

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.04.004

BDS-3 多种授时方法精度试验及比较分析

刘利, 王冬霞, 刘治君, 张天桥

(中国人民解放军 32021 部队, 北京 100094)

摘要:北斗卫星导航系统(BDS)本质上是一个高精度时间空间信息服务系统,是我国自主运行的重要空间基础设施。BDS-3已于2020年7月正式开通,向广大用户提供RNSS、SBAS、RDSS单向和RDSS双向等多种授时服务。针对BDS-3提供的各种授时服务进行了简要介绍,详细讨论了各种授时方法,并利用实测数据进行了试验验证和比较分析。结果表明,BDS-3授时服务精度全部优于公布的指标要求,其中精度最高的SBAS授时方法精度可达2ns左右,RDSS双向授时精度和RNSS授时精度相当,达到9ns左右,RDSS单向授时精度最差,在15~30ns左右。

关键词:北斗卫星导航系统;卫星无线电导航服务;星基增强服务;卫星无线电测定服务;授时
中图分类号:P228.4 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-8110(2021)04-0029-09

Precision Test and Comparative Analysis of BDS-3 Various Timing Methods

LIU Li, WANG Dong-xia, LIU Zhi-jun, ZHANG Tian-qiao

(32021 Troops of PLA, Beijing 100094, China)

Abstract: As an important space infrastructure of China, BeiDou navigation satellite system (BDS) is essentially a high-precision time and space service system. BeiDou global navigation satellite system (BDS-3) has been in operation since July 2020, which can provide various time services, such as RNSS, SBAS, RDSS one-way, RDSS two-way. This paper gives a brief introduction of BDS-3 time services, and discusses various time service methods in detail. Moreover, experimental verification and comparative analysis are carried out from measured data. The results show that the precision of BDS-3 time service is better than the given published index, where SBAS time service has the highest precision at about 2ns, the RDSS two-way time service and RNSS time service are consistent at about 9ns, and RDSS one-way time service is the worst ranging from 15ns to 30ns.

Key words: BeiDou navigation satellite system(BDS); Radio navigation satellite service(RNSS); Satellite-based augmentation service (SBAS); Radio determination satellite service (RDSS); Time service

0 引言

卫星导航定位授时的基本原理是利用卫星发播

的已知轨道与卫星钟差来确定用户的三维位置和一维钟差。从本质上看,卫星导航系统是一个全天候、大范围、高精度的时间空间信息服务系统。2020年7

收稿日期:2021-03-02;修订日期:2021-04-15

基金项目:国家自然科学基金(41874043,61603397,41704037)

作者简介:刘利(1975-),男,博士,正高级工程师,主要从事卫星导航信息处理方面的研究。

通信作者:王冬霞(1985-),女,博士,工程师,主要从事卫星导航信息处理方面的研究。

月31日,我国自主建设、独立运行的北斗三号全球卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS-3)正式开通,向广大用户提供卫星无线电导航服务(Radio Navigation Satellite Service, RNSS)、区域短报文通信(Regional Short Message Communication, RSMC)又称卫星无线电测定服务(Radio Determination Satellite Service, RDSS)、全球短报文通信(Global Short Message Communication, GSMC)、星基增强服务(Satellite-Based Augmentation Service, SBAS)、精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)和搜救(Search and Rescue, SAR)等多种服务^[1-2],使 BDS-3 成为世界上服务类型最多的卫星导航系统。根据不同授时服务模式, BDS-3 共包括 RNSS、SBAS、RDSS 单向和 RDSS 双向等主要授时方法。各类授时服务规划如表 1 所示^[1-3]。

表 1 BDS-3 授时服务规划
Tab. 1 BDS-3 time service plan

授时模式	服务精度 (95%)/ns	服务特点
RNSS 授时	20	仅需接收基本导航电文信息
SBAS 授时	—	需接收基本导航电文和 SBAS 电文信息
RDSS 单向授时	50	仅需接收 RDSS 电文信息
RDSS 双向授时	10	需发射入站申请,接收 RDSS 电文信息和中心站改正数

与国外卫星导航系统相比, BDS 具有很多自身的特点: 1) 在服务模式上, BDS 除提供 RNSS 服务外, 还同时向中国及周边地区用户提供 RDSS、SBAS 和 PPP 服务^[1-2]。 2) 在发播信号上, BDS 卫星同时发播 B1、B2 和 B3 这 3 个频点信号, 每个信号上均发播自己的导航电文信息, 用户可独立或组合使用各个信号^[1-2]。 3) 在星座构成上, BDS 采用了地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)、地球倾斜同步轨道和中圆地球轨道卫星构成的混合星座, 特别是 GEO 卫星的静地特性, 使得伪距观测量的多路径误差较大, 并且 GEO 卫星星历需要进行 5° 倾角转换。 4) 在时空基准上, BDS 早期的用户接口控制文件明确采用北斗时(BeiDou Time, BDT)和 2000 国家大地坐标系(China Geodetic Coordinate System 2000, CGCS 2000)作为时间、空间参考基准, 最新的用户接口控制文件全部修改为以 BDT 和北斗坐标系(BeiDou Coordinate System, BDCS)作为时间、空间参考基

准。BDT 是一种连续的原子时系统, 时间起点为协调世界时 2006 年 1 月 1 日 00:00:00, 比国际原子时慢 33s, 比全球定位系统(Global Positioning System, GPS)时慢 14s。在 BDS 的 RNSS 服务中, BDT 以整周计数和周内秒计数表示, 整周计数不超过 8192; 在 RDSS 服务中, BDT 以整年计数和年内分钟计数表示。BDCS 定义与 CGCS2000 一致, 均符合国际地球自转服务规范, 两者差异仅是参考框架点、维持方法与更新周期的不同。 5) 在基本导航电文定义上, BDS 的硬件延迟参考点为 B3 频点相位中心, 群时间延迟定义为 B1 或 B2 频点相对 B3 频点的延迟, 电离层延迟模型参数采用实测数据实时计算, 8 参数和 14 参数的引数为地理纬度, 9 参数的引数为地磁纬度^[4]。 6) 在星基增强电文定义上, BDS 一体化发播了卫星轨道改正数、卫星钟差改正数和格网电离层延迟改正数等广域差分电文, 以及区域用户距离精度(Regional User Range Accuracy, RURA)、用户差分距离误差(User Differential Range Error, UDRE)和格网点电离层垂直延迟改正数误差(Grid Ionospheric Vertical Error, GIVE)等完好性信息^[2, 5-6], 使用户可获得更可靠的定位导航授时服务。这一系列特殊性不仅使 BDS 在主控站数据处理上存在独特性, 而且在用户应用导航电文上与其他系统也存在本质不同。

本文主要针对新开通服务的 BDS-3 各种授时方法及授时精度进行讨论, 以期改变用户长期使用 GPS 的习惯, 消除因对 BDS 理解差异带来的实际使用问题, 为用户使用 BDS 各类授时服务提供技术参考。

1 BDS-3 多种授时方法

1.1 RNSS 授时方法

按照用户位置是否已知, RNSS 授时方法可分为已知点授时和未知点授时。用户一般采用已知点授时方法, 未知点授时通常与定位一并进行, 这里不再赘述, 直接给出普通单频用户在已知点上的单星授时计算模型为^[7-8]

$$c \cdot \Delta t_r = P_i^j(t_k) - \rho_i^j(t_k) + c \cdot \Delta t_s + c \cdot \tau_s^i - c \cdot \tau_r^i - \Delta D_{\text{trop}} - \Delta D_{\text{iono}}^i - \Delta D_{\text{rel}} - \Delta D_{\text{mult}} \quad (1)$$

式中: Δt_r 为用户钟差; c 为真空中的光速; $P_i^j(t_k)$ 为单频 i (i 表示 B1、B2、B3 这 3 个频点) 用户在 t_k 时刻观测卫星 j 的伪距观测量; $\rho_i^j(t_k)$ 为卫星发射信号到接收机在 t_k 时刻接收信号对应的空间

距离; Δt_s 为卫星钟差; τ_s^i 为卫星频点 i 的设备时延; τ_r^i 为接收机频点 i 的设备时延; ΔD_{trop} 为对流层延迟改正量; ΔD_{iono}^i 为频点 i 的电离层延迟改正量; ΔD_{rel} 为相对论改正项; ΔD_{mult} 为多路径效应改正项。

式(1)中, $\rho_i^j(t_k)$ 、 ΔD_{trop} 和 ΔD_{rel} 可以利用卫星发播的卫星星历和已知的用户坐标计算得到; ΔD_{iono}^i 可以利用卫星发播的单频电离层模型参数并结合卫星星历和用户坐标计算得到^[4,9-11]; Δt_s 可以利用卫星发播的卫星钟差参数计算得到^[2]; τ_r^i 和 τ_s^i 通常利用事先标定值进行计算; ΔD_{mult} 可以利用载波相位数据通过伪距噪声和多路径修正(Code Noise and Multipath Correction, CNMC)算法实时进行伪距多路径误差修正^[12]。最后, 如果用户同时观测多颗卫星和多个历元, 对同一时间多颗卫星的授时结果以及每个观测历元 t_k 获得的授时结果进行统计, 即可得到用户的最终统计授时结果。

对于双频用户来说, 与式(1)计算模型不同的是, 在数据处理时, 电离层延迟改正 ΔD_{iono}^i 采用双频伪距组合来消除, 但是同时需要扣除双频时间群延迟(Timing Group Delay, TGD)和内频间偏差(Inter-Frequency Bias, IFB)的影响^[4]。

1.2 SBAS 授时方法

SBAS 的核心思想是广域差分, 即在卫星发播的基本导航电文信息的基础上, 通过 GEO 卫星更快频度地发播卫星钟差改正参数、卫星轨道改正参数和格网电离层改正参数, 以实现更高精度的空间信号精度, 从而进一步提升用户定位授时精度。除了提升精度之外, SBAS 更重要的是发播了 UDRE 和 GIVE 等导航电文参数的完好性信息, 以满足民航等高安全用户需求。虽然 SBAS 重点强调的是定位精度和完好性, 北斗 SBAS 也没有给出明确的授时精度指标, 但是对于电力、通信、金融等涉及国家安全的命脉领域, 需要采用 SBAS 服务进行授时, 利用其发播的完好性信息来提高授时的安全性。

北斗 SBAS 用户的授时计算模型为

$$c \cdot \Delta t_r = P_i^j(t_k) - \rho_i^j(t_k) + c \cdot \Delta t_s + c \cdot \tau_s^i - c \cdot \tau_r^i - c \cdot \delta t_s^i - \Delta D_{\text{orb}} - \Delta D_{\text{trop}} - \Delta D_{\text{iono}}^{\text{ig}} - \Delta D_{\text{rel}} - \Delta D_{\text{mult}} \quad (2)$$

式中: δt_s^i 为频点 i 的卫星钟差改正数; ΔD_{orb} 为卫星轨道改正数; $\Delta D_{\text{iono}}^{\text{ig}}$ 为频点 i 的格网电离层延迟改正数。

与 RNSS 授时计算模型式(1)不同的是, 式(2)中的 δt_s^i 、 ΔD_{orb} 和 $\Delta D_{\text{iono}}^{\text{ig}}$ 可以分别利用 GEO 卫星

发播的卫星钟差改正参数、卫星轨道改正参数和格网电离层改正参数计算得到, 具体的计算模型详见文献[2], 这里不再赘述。可见, 经过 SBAS 发播的差分改正数修正, 进一步削弱了卫星钟差、卫星轨道和电离层延迟误差的影响, 用户授时精度比 RNSS 授时方法得到了进一步提升。需要说明的是, 对于民航应用, 用户接收机必须遵循国际民航组织的系列协议, 满足特定的技术状态要求, 否则用户 SBAS 定位授时精度将出现衰减。

同样, 对于北斗双频 SBAS 用户来说, 与式(2)授时计算模型不同的是, 在数据处理时, 格网电离层延迟改正 $\Delta D_{\text{iono}}^{\text{ig}}$ 采用双频组合来消除, 同时也需要扣除双频 TGD 和 IFB 的影响^[4]。

1.3 RDSS 单向授时方法

RDSS 单向授时是建立在 BDS 区域短报文通信服务基础上的一种授时方法, 其示意图如图 1 所示。

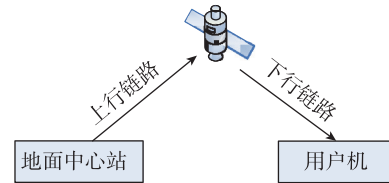


图 1 RDSS 单向授时示意图

Fig. 1 Schematic diagram of RDSS one-way time service

在 RDSS 单向授时模式下, 用户接收机只需接收中心站出站电文及相关信息, 由用户机利用单向测距值自主解算出相对 BDT 的钟差, 并修正本地时间, 从而实现本地时间与 BDT 同步^[13-14]。图 2 所示为 RDSS 单向授时原理图。

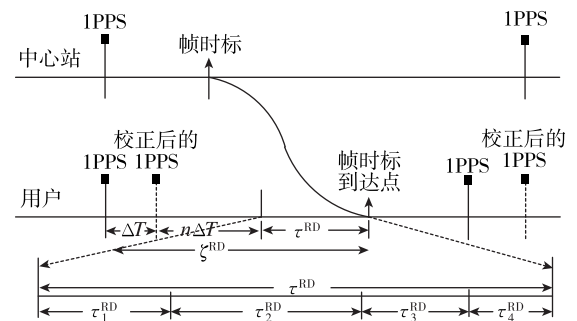


图 2 RDSS 单向授时原理图

Fig. 2 Principle diagram of RDSS one-way time service

图 2 中, 中心站 1PPS 代表 BDS 地面中心站 BDT 时间信号的某一整秒时刻, 用户 1PPS 代表用户接收机本地时钟的某一整秒时刻, 二者的钟差为

ΔT 。中心站在 BDT 时间基准的控制下向卫星发射周期性询问帧信号,该信号经 GEO 卫星转发后被用户接收,如果用户接收到中心站播发的第 n 帧询问信号,并测得单向传播时延 ξ^{RD} ,且 RDSS 帧周期为 Δt ,则第 n 帧询问信号参考时标与 BDT 对应的 1PPS 之间的时间间隔为 $n\Delta t$ 。然后,用户利用卫星发播的电文信息,计算出中心站到卫星的上行时延 τ_2^{RD} 和卫星到用户的下行时延 τ_3^{RD} ,再扣除事先预置的中心站发射设备时延 τ_1^{RD} 和接收机接收设备时延 τ_4^{RD} 。最后计算出用户本地时钟与 BDT 的钟差,从而完成整个单向授时过程。

根据上面授时原理,RDSS 单向授时计算模型可以表示为^[13-14]

$$\Delta T = \xi^{\text{RD}} - n\Delta t - (\tau_1^{\text{RD}} + \tau_2^{\text{RD}} + \tau_3^{\text{RD}} + \tau_4^{\text{RD}}) \quad (3)$$

可见,由于 RDSS 单向授时受到卫星星历误差、电离层和对流层大气传播误差、中心站发射设备时延误差、用户接收设备时延误差、用户机位置误差等诸多因素影响,难以准确计算。因此,RDSS 单向授时精度一般在几十纳秒左右。

虽然 BDS-3 与 BDS-2 的单向授时基本原理相同,但是在信号体制、数据处理和时延标校等方面均存在不少差异。总的来说,主要是:1)采用了新的信号体制,出站信号带宽更宽,使得测量精度更高;2)卫星星历精度更高,星历更新周期更短,外推误差更小;3)采用新的 BDSSH 电离层模型,相较于 BDS-2 采用的 8 参数或 14 参数模型精度更高,特别是在高纬度地区。

1.4 RDSS 双向授时方法

RDSS 双向授时是建立在区域短报文通信服务基础上的一种高精度授时方法,其示意图如图 3 所示^[13-15]。

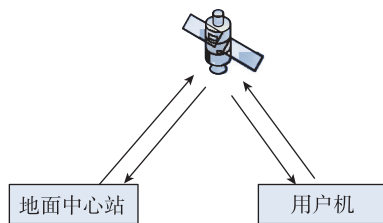


图 3 RDSS 双向授时示意图

Fig. 3 Schematic diagram of RDSS two-way time service

RDSS 双向授时方法利用差分思想,通过中心站接收用户 RDSS 入站信号测量得到的往返四程距离,计算出中心站到用户的正向传播时延,再将该正向传播时延通过 RDSS 链路发送给用户,由用户

进行差分修正授时,从而获得比 RDSS 单向授时更高精度的双向授时结果,满足了用户更高精度的授时需求。RDSS 双向授时与 RDSS 单向授时的差别在于用户接收机是否需要发射入站信号与中心站进行信息交互。图 4 所示为 RDSS 双向授时原理图。

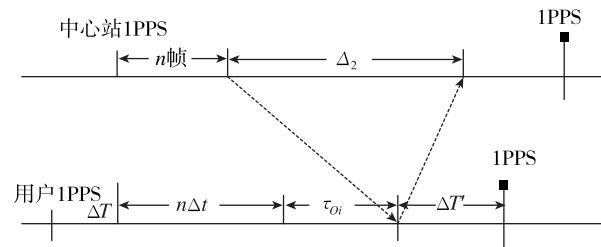


图 4 RDSS 双向授时原理图

Fig. 4 Principle diagram of RDSS two-way time service

图 4 中,中心站 1PPS 代表 BDS 地面中心站 BDT 时间信号的某一整秒时刻,用户 1PPS 代表用户本地时钟的某一整秒时刻。如果用户接收到中心站播发的第 n 帧询问信号,并测出第 n 帧询问信号的参考时标与本地钟 1PPS 的时间间隔 $\Delta T'$;同时,用户立即向中心站发射响应信号,中心站测出第 n 帧信号的往返时间值 Δ_2 (该值反映了中心站与用户之间的四程距离),并计算出该信号由中心站发出至用户 i 接收到的正向传播时延 τ_{oi} ,再将 τ_{oi} 发送给该用户作为双向授时时延修正值,即可得出用户时钟与 BDT 钟差,并以此来调整本机时钟,从而完成用户与中心站 BDT 的时间同步^[13-15]。

RDSS 双向授时的详细计算模型为^[13-15]

$$\Delta T = 1 - n \cdot \Delta t - \Delta T' - \tau_{oi} \quad (4)$$

式中,由于用户已经直接测定 $\Delta T'$,因此只要给出正向传播时延 τ_{oi} ,就能完成双向授时解算。中心站到用户 i 的正向传播时延 τ_{oi} 的计算模型为

$$\tau_{oi} = \frac{1}{2} [R_{oi0} + (\tau_{oi}^{\text{air}} - \tau_{io}^{\text{air}}) - \tau_{oi0}^{\text{eq}}] + \tau_{oi}^{\text{eq}} \quad (5)$$

式中: τ_{oi}^{air} 为信号由中心站到用户正向传播过程中的大气时延(包括对流层时延和电离层时延); τ_{io}^{air} 为信号由用户到中心站反向传播过程中的大气时延(包括对流层时延和电离层时延); τ_{oi0}^{eq} 为信号由中心站到用户正向传播过程中的设备时延和; τ_{oi0}^{eq} 为信号正反向传播过程中的设备时延和。

可见,经过单向观测量与往返观测量一半的求差(当然,中间需要修正各种传播时延改正),影响单向授时正向传播时延的卫星星历误差、电离层和

对流层大气传播误差等各项误差可以得到较好地抵消,中心站和用户设备时延可以事先精确标定。因此,RDSS 双向授时精度较 RDSS 单向授时精度得到了很大提升,通常能够优于 10ns。

2 试验结果及比较分析

2.1 RNSS 授时结果

利用 2020 年 12 月 14 日—12 月 16 日,北京地区已知位置的 RNSS 用户接收机采集的 BDS 伪距数据开展授时试验。试验设置 BDS-2+BDS-3 联合模式和仅 BDS-3 模式两种。在 BDS-2+BDS-3 联合模式下,主要进行了 B1I 和 B3I 这 2 个频点信号授时试验;在仅 BDS-3 模式下,主要进行了 B1C 和 B2a 这 2 个频点信号授时试验。试验中,利用接收机每分钟授时计算输出的 1PPS 时间信号与经过 BDT 校准的标准时间信号求差,作为接收机每次的授时结果 ΔT_i ,即

$$\Delta T_i = T_i - T \quad (6)$$

式中: T_i 代表授时计算输出的 1PPS 时间; T 代表 BDT 标准时间。

再对 1d 内每分钟结果进行统计,取 1d 内全部结果的第 95% 个值作为 1d 统计的授时精度结果(后面 SBAS 授时、RDSS 单向授时和 RDSS 双向授时统计方法相同)。不同信号授时精度试验统计结果如表 2 所示。

表 2 北京地区 RNSS 授时精度统计表

Tab. 2 Statistics of RNSS timing accuracy at Beijing

授时模式	BDS-2+BDS-3		BDS-3	
	B1I	B3I	B1C	B2a
授时精度 95%/ns	8.4	12.3	9.4	10.2

在 BDS-2+BDS-3 联合模式下,老体制 B1I 频点信号授时结果如图 5 所示。在仅 BDS-3 模式下,新体制 B1C 频点信号授时结果如图 6 所示。

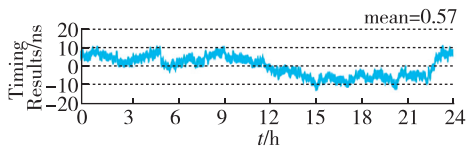


图 5 北京地区 B1I 单频 RNSS 授时结果

Fig. 5 RNSS timing results of B1I single frequency at Beijing

试验结果表明:在 BDS-2+BDS-3 联合模式下,北京地区老体制 B1I 和 B3I 信号授时精度(95%)分别约为 8.4ns 和 12.3ns;在仅 BDS-3 模式下,北京

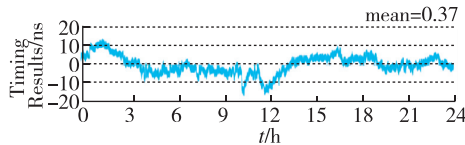


图 6 北京地区 B1C 单频 RNSS 授时结果

Fig. 6 RNSS timing results of B1C single frequency at Beijing

地区新体制 B1C 和 B2a 信号授时精度(95%)分别约为 9.4ns 和 10.2ns。

根据北斗服务性能规范,B1I 和 B3I 频点的空间信号距离误差(Signal-in-Space Range Error, SISRE)为 1m,B1C 和 B2a 频点的 SISRE 为 0.6m。上面试验结果比公布的空间信号服务性能稍差,为了进一步分析 RNSS 授时的主要误差源,利用高精度测量型天线和测量型接收机在时间精确校准的已知点进行了试验。试验采用与上面相同的外部标准时间作为参考,数据处理时,采用载波相位数据对伪距数据进行平滑,采用 B1C/B2a 经过载波相位平滑后的双频伪距数据消除电离层延迟的影响。对 3d 内每分钟一个的授时结果进行均值和标准差计算,试验结果如图 7 所示。

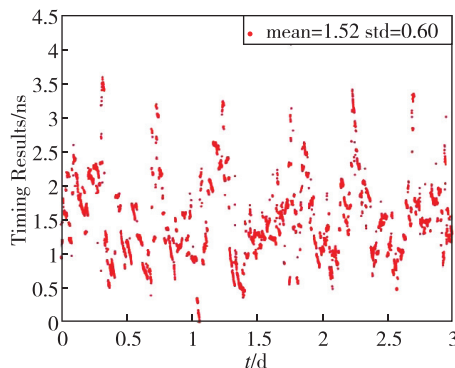


图 7 测量型接收机双频授时结果

Fig. 7 Dual-frequency timing results of measurement receiver

可见,3d 授时结果的平均值为 1.52ns,标准差为 0.60ns,该结果与其他监测机构公布的空间信号精度监测结果基本一致,说明 BDS 卫星发播的空间信号具有很高的精度。图 7 所示授时结果存在一些周期现象,这主要是由于卫星轨道和卫星钟差误差的周期性引起。但是与表 2 所示统计结果相比,测量型接收机双频授时精度明显提高,主要是因为这里使用的测量型天线采用了扼流圈技术和吸波巢,抗多径效果能够达到 0.2m 左右;其采用了较复杂的抗干扰、窄相关、抗多径算法,测量噪声能够控制在厘米级;并且

伪距数据经过载波相位数据平滑,测量噪声进一步降低;再加上设备时延被精确标定以及双频修正了绝大部分电离层延迟误差。因此,对于采用 RNSS 单频信号进行授时的普通用户机,大部分误差源自于用户接收机多路径误差、测量噪声、设备时延偏差以及单频电离层延迟误差^[16]。

2.2 SBAS 授时结果

利用 2020 年 12 月 14 日—12 月 16 日,北京地区的 SBAS 接收机开展授时试验。试验中,SBAS 接收机根据接收的卫星基本导航电文、星基增强电文及完好性信息进行授时计算,授时结果如图 8 所示。

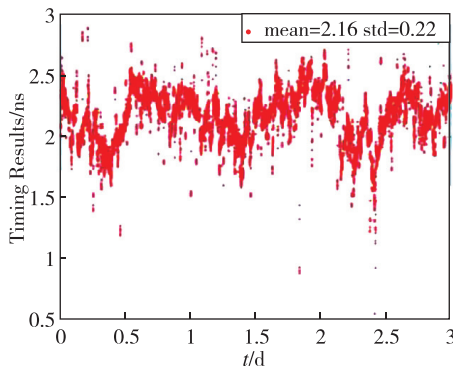


图 8 北京地区 SBAS 授时结果

Fig. 8 SBAS timing results at Beijing

试验结果表明:北京地区 SBAS 授时平均值为 2.16ns,标准差为 0.22ns,说明 SBAS 授时具有很高的精度。

2.3 RDSS 单向授时结果

为了对 BDS-3 和 BDS-2 两代系统授时精度进行比较,设计了基于 BDS-3 新体制信号 RDSS 单向授时和 BDS-2 老体制信号 RDSS 单向授时两种方案,RDSS 用户接收机为我们组织研制的用户机,具备兼容接收新老体制信号的所有功能,试验时间为 2020 年 12 月 14 日—12 月 16 日共 3d,试验地点选择为北京、喀什和三亚 3 个大范围的不同地区。试验中,用户机分别响应 BDS-3 卫星新信号和老信号,同时利用用户接收机根据信号强度自动选择响应不同卫星号和波束号情况,以试验用户机正常工作响应卫星或响应波束号切换时授时结果的连续性和稳定性,试验结果如图 9~图 11 所示。由图中结果可见,北京地区新体制信号试验分别响应了 PRN59 号卫星的 2 波束和 PRN61 号卫星的 2 波束,老体制信号试验仅响应了 PRN59 号卫星的 16

波束;喀什地区新体制信号试验仅响应了 PRN60 号卫星的 1 波束,老体制信号试验仅响应了 PRN60 号卫星的 13 波束;三亚地区新体制信号试验分别响应了 PRN61 号卫星的 3 波束和 PRN60 号卫星的 5 波束,老体制信号试验分别响应了 PRN59 号卫星的 16 波束和 PRN60 号卫星的 13 波束。

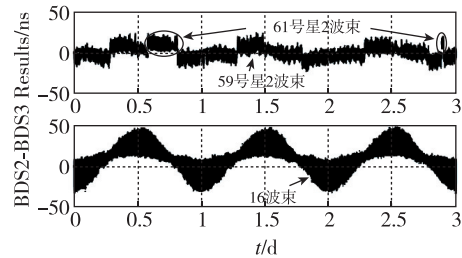


图 9 北京地区 RDSS 单向授时结果

Fig. 9 RDSS one-way timing results at Beijing

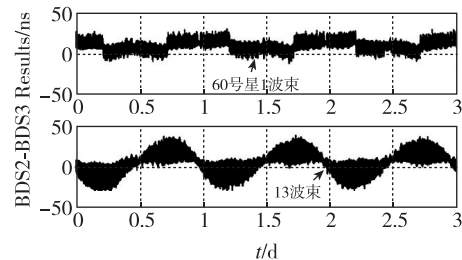


图 10 喀什地区 RDSS 单向授时结果

Fig. 10 RDSS one-way timing results at Kashi

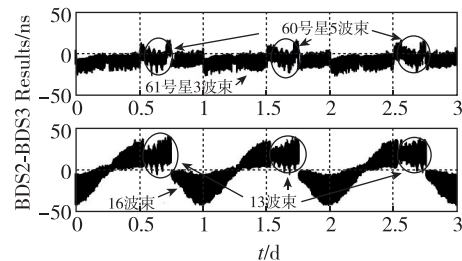


图 11 三亚地区 RDSS 单向授时结果

Fig. 11 RDSS one-way timing results at Sanya

试验结果表明:

1)北京、喀什和三亚地区 BDS-2 老体制信号 RDSS 单向授时精度(95%)分别为 32.6ns、33.5ns 和 28.4ns;BDS-3 新体制信号 RDSS 单向授时精度(95%)分别为 14.5ns、19.8ns 和 17.3ns。新体制信号比老体制信号授时精度分别提升了约 55.5%、40.9%和 39.1%。

2)北京和喀什地区老体制信号的 RDSS 单向授时结果存在较明显的系统性偏差,分别为 12.52ns

和 10.22ns;喀什和三亚地区新体制信号的 RDSS 单向授时结果也存在较明显的系统性偏差,分别为 10.82ns 和 -9.45ns。引起单向授时系统性偏差的因素较多,包括中心站发射时延、卫星转发时延、用户机接收时延和电离层时延等,结合经验认为主要原因因为设备时延标校结果不一致性引起。

3)整体上看,BDS-2 老体制信号 RDSS 单向授时结果存在以 d 为周期的波动,其中,北京、喀什和三亚地区的波动振幅分别约为 ± 37 ns、 ± 33 ns 和 ± 36 ns,波动明显大于 BDS-3 新体制信号结果。主要原因是用户机对 BDS-3 新体制信号单向授时进行了算法优化,这也是除了 1.3 节提到的三方面因素外,新体制信号授时精度得到大幅提升的原因。

4)在发生响应波束切换时,新老体制信号授时结果均存在不同程度的跳变,跳变幅度一般在几纳秒到几十纳秒之间,这主要是由于不同波束时延标校不一致带来的系统性偏差引起。在未发生响应波束切换时,授时结果有时也存在不同程度的跳变,跳变幅度一般在几纳秒,这主要是由于卫星轨道更新以及内部轨道内插算法误差引起。

2.4 RDSS 双向授时结果

同样利用 2020 年 12 月 14 日—12 月 16 日,北京、喀什和三亚地区的用户 RDSS 接收机开展双向授时试验。试验方案、试验设备、试验过程与 RDSS 单向授时一致。试验结果如图 12~图 14 所示。

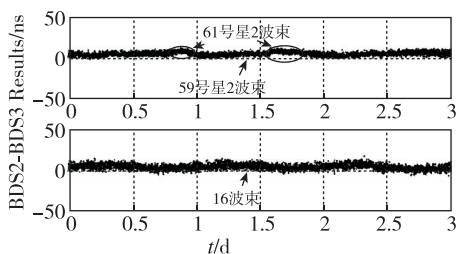


图 12 北京地区 RDSS 双向授时结果

Fig. 12 RDSS two-way timing results at Beijing

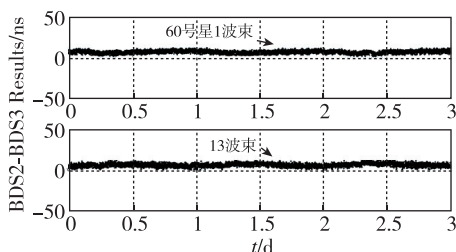


图 13 喀什地区 RDSS 双向授时结果

Fig. 13 RDSS two-way timing results at Kashi

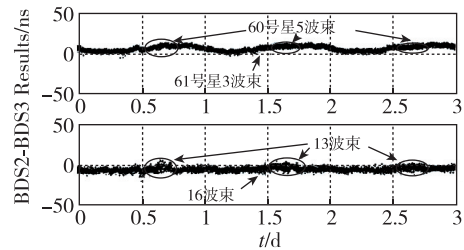


图 14 三亚地区 RDSS 双向授时结果

Fig. 14 RDSS two-way timing results at Sanya

对上面试验结果的统计分析表明:

1)北京、喀什和三亚地区 BDS-2 老体制信号 RDSS 双向授时精度(95%)分别为 10.7ns、10.1ns 和 10.8ns;BDS-3 新体制信号 RDSS 双向授时精度(95%)分别为 8.1ns、9.1ns 和 9.6ns。新体制信号授时精度分别提升了约 24.3%、9.9%和 11.1%。

2)与 RDSS 单向授时精度相比,3 个地区的 RDSS 双向授时精度非常稳定,均在 9ns 左右,且不同波束之间切换授时结果均非常连续稳定。这一方面说明双向授时算法模型比较成熟稳定,另一方面也说明双向设备时延标校精度较高,标校结果也比较稳定。

3)RDSS 双向授时结果存在以 d 为周期的小波动,北京和喀什地区幅度很小不明显,三亚地区最明显,波动振幅约为 6ns。综合来看,与地区有关,可能原因是低纬度地区电离层延迟较大,往返四程频率不同而无法抵消的残差引起。但是相比 RDSS 单向授时,波动幅度明显变小,说明经过双向求差,一些共同误差被较好地消除,从而使双向授时精度明显提高。

3 结论

综合本文讨论和分析结果,可以得到以下主要结论:

1)BDS-3 实现了 RNSS、SBAS、RDSS 单向和 RDSS 双向各种授时方法,通过不同地区和不同状态的试验表明,各种授时方法的精度全部优于公布的指标要求,并且 BDS 卫星发播的空间信号具有很高的精度,大部分误差来自于用户接收机误差、设备时延标校不一致误差和大气传播延迟误差。

2)从授时试验结果来看,BDS 的 SBAS 授时精度最高,可达 2ns 左右,并且具有完好性保护能力,可在民航、电力、通信和金融等安全性、可靠性要求高的行业使用;RDSS 双向授时精度和 RNSS 授时精度相当,达到 9ns 左右,RDSS 双向授时非常稳

定,但是仅能在中国及周边地区使用,而 RNSS 授时比 RDSS 双向授时可用卫星数更多,服务区域更大,因此,建议广大授时用户应更多地使用 RNSS 授时,RDSS 双向授时可以提供精度需求较高的守时用户使用;RDSS 单向授时精度最差,在 15~30ns 左右,该授时模式可以逐步由 RNSS 授时代替。

3)BDS-3 在 RDSS 信号体制、数据处理、时延标校和用户机算法等方面均进行了大量优化设计,出站信号带宽更宽使测量精度更高,卫星星历精度更高,电离层模型更精确,用户数据处理时间迭代算法更准确,这些因素使 BDS-3 新体制信号的 RDSS 单向授时精度提升了 40%以上。

4)RDSS 单向授时和双向授时结果中,部分站和部分卫星波束还存在系统性偏差以及周期性波动,后续还需对设备时延标校一致性和不同频率电离层延迟残差修正等进行深入研究,以进一步提高 RDSS 授时精度。

参考文献

- [1] 中国卫星导航系统管理办公室.北斗卫星导航系统应用服务体系[S].北京:中国卫星导航系统管理办公室,2019.
China Satellite Navigation Office. The application service architecture of BeiDou navigation satellite system[S]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2019(in Chinese).
- [2] 中国卫星导航系统管理办公室.北斗卫星导航系统公开服务性能规范(2.0)[S].北京:中国卫星导航系统管理办公室,2018.
China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system open service performance standard(Version 2.0)[S]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2018(in Chinese).
- [3] 刘健,曹冲.全球卫星导航系统发展现状与趋势[J].导航定位学报,2020,8(1):1-8.
Liu Jian, Cao Chong. Development status and trend of global navigation satellite system[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2020, 8(1): 1-8(in Chinese).
- [4] 刘利,时鑫,栗靖,等.北斗基本导航电文定义与使用方法[J].中国科学物理学力学天文学,2015,45(7):079509.
Liu Li, Shi Xin, Li Jing, et al. The definition and using method of the COMPASS basic navigation message[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2015, 45(7): 079509(in Chinese).
- [5] 张鹏飞,涂锐,广伟,等. BDS-3 时间频率传递方法及其性能分析[J].导航定位与授时,2020,7(5):58-64.
Zhang Pengfei, Tu Rui, Guang Wei, et al. BDS-3 time frequency transfer method and its performance analysis[J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(5): 58-64(in Chinese).
- [6] 王天.北斗卫星导航系统授时性能评估研究[D].西安:长安大学,2014.
Wang Tian. Research on time service performance evaluation of Beidou satellite navigation system[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014(in Chinese).
- [7] 刘利.相对论时间比对与高精度时间同步技术[D].郑州:解放军信息工程大学,2004.
Liu Li. Relativistic time comparison theory and high precision time synchronization technology[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2004(in Chinese).
- [8] 刘利,韩春好,朱陵凤,等.基于伪距测量的钟差计算模型[J].时间频率学报,2009,32(1):36-42.
Liu Li, Han Chunhao, Zhu Lingfeng, et al. Clock error calculation model based on pseudo range measurement[J]. Journal of Time and Frequency, 2009, 32(1): 36-42(in Chinese).
- [9] 中国卫星导航系统管理办公室.北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件-公开服务信号 B3I(1.0)[S].北京:中国卫星导航系统管理办公室,2018.
China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document-open service signal B3I (Version 1.0)[S]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2018(in Chinese).
- [10] 中国卫星导航系统管理办公室.北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件-公开服务信号 B1C(1.0)[S].北京:中国卫星导航系统管理办公室,2017.
China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document-open service signal B1C (Version 1.0)[S]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2017(in Chinese).
- [11] 中国卫星导航系统管理办公室.北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件-公开服务信号 B2a(1.0)[S].北京:中国卫星导航系统管理办公室,2017.
China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document-open service signal B2a (Version 1.0)[S]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2017(in Chinese).

- [12] Wu X L, Zhou J H, Wang G, et al. Multipath error detection and correction for GEO/IGSO satellites[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2012, 55(7): 1297-1306.
- [13] 谭述森. 卫星导航定位工程(第2版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
Tan Shusen. The engineering of satellite navigation and positioning[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010(in Chinese).
- [14] 吴延忠, 李贵琦. 地球同步卫星定位[M]. 北京: 解放军出版社, 1992.
Wu Yanzhong, Li Guiqi. Geostationary satellite positioning[M]. Beijing: The People's Liberation Army Press, 1992(in Chinese).
- [15] 李保东, 刘利, 居向明, 等. 卫星双向定时精度分析[J]. 时间频率学报, 2010, 33(2): 129-133.
Li Baodong, Liu Li, Ju Xiangming, et al. Accuracy analysis of satellite bidirectional timing[J]. Journal of Time and Frequency, 2010, 33(2): 129-133(in Chinese).
- [16] 杨元喜, 许扬胤, 李金龙, 等. 北斗三号系统进展及性能预测—试验验证数据分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(5): 584-594.
Yang Yuanxi, Xu Yangyin, Li Jinlong, et al. Progress and performance evaluation of BeiDou global navigation satellite system: data analysis based on BDS-3 demonstration system[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2018, 48(5): 584-594(in Chinese).

(编辑: 孟彬)