruiqiong, Zhao Zhixiong, et al. Research on high precision method for remotely reproducing UTC(NTSC) and its realization[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2016, 39(3): 178-192(in Chinese).
- [9] 陈瑞琼, 刘娅, 李孝辉. 一种基于高精度国家标准时间远程复现方法[J]. *武汉大学学报*, 2018, 43(2): 188-192.
Chen Ruiqiong, Liu Ya, Li Xiaohui. A method of national standard time high precision remote reproduction[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(2): 188-192(in Chinese).
- [10] 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 Ruiqiong, Liu Ya, Li Xiaohui. Study on remote time comparison based on improved satellite common-view method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(4): 757-763(in Chinese).
- [11] 杜畔. 基于卫星全视的国家标准时间复现方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
Du Pan. Research on national standard time recurrence method based on satellite all in view[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020(in Chinese).
- [12] 楼益栋, 施闯, 周小青, 等. GPS精密卫星钟差估计与分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2009, 34(1): 88-91.
Lou Yidong, Shi Chuang, Zhou Xiaoqing, et al. Realization and analysis of GPS precise clock products [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(1): 88-91(in Chinese).
- [13] 张东, 宋伟伟, 楼益栋, 等. 实时卫星钟差基准精化方法[J]. *全球定位系统*, 2019, 44(2): 21-28.
Zhang Dong, Song Weiwei, Lou Yidong, et al. The method of refining real-time satellite clock offset reference[J]. *GNSS World of China*, 2019, 44(2): 21-28(in Chinese).
- [14] 樊多盛, 刘娅, 李孝辉, 等. 基于卫星共视的钟驾驭方法研究[J]. *时间频率学报*, 2018, 41(4): 300-306.
Fan Duosheng, Liu Ya, Li Xiaohui, et al. Research on clock steering method based on satellite common view[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2018, 41(4): 300-306(in Chinese).

(编辑:孟彬)