

引用格式：朱琳, 张慧君, 李孝辉, 等. 北斗/GNSS 授时性能评估及结果比较分析[J]. 时间频率学报, 2023, 46(4): 289-297.

北斗/GNSS 授时性能评估及结果比较分析

朱琳^{1,2,3}, 张慧君^{1,2,3}, 李孝辉^{1,2,3}, 刘音华^{1,2,3}

- 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
- 中国科学院大学, 北京 100049;
- 时间基准与应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600

摘要: 授时是全球卫星导航系统 (GNSS) 的三大服务功能之一。针对 GNSS 授时性能评价指标和评估方法不统一的问题, 研究了评估北斗/GNSS 授时性能的关键指标, 提出了一种北斗/GNSS 授时性能评估方法。该方法以中国科学院国家授时中心保持的协调世界时 UTC (NTSC) 和国际权度局 (BIPM) 发布的 UTC 为基础, 评估导航系统的授时性能, 同时给出了该评估方法的不确定度分析结果。利用位于国家授时中心的 GNSS 系统时间监测系统产生的数据, 评估并比较分析了 BDS、GPS、GLONASS 以及 Galileo 的授时性能。结果表明, 在 2021 年的评估周期内, BDS、GPS、GLONASS 和 Galileo 的时间传递准确度分别为 13.8、4.5、16.8 和 4.2 ns, 均符合导航系统性能的承诺。

关键词: 全球卫星导航系统; 授时性能; 时间传递准确度; 评估

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2023-04-0289-09

Performance assessment and results comparison of BDS/GNSS timing

ZHU Lin^{1,2,3}, ZHANG Hui-jun^{1,2,3}, LI Xiao-hui^{1,2,3}, LIU Yin-hua^{1,2,3}

- National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
- University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
- Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China

Abstract: Timing is one of the three major service functions of the Global Navigation Satellite System (GNSS). Aimed at the inconsistency of GNSS timing performance standards, the definition and assessment method of BDS/GNSS timing performance standards are discussed. The assessment methods are proposed based on the Coordinated Universal Time (UTC) kept by the National Time Service Center (UTC(NTSC)) and UTC published by the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). The uncertainty budget of the assessment method is given. The timing performance of BDS, GPS, GLONASS, and Galileo are assessed and compared using the data from the GNSS time monitoring system at NTSC. The assessment results show that, during the evaluation period of 2021, the time transfer accuracy of BDS, GPS, GLONASS and Galileo

are 13.8, 4.5, 16.8 and 4.2 ns respectively, which meet their performance commitment. Furthermore, the timing performance of GPS and Galileo are much better than their system commitment, while the time transfer accuracy of BDS and GLONASS show systematic error characteristics and have much room for improvement.

Key words: Global Navigation Satellite System (GNSS); timing performance; time transfer accuracy; assessment

0 引言

全球卫星导航系统 (GNSS) 主要包括 BDS (中国)、GPS (美国)、GLONASS (俄罗斯) 和 Galileo (欧盟), 均已面向全球用户提供定位、测速、授时等多种服务。GNSS 授时是卫星导航系统提供的三大基础服务之一, 通过导航卫星实现时间传递。GNSS 空间信号覆盖范围广、传播衰减小且不受用户数量限制, 时间传递精度高, 因此, GNSS 授时服务在军用数字通信网络时间同步、电信网络时间同步、电力时间同步等方面得到广泛的使用^[1-3]。随着全球一体化的快速发展, 全球各行业对高精度的 GNSS 授时更加依赖。当 GNSS 授时服务出现异常时, 分布全球的通信、交通、金融等行业网点无法获得统一的时间, 这将产生巨大的影响。例如, UTC 时间 2019 年 7 月 12 日 5 时 50 分至 2019 年 7 月 17 日 3 时 0 分, 由于地面控制段计算系统时间和轨道时出现异常, 导致 Galileo 系统服务降级、中断近 117 小时 10 分钟。在此期间, Galileo 提供的 PNT 服务可用性和安全性存在较大问题, 用户不能单独使用该服务^[4-5]。因此, 开展 GNSS 授时性能的评估工作是十分重要的, 用户能够根据评估结果调整 GNSS 授时服务的应用。

近几年, 随着导航系统的建成及现代化, 各大导航系统从供应商层面逐步开展优化系统时间性能、规范授时性能等方面的工作。目前, BDS、GPS、GLONASS 及 Galileo 官方都发布了公开服务性能规范, 并且定期产生服务性能报告^[6-9]。在文献[10]中规定北斗系统的授时精度优于 20 ns; 在文献[9, 11-12]中规定, GPS、GLONASS、Galileo 的时间传递准确度分别小于 30、40、30 ns。为了促进 GNSS 的兼容与互操作, 国际全球卫星导航系统委员会 (ICG) 多次针对 GNSS 系统时间、系统时间偏差、授时性能等时间相关的参数和评估指标展开讨论。ICG 成立了互操作和服务标准小组, 从 2019 年起定期举办讲习班和研讨会讨论公开服务性能标准制定准则等内容。目前, ICG 发布了最新版本的《全球和区域卫星导航系统性能标准指南》, 为 GNSS 用户提出了导航系统授时性能标准及规范的建议^[13-15]。

当前, 除了国际组织和 GNSS 供应商积极促进 GNSS 授时性能标准的统一外, 还需要从用户的角度评估授时性能。各 GNSS 的系统时间不同, 其授时性能也不相同。对于多系统用户而言, 需要明确各 GNSS 的授时性能指标及评估方法, 从而能够更好地指导授时服务的开展及授时设备的生产制造。

本文研究了 GNSS 授时原理, 在此基础上讨论了 GNSS 授时性能评估的关键指标参数的定义、内涵, 并提出了基于中国科学院国家授时中心保持的 UTC(NTSC) 和国际权度局 (BIPM) 提供的快速 UTC(UTC_r) 与 UTC(k) 偏差数据评估 GNSS 授时性能的方法, 最后对 BDS/GNSS 的授时性能评估结果展开了对比分析。

1 GNSS 授时性能关键指标规范及评估方法

本节在讨论了 GNSS 授时原理的基础上, 研究了时间传递准确度的评估方法, 最后分析了评估时间传递准确度的不确定度。

1.1 GNSS 授时原理

GNSS 授时是指导航系统通过空间信号将标准时间传递给用户的过程^[16-18]。GNSS 授时涉及两种时间

尺度：GNSS 系统时间（GNSST）和协调世界时（UTC）。

GNSS 系统时间是独立产生并保持的。BDS、GPS、Galileo 的系统时间均采用国际单位制（SI）秒为基本单位连续累计，但起始历元定义时间不同。GLONASS 的系统时间采用国际单位制（SI）秒为基本单位，且与协调世界时的闰秒机制相同，随闰秒变化而变化^[19-22]。

UTC 是目前国际法定的标准时间尺度。BIPM 接收全球 80 多个守时实验室提供的原子钟数据，再依据数据的不同权重计算产生纸面时 UTC^[23-24]。守时实验室（ k ）保持的协调世界时是 UTC 的本地物理实现，记为 UTC(k)。例如，中国科学院国家授时中心（NTSC）保持的协调世界时 UTC(NTSC) 是 UTC 在 NTSC 的物理实现。BIPM 定期公开发布 UTC 与 UTC(k) 的偏差数据^[25]。

不同的 GNSST 通过不同的 UTC(k) 与 UTC 建立联系。各导航系统产生 GNSST 与协调世界时的偏差，记为 UTCO。导航系统将 UTCO 参数及卫星钟差改正量（ $t^{(s)} - \text{GNSST}$ ）参数通过卫星空间信号发送给用户。在已知 GNSS 监测接收机天线坐标的前提下，用户对 GNSS 监测接收机产生的伪距测量值进行误差修正，获得接收机时间（ t_u ）与卫星时间（ $t^{(s)}$ ）的偏差。结合卫星钟差改正量及 UTCO，可以获得接收机钟差（ $t_u - \text{UTC}/\text{UTC}(k)$ ）。利用接收机钟差对 GNSS 监测接收机的时间进行调整，产生与 UTC/UTC(k) 同步的时标，即完成 GNSS 授时过程^[18, 26]。GNSS 授时原理如图 1 所示。当同一时刻用户能够观测到多颗有效卫星时，可以加权平均冗余计算多颗卫星的监测数据，进一步提高授时性能^[17, 26]。

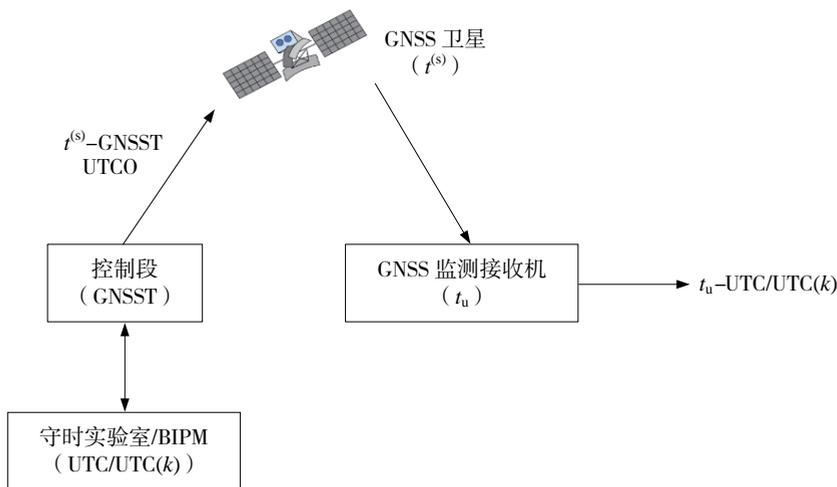


图 1 GNSS 授时原理示意图

如图 1 所示，接收机钟差（ $t_u - \text{UTC}/\text{UTC}(k)$ ）可以通过式（1）计算得到：

$$t_u - \text{UTC}/\text{UTC}(k) = [t_u - t^{(s)}]_{\text{Mon}} + [t^{(s)} - \text{GNSST}]_{\text{Nav}} + [\text{UTC}]_{\text{Nav}} \quad (1)$$

式（1）中：下标“Mon”表示数据通过接收空间信号监测得到，下标“Nav”表示数据由导航电文获得。

1.2 GNSS 时间传递准确度评估方法

每个导航系统评估授时服务性能的指标并不相同。《北斗卫星导航系统公开服务性能规范》中以“授时精度”作为 BDS 授时服务的主要性能指标，文中指出授时精度是指用户使用公开服务信号确定的时间与 BDT 之差的统计值^[10]。GPS 和 GLONASS 的性能规范中使用“时间传递准确度”评价授时服务的性能^[9, 11-12]。时间传递准确度是指在规定时间内，接收机钟差估计值（ $t_u - \text{UTC}/\text{UTC}(k)$ ）与真实值的瞬时偏差的 95%统计^[15]。Galileo 的性能规范中使用“UTC 时间确定准确度”作为授时服务的评价指标，但是并没有给出该指标的具体要求。本文以时间传递准确度作为评估 GNSS 授时性能的关键指标展开讨论。

实际上,真实的 UTC 无法获得,导致接收机钟差的真实值也很难获得。因此 GNSS 时间传递准确度可以理解为 GNSS 广播的协调世界时 (UTC_{GNSS}) 相对于 UTC/UTC(k) 的偏差的程度。

1.2.1 GNSS 时间传递准确度评估原理

GNSS 时间传递准确度评估原理如图 2 所示。评估 GNSS 时间传递准确度的首要步骤是通过接收卫星空间信号获得时间传递值 ($UTC(k) - UTC_{GNSS}$)。本文采用连接至 UTC(NTSC) 的 GNSS 监测接收机获得广播协调世界时 UTC_{GNSS} 相对于 UTC(NTSC) 的偏差,即接收机钟差 $UTC(NTSC) - UTC_{GNSS}$; 然后结合 BIPM 发布的 $UTC - UTC(k)$ 数据,产生 $UTC(NTSC) - UTC$; 随后,以 UTC(NTSC) 作为中介时间尺度将监测得到的接收机钟差转换成 $UTC_{GNSS} - UTC$ 。最后,计算时间传递误差序列的统计值 (95%) 即 GNSS 时间传递准确度。根据各导航系统的接口控制文件定义可知,对于 BDS、GPS、GLONASS 以及 Galileo 系统,UTC 分别指 UTC、UTC(USNO)、UTC(SU) 以及 UTC, $UTC_{GNSS} - UTC$ 分别按照公式 (2) 至 (5) 计算。

$$UTC_{BDS} - UTC = -[UTC(NTSC) - UTC_{BDS}]_{Mon} - [UTC - UTC(NTSC)]_{BIPM} \quad (2)$$

$$UTC_{GPS} - UTC(USNO) = -[UTC(NTSC) - UTC_{GPS}]_{Mon} - [UTC - UTC(NTSC)]_{BIPM} + [UTC - UTC(USNO)]_{BIPM} \quad (3)$$

$$UTC_{GLN} - UTC(SU) = -[UTC(NTSC) - UTC_{GLN}]_{Mon} - [UTC - UTC(NTSC)]_{BIPM} + [UTC - UTC(SU)]_{BIPM} \quad (4)$$

$$UTC_{GAL} - UTC = -[UTC(NTSC) - UTC_{GAL}]_{Mon} - [UTC - UTC(NTSC)]_{BIPM} \quad (5)$$

式 (2) 至 (5) 中: 下标 “Mon” 表示数据通过空间信号监测得到, 下标 “BIPM” 表示数据由 BIPM 提供的。

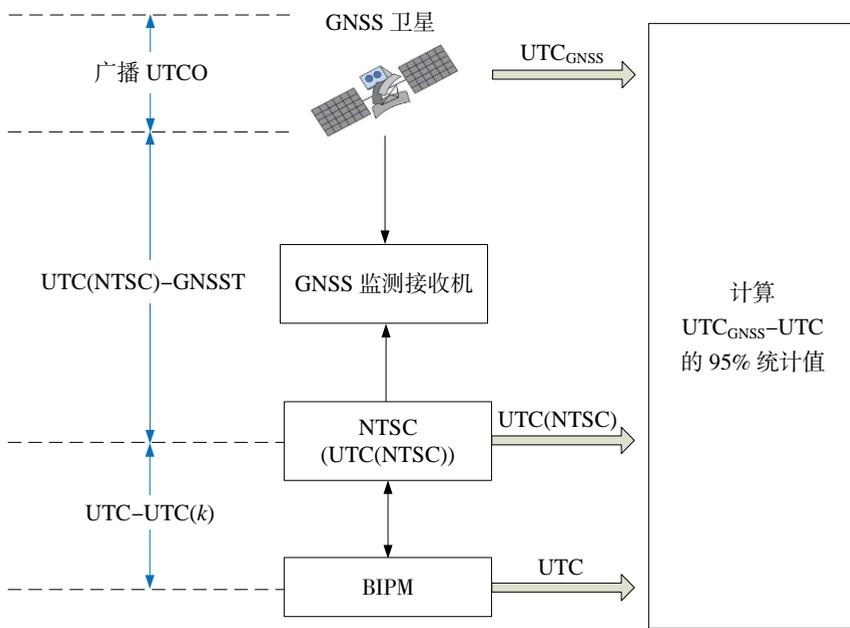


图 2 评估 GNSS 时间传递准确度的原理示意图

1.2.2 GNSS 时间传递准确度评估关键技术

GNSS 时间传递准确度评估的关键是采用连接至 UTC(NTSC) 的 GNSS 监测接收机获得高精度的

UTC(NTSC)–UTC_{GNSS}的时间偏差监测值。GNSS监测接收机是时间偏差监测的核心设备,接收机时间延迟校准以及内部时钟驾驭策略至关重要。

GNSS监测接收机的时间延迟指从天线至1PPS时间参考输入接口的时延,分为从射频输入口至内部伪距测量锁存点的时延和伪距测量锁存点至1PPS参考输入接口时延这两部分。还需要考虑BDS/GPS/GLONASS/Galileo不同频点在接收机端造成的频间偏差。本论文采用GNSS信号模拟器以及高速示波器对接收机时延及频间偏差进行绝对校准^[27-30]。

GNSS监测接收机内部频率锁定到外部UTC(NTSC)10MHz参考频率信号上,相位同步到UTC(NTSC)1PPS参考脉冲信号上。UTC(NTSC)的10MHz频率信号与1PPS脉冲信号同源相干,其同步关系保持在1ns之内。在接收机上电初始时接收机内部时钟与外部UTC(NTSC)1PPS参考进行同步。在接收机运行过程中,由于UTC(NTSC)的10MHz频率信号与1PPS脉冲信号始终同步在1ns之内,因此能够确保接收机时钟的稳定性。

1.2.3 GNSS时间传递准确度评估的数据处理策略

为了使用更多的参考数据,本文以BIPM提供的UTC_r–UTC(k)数据为参考对GNSS时间传递准确度进行评估。该数据文件每周发布一次,数据间隔为1天。通过GNSS监测接收机每秒钟获得的接收机钟差UTC(NTSC)–UTC_{GNSS}的噪声较大,包括空间段广播卫星钟差误差、信号传输过程中的电离层、对流层误差以及接收机端伪距测量误差等^[27]。在修正伪距测量值中各项误差后,对UTC(NTSC)–UTC_{GNSS}数据进行平滑降噪预处理,进而得到数据间隔为1天的UTC(NTSC)–UTC_{GNSS}数据。再进一步按照公式(2)至公式(5)计算分别得到BDS、GPS、GLONASS以及Galileo系统的时间传递误差序列UTC_{GNSS}–UTC。最后,对误差序列进行统计,取95%分位值即可获得GNSS时间传递准确度的评估结果。另外,统计时间传递误差序列的均方根误差(RMS)、平均值(AVG)、最大值(MAX)以及标准偏差(STD),用于评价GNSS时间传递的平均误差、最大误差,以及误差的稳定度情况,进一步反应用户获得广播UTC的性能。RMS的计算公式如式(6)所示:

$$S_{RM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{UTC}_{\text{GNSS}} - \text{UTC})^2}{n}} \quad (6)$$

式(6)中: n 表示取样天数, $i=1, 2, \dots, n$ 。

1.3 不确定度分析

GNSS时间传递准确度的评估过程中存在多种误差源,主要涉及3类:①导航系统广播UTC0的误差,引入的不确定度记为 σ_{UTC0} ;②与卫星、信号传播路径、接收机有关的误差,引入的不确定度记为 σ_{GNSSST} 。③BIPM数据引入的不确定度(记为 σ_{BIPM})。以上误差源均独立,依据误差分析原理,GNSS时间传递准确度评估的不确定度(σ)估计如式(7)所示:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{GNSS}}^2 + \sigma_{\text{UTC0}}^2 + \sigma_{\text{BIPM}}^2} \quad (7)$$

式(7)中: σ_{UTC0} 可以从供应商年度总结报告获得。 σ_{BIPM} 可以根据式(2)至(5)中的数据类型从BIPM数据文件中获得。 σ_{GNSS} 可以通过估计导航系统的用户等效距离误差(UERE)和时间精度衰减因子(TDOP)而获得,如式(8)所示^[11-12, 31]:

$$\sigma_{\text{GNSS}} = \sigma_{\text{UERE}} \cdot T_{\text{DOP}} / C \quad (8)$$

式(8)中: C 为光速,单位为m/s;在用户位置已知时, T_{DOP} 可以使用时间传递DOP(TTDOP)代替。TTDOP与用户可视有效卫星个数有关,约为 $1/\sqrt{N}$ ^[11-12]。

UERE 主要由两部分构成：由卫星信号产生和导航电文钟差和轨道误差引入的卫星到用户的测距误差 (SISE) 和由其他时域误差 (非 GNSS 系统级控制) 引入的卫星到用户测距误差 (UEE)。UEE 主要涉及电离层、对流层延迟改正量误差、接收机噪声等。由于这两部分误差相互独立, UERE 可通过式 (9) 计算得到^[11-12]:

$$\sigma_{\text{UERE}} = \sqrt{\sigma_{\text{SISE}}^2 + \sigma_{\text{UEE}}^2} \quad (9)$$

各导航系统的 UERE 估计值如表 1 所示^[11-12, 31-32]。

GNSS	BDS	GPS	GLONASS	Galileo
SISE	0.7	1.0	2.3	0.8
UEE	1.6	1.6	1.6	1.6
UERE	1.7	1.9	2.8	1.8

位于 NTSC 的接收天线处于开阔环境中, 同一时刻最少能够接收到有效卫星个数分别为 10 颗 BDS 卫星、8 颗 GPS 卫星、6 颗 GLONASS 卫星和 6 颗 Galileo 卫星, 则 GNSS 时间传递准确度评估的不确定度分析如表 2 所示^[25, 27]。由表 1 和表 2 可知, GLONASS 的评估不确定度较大, 这是由于导航电文钟差和轨道误差引入的。

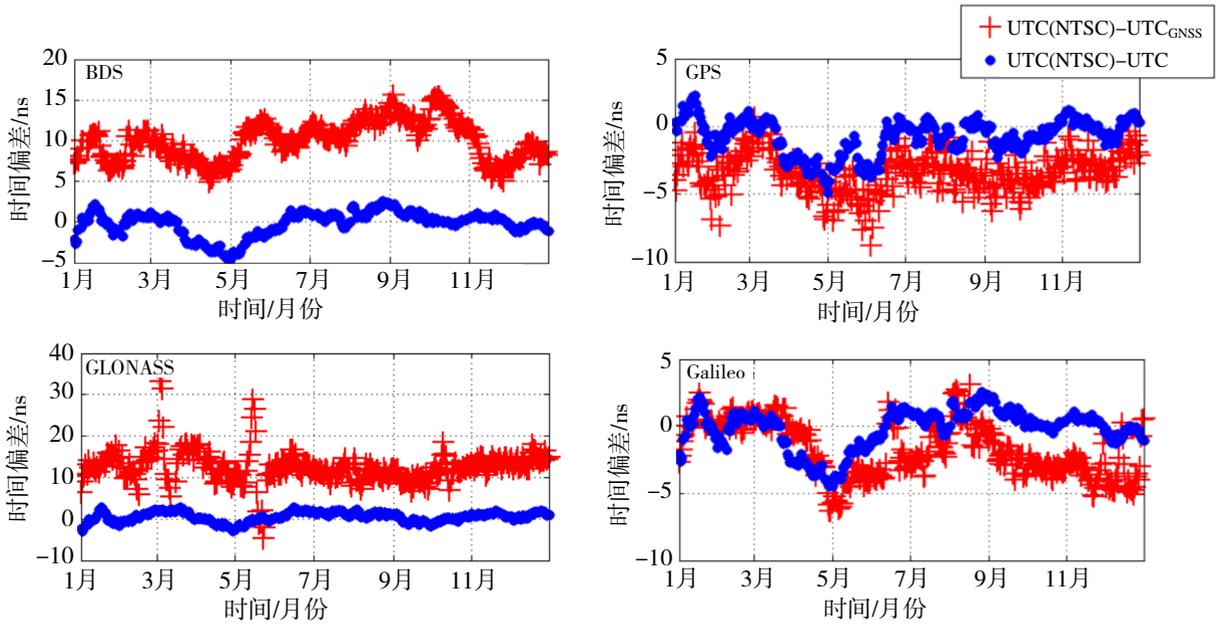
GNSS	BDS	GPS	GLONASS	Galileo	
σ_{GNSS}	1.8	2.2	3.8	2.4	
σ_{UTC_0}	3.0	1.3	1.7	0.5	
σ_{BIPM}	UTC _r -UTC(NTSC)	0.7	0.7	0.7	0.7
	UTC _r -UTC(k)	/	0.2	0.4	/
σ	3.6	2.7	4.2	2.5	

注: GPS 对应的 UTC_r-UTC(k) 为 UTC_r-UTC(USNO); GLONASS 对应的 UTC_r-UTC(k) 为 UTC_r-UTC(SU)。

2 评估结果及分析

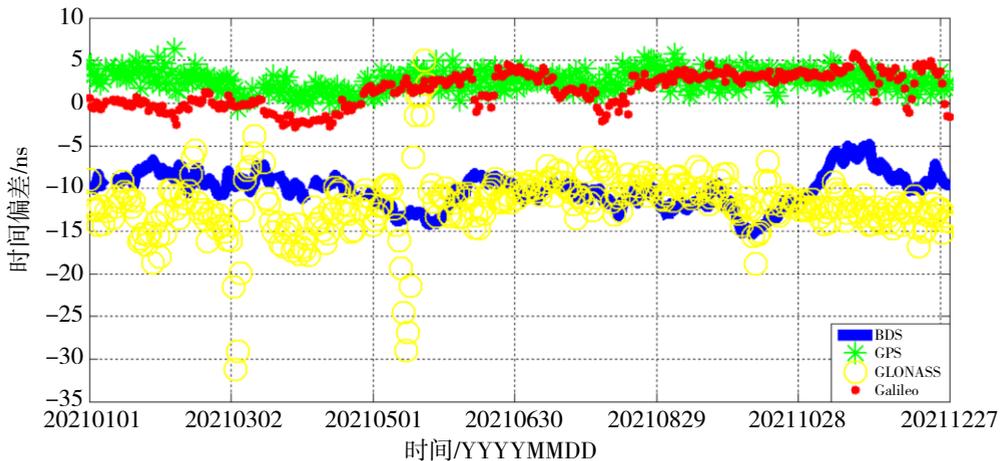
利用位于中国科学院国家授时中心的 GNSS 系统时间监测系统产生的接收机钟差数据 UTC(NTSC)-UTC_{GNSS} 评估 GNSS 授时性能, 涉及 BDS、GPS、GLONASS、Galileo 四个导航系统。评估时段为 2021 年, 每天 1 组数据。

图 3 给出了 GNSS 系统时间监测系统产生的 UTC(NTSC)-UTC_{GNSS} 和 BIPM 提供的 UTC(NTSC)-UTC 的数据对比图, 红色的加号表示 UTC(NTSC)-UTC_{GNSS}, 蓝色的点表示 UTC(NTSC)-UTC。图 4 给出了 BDS、GPS、GLONASS、Galileo 的时间传递误差序列 UTC_{GNSS}-UTC 的对比图, 分别以蓝色的线、绿色的星、黄色的圆圈和红色的点表示。结合图 3 和图 4 能够看出, 在评估时段内, BDS 和 GLONASS 的 UTC_{GNSS} 与 UTC 存在约 10 ns 的系统偏差; GLONASS 的 UTC(NTSC)-UTC_{GNSS} 数据出现多次较大的波动, 这是由 GLONASS 广播 UTC₀ 波动过大引起的, 并且导致 GLONASS 时间传递误差序列的波动范围最大, 约为 -35~5 ns; BDS、GPS 和 Galileo 的时间传递误差波动较小, 均小于 10 ns。



注：时间为 202101—202112，采样间隔 1 d

图3 UTC(NTSC) - UTC_{GNSS} / UTC 数据对比图



注：时间为 202101—202112，采样间隔 1 d

图4 UTC_{GNSS} - UTC 数据对比图

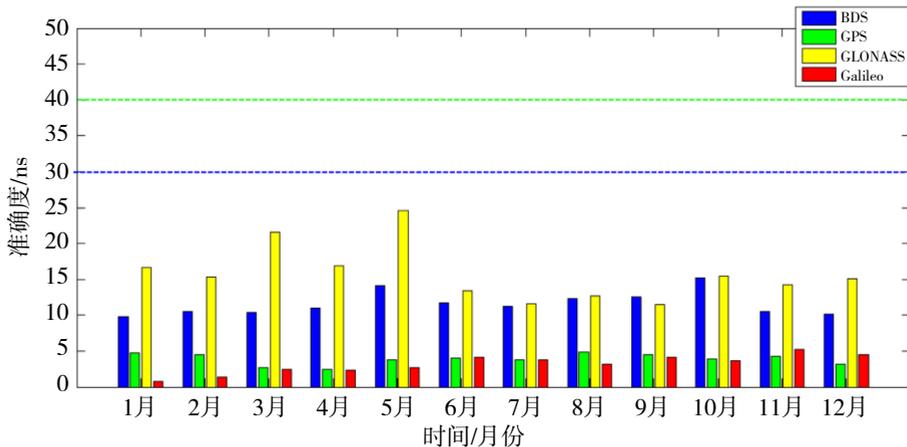
表 3 给出了评估时段的 BDS、GPS、GLONASS、Galileo 的时间传递准确度评估结果，包括 95%分位值、RMS、AVG、STD 以及 MAX。结果表明，BDS、GPS、GLONASS、Galileo 的 95%分位值分别为 13.8、4.5、16.8 以及 4.2 ns。Galileo 时间传递准确度最高，GLONASS 时间传递准确度最低。BDS、GLONASS 的时间传递准确度存在约为 10 ns 的固定偏差。而 GLONASS 时间传递误差的 STD 统计值最大，为 3.6 ns，即 GLONASS 的时间传递准确度最不稳定。

表 3 2021 年 GNSS 时间传递准确度评估结果比较

单位：ns

指标	BDS	GPS	GLONASS	Galileo
95%	13.8	4.5	16.8	4.2
AVG	-10.2	2.6	-11.9	1.6
STD	2.0	1.2	3.6	2.0
MAX	15.4	6.3	31.2	5.8
RMS	10.4	2.9	12.5	2.5

图 5 给出了 2021 年每个月的 BDS、GPS、GLONASS、Galileo 时间传递准确度的评估结果 (95%) 对比柱状图。图 5 中, BDS、GPS、GLONASS、Galileo 的评估结果分别表示为红色、蓝色、绿色和黑色, 绿色的虚线为 GLONASS 公开服务性能规范中时间传递准确度 (95%) 小于 40 ns 的指标, 蓝色的虚线为 GPS 公开服务性能规范中时间传递准确度 (95%) 小于 30 ns 的指标。从图 5 可以看出, 4 个导航系统每月的时间传递准确度均能满足服务性能规范中的要求。BDS 的评估结果在 9~15 ns 之间, GLONASS 的评估结果在 11~25 ns 之间, GPS 与 Galileo 的评估结果均小于 5 ns。该结论与表 3 的结果一致。经查阅, Galileo 2021 年第三季度季报中得到的时间传递准确度为 4.30 ns, 与本文的评估结果相近^[8]。



注: 时间为 202101—202112, 采样间隔 1 d

图 5 2021 年中每月的 GNSS 时间传递准确度评估结果 (95%)

3 结语

随着导航系统的现代化, GNSS 为全球用户提供高精度的授时服务, 其授时性能也受到广泛关注。本文在讨论 GNSS 授时原理的基础上, 分析了 GNSS 授时性能的评估指标, 提出了基于 UTC(NTSC) 和 BIPM 快速 UTC 数据的评估方法。利用位于 NTSC 的 GNSS 系统时间监测系统产生的 UTC(NTSC)–UTC_{GNSS} 数据, 完成对 BDS、GPS、GLONASS、Galileo 时间传递准确度的评估, 并比较了评估结果。研究表明:

① GNSS 时间传递准确度是指在规定时间内, 接收机钟差估计值 ($t_u - \text{UTC}(k)$) 与真实值的瞬时偏差的 95% 统计。该性能指标针对 GNSS 授时的完整过程, 评估结果能够体现 GNSS 授时性能的优劣, 是 GNSS 授时性能的关键指标。

② 本文提出了以 UTC(NTSC) 作为中介时间尺度、BIPM 提供的 UTC/UTC(k) 作为参考时间尺度评估 GNSS 广播 UTC_{GNSS} 的方法, 并给出了不确定度分析结果。

③ 2021 年的评估结果表明, BDS 时间传递准确度为 13.8 ns; GPS、Galileo 的时间传递准确度较高, 分别为 4.5 和 4.2 ns; GLONASS 的时间传递准确度最低, 为 16.8 ns。BDS、GPS、GLONASS、Galileo 的时间传递准确度评估结果均满足公开服务性能规范的要求。其中, GPS 和 Galileo 远优于系统承诺, BDS 和 GLONASS 的时间传递存在明显的系统误差特性, 具有较大的提升空间。

参考文献:

- [1] 朱峰. 卫星导航中的时间参数及其测试方法[D]. 北京: 中国科学院大学/国家授时中心, 2015.
- [2] 郭信平, 曹红杰. 卫星导航系统应用大全[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 74-76, 137-147.

- [3] 许龙霞, 任焯, 何雷, 等. EGNSS授时服务安全性发展综述[J]. 时间频率学报, 2021, 44(2): 102-112.
- [4] 刘春保. “伽利略”系统故障事件分析[J]. 国际太空, 2019(8): 28-31.
- [5] EUSPA. Update on the availability of some Galileo Initial Services[EB/OL]. (2019-07-15)[2022-11-26]. <https://www.gsc-europa.eu/news/update-on-the-availability-of-some-galileo-initial-services>.
- [6] Federal Aviation Administration GPS Product Team. Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Analysis Report[R]. 2021.
- [7] RENFRO B A, STEIN M, REED E B, et al. An Analysis of Global Positioning System (GPS) Standard Positioning Service Performance for 2019[R]. 2020.
- [8] European Union. European GNSS (Galileo) Services Open Service Quarterly Performance Report(1.0)[R]. 2021.
- [9] GLONASS. GLONASS Open Service Performance Standard (OS PS)(2.2)[S]. 2020.
- [10] 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[S]. 3.0版. 2021.
- [11] Department of Defense U. Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard[S]. 5th Edition. 2020.
- [12] European Union. European GNSS(GALILEO) Open Service Definition Document(1.2)[S]. 2021.
- [13] Committee on the Peaceful Uses of Outer Space. Fourteenth Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems[EB/OL]. (2021-02-15)[2022-12-23]. <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/icg/documents/105.html>.
- [14] LU X C, JEFF A S. Interoperability & service standards[C] // ICG Working Group on Systems Signals and Services(WG-S) ICG-14 Meeting, India: [s.n.], 2019.
- [15] International Committee on Global Navigation Satellite Systems. Guidelines for Developing Global and Regional Navigation Satellite Systems Performance Standards[S]. 2nd ed. 2021.
- [16] 谢钢. GPS原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 122.
- [17] 吴海涛, 李变, 武建锋, 等. 北斗授时技术及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016: 50-53.
- [18] MISRA P, ENGE P. 全球定位系统—信号、测量与性能[M]. 2版. 罗鸣, 曹冲, 肖雄兵, 译. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [19] 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 B1I(3.0)[S]. 2019.
- [20] NAVSTAR Global Positioning System. NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Interfaces Specification[S]. 2021.
- [21] MOSCOW. GLONASS Interface Control Document[S]. 2008.
- [22] European Union. European GNSS Open Service Signal in Space Interface Control Document[S]. 2nd ed. 2021.
- [23] PANFILO G, HARMEGNIES A, TISSERAND L. A new weighting procedure for UTC[J]. Metrologia, 2014, 51(31): 285-292.
- [24] Pavillon de Breteuil. BIPM Annual Report on Time Activities[R]. 2020.
- [25] MESURE. FTP server of the BIPM time department[EB/OL]. (2021-08-19)[2022-10-03]. <https://www.bipm.org/en/time-ftp>.
- [26] 朱琳. GNSS系统时差单站和多站联合监测方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [27] 焦文海, 张慧君, 朱琳, 等. GNSS广播协调世界时偏差误差评估方法与分析[J]. 测绘学报, 2020, 49(7): 805-815.
- [28] 朱峰, 李孝辉, 张慧君. 基于钟驾驭模式的定时接收机绝对校准[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9): 1946-1954.
- [29] 朱峰, 张慧君, 李孝辉, 等. 外部参考信号相位差对接收机零值的影响分析[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(7): 1592-1597.
- [30] 李会锦, 刘音华, 李孝辉. 局域无线时间比对系统中硬件零延迟的实现[J]. 时间频率学报, 2021, 44(2): 92-101.
- [31] DEFRAIGNE P. GNSS and Time Metrology: Report from the CCTF Working Group on GNSS[C] // 61st Meeting of the Civil GPS Service Interface Committee, 2021.
- [32] JIAO W H, ZHOU W, SONG S L, et al. iGMAS Update and Assessment of Multi-GNSS Performance[R]. 15th Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems, 2021.