

引文格式:卢鋆,武建峰,袁海波,等.北斗三号系统时频体系设计与实现[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(8):1340-1348.DOI:10.13203/j.whugis20200529



Citation: LU Jun, WU Jianfeng, YUAN Haibo, et al. Design and Implementation of Time and Frequency Architecture for BeiDou-3 System[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(8):1340-1348.DOI:10.13203/j.whugis20200529

## 北斗三号系统时频体系设计与实现

卢 鑫<sup>1</sup> 武建峰<sup>2</sup> 袁海波<sup>2</sup> 申建华<sup>3</sup> 孟轶男<sup>1</sup> 宿晨庚<sup>1</sup> 陈 颖<sup>1</sup>

1 北京跟踪与通信技术研究所,北京,100094

2 中国科学院国家授时中心,陕西 西安,710054

3 中国电子科技集团公司第五十四研究所,河北 石家庄,050081

**摘要:**北斗卫星导航系统作为复杂巨系统,需要科学、完整、高效的时频体系总体设计与工程实现。北斗三号系统的时频体系设计首先通过基于星间链路实现星载钟之间的比对与时间同步,基于星地时间比对链路实现主控站与卫星间的星地时间比对与精密同步,基于卫星双向、地面有线双向时间比对链路实现主控站各分系统之间的比对与精密同步,同时基于组合钟组和综合原子时等方法生成北斗系统时间(BeiDou system time, BDT),从而实现北斗系统内的时间建立、保持与同步。然后,通过直接或间接的溯源比对以及时差监测,实现 BDT 与其他导航系统时间基准的统一。北斗三号卫星信号的长期监测数据表明,BDT 天稳定度达到  $4.6 \times 10^{-15}$ ,星载钟本地时间准确度达到  $1.25 \times 10^{-11}$ ,星载钟万秒稳定性达到  $1.65 \times 10^{-14}$ ,同时 BDT 相对于其他卫星导航系统的时差保持在 50 ns 以内。经系统运行检验与监测评估,证明北斗三号系统时频体系功能完备、组织架构科学、体系指标先进,能够全面支撑北斗三号的全球服务能力。

**关键词:**时间频率;时间同步;时间溯源;时差监测

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2020-10-09

DOI:10.13203/j.whugis20200529

文章编号:1671-8860(2023)08-1340-09

## Design and Implementation of Time and Frequency Architecture for BeiDou-3 System

LU Jun<sup>1</sup> WU Jianfeng<sup>2</sup> YUAN Haibo<sup>2</sup> SHEN Jianhua<sup>3</sup> MENG Yinan<sup>1</sup>

SU Chengeng<sup>1</sup> CHEN Ying<sup>1</sup>

1 Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China

2 National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710054, China

3 The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China

**Abstract:** Objectives: As a complex and giant system, the BeiDou satellite navigation system (BDS) demands scientific, complete and efficient design and engineering implementation of time-frequency system. Methods: For the designation of time and frequency architecture for BDS-3, the first step is the realization of establishment, maintenance and synchronization of time and frequency architecture, and the second step is the unification of BDS time (BDT) and other navigation systems. The internal time synchronization for BDS-3 is designed as the methods of time comparison and synchronization among clocks of satellites based on inter satellite link, precise time comparison and synchronization between satellites and ground based on satellite-ground link, and comparison and precise synchronization between master station on ground, and its subsystem based on satellite two-way and ground wired two-way time comparison link. The generation of BDT signal is realized by combined clock group and integrated atomic time method. Finally, the unification of BDT and other navigation systems is realized through direct or indirect traceability comparison and time difference monitoring technology. Results: The long-term monitoring results of BDS-3's signals indicated that the frequency stability per day of BDT reached  $4.6 \times 10^{-15}$ , the local time accuracy of satellite clocks

第一作者:卢鑫,博士,研究员,主要从事卫星导航技术研究。lujun@beidou.gov.cn

通讯作者:申建华,博士,高级工程师。shenjh1217@163.com

reached  $1.25 \times 10^{-11}$ , the 1 000 s frequency stability of satellite clocks reached  $1.65 \times 10^{-14}$ , and the time difference between BDS and other navigation satellite system maintained within 50 ns. **Conclusions:** Within the operation of BDS-3, it is further proved that the time and frequency architecture for BDS-3 is complete in function design, scientific in organizational structure and advanced in system index, which can fully support the global service capability of BDS-3.

**Key words:** time and frequency; time synchronization; time and frequency traceability; time difference monitoring

时间频率是卫星导航系统的基本要素。卫星导航系统的核心是依据时间差测量实现导航定位、授时和测速,这三大功能的实现与时间频率基准密不可分。定位服务要求时间基准连续稳定,授时服务要求时间基准权威准确,而测速服务要求系统时间的频率准确,因此时间频率体系的能力直接决定了卫星导航系统的服务质量。一般来说,卫星导航系统要求时间基准同步精度需要达到纳秒量级,在这个量级,即使高精度的原子钟,其与系统时间的偏差也会出现不可容忍的漂移,因此在轨导航卫星需要每隔一段时间向地面系统进行时间频率溯源,以保持卫星时间的稳定性。

世界各大卫星导航系统都建立了自己的时间频率体系,导航时间频率体系的建立主要基于原子钟组<sup>[1]</sup>。如美国全球定位系统(global positioning system, GPS)的专用时间系统(GPS time, GPST),采用原子时秒长,时间起点为协调世界时(universal time coordinated, UTC)1980-01-06零点,以周和周内秒来计数,无闰秒调整。GPST系统内部存在许多原子频标(主控站、监测站、卫星),原子频标之间进行远程时间比对,从而解算各原子频标之间的时间差,并向美国海军天文台维护的协调世界时UTC远程溯源,从而维持GPST各原子频标的综合时间频率体系。从实测来看,GPST的频率稳定度大约为 $1 \times 10^{-14}$ (1~10 d)。俄罗斯全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GLONASS)时间则是基于GLONASS同步中心时间产生,通过相位测量设备每隔1 h对氢原子组与UTC(synchronization unit, SU)进行相位比较,从而控制、调整和改正氢钟的频率,其氢钟稳定性可达 $5 \times 10^{-14}$ (1 d)。中国北斗系统也建有北斗系统时间(BeiDou system time, BDT),BDT采用国际单位制(système international d'unités, SI)秒为基本单位,连续累计,不闰秒,起始历元为2006-01-01 UTC 00:00:00。BDT通过中国科学院国家授时中心保持的协调世界时(UTC, National Time Service Center,

UTC(NTSC))与国际UTC建立联系,时差偏差保持在50 ns以内。实际实验中, BDT相对于UTC的5 d频率稳定度约为 $8 \times 10^{-15}$ 。

北斗全球卫星导航系统又称北斗三号系统,是中国自主建设的全球覆盖的卫星导航系统。与北斗二号相比,北斗三号具有全球星座、星间链路、多系统互操作等新特点<sup>[2-4]</sup>,这些特点对时频体系的总体设计提出了更高要求,如时间基准建立方式、时间比对方法、全弧段卫星钟连续跟踪、系统时间切换与管理、GNSS时差监测等方面<sup>[5-7]</sup>。为满足北斗三号新特点、新功能和性能指标要求,北斗三号系统的时间频率体系对时间频率各类资源及要素进行统筹,从体系化角度对时间频率进行全面的分析、整理、优化和设计。

导航系统的时频系统本质上是一个时间同步系统,要求卫星导航系统的各组成部分的时钟具有协同一致的时序。北斗三号的时频体系包含地面时频系统、卫星时频系统和空间时频传递系统3个部分,是一个有机的整体,通过时间同步维持时频基准统一,又具备本地自主守时能力。地面时频系统是时频体系的基础,卫星时频系统为用户提供服务,空间时频传递系统是地面时频系统与卫星时频系统之间的纽带。随着星间链路技术的成熟,卫星自主导航也成为了新一代导航卫星的必备能力,因此卫星自主时间同步技术也成为了新一代导航星座的必备技术<sup>[8-9]</sup>,加入星间链路后可有效提升北斗定轨精度<sup>[10-11]</sup>。在北斗系统建设过程中,国内科研院所就导航卫星自主时间同步技术开展了大量的研究工作<sup>[12]</sup>,涉及到基于Ka星间链路的伪距测量<sup>[13]</sup>、伪距观测量历元归化<sup>[14]</sup>、星上综合原子时算法设计(加权平均算法、卡尔曼滤波算法等)<sup>[15-16]</sup>、原子钟频率稳定性分析<sup>[17-18]</sup>等方面,为北斗三号全球星间链路的实施奠定了基础。由于激光星间链路具有通信速率高、信噪比高、抗干扰能力强等优点<sup>[19]</sup>,也是未来星间链路的发展方向之一。

本文主要阐述了北斗三号时频体系定义与功能、组成架构设计、运行机理、体系的指标要素

的实现,并对北斗二号及国外三大导航系统的方案进行比较分析,并给出了北斗三号时频体系地面、星上、空地时间系统相关核心指标,包含系统时间、星载原子钟、注入站、监测站、系统内部时间同步、系统时间溯源、GNSS时差监测、时间应用与服务等。

## 1 时频体系的定义与功能

北斗三号时频体系是北斗三号系统中时间频率系统组成、系统时间产生与保持方法、系统时间溯源与时间传递技术等卫星导航相关时频要素的有机整合的总称,是卫星导航系统运行工作的基础。北斗时频体系主要研究了北斗全球系统运行服务过程中与时间频率产生、同步、应用、控制相关的基本要素构成及其作用关系,通过时间频率的要素定义、规则设计、要求确定等,来实现全系统时间频率信号、信息的精确、统一,支撑系统其他设备的有效运行,从而保障全系统的正常运行和服务。

卫星导航系统的时频体系具有基础性、支撑性、平稳性、协调性等方面特性。为支撑北斗三号卫星导航系统的稳定运行,时频体系应具备以下功能:时间建立与保持功能、时间比对与同步功能、时间溯源与监测功能、时间参数生成与发布功能、时间应用与服务功能、时间管理与控制功能、时间测试与评估功能,如图1所示。

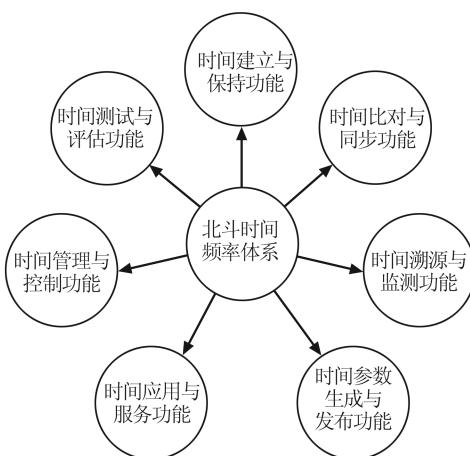


图1 时频体系功能视图

Fig. 1 Function View of Time and Frequency System

### 1)时间建立与保持功能

时间基准在导航系统中起着基础性作用,系统时间建立与保持主要指系统级或节点级时间建立与保持,包括两部分:(1)北斗系统时间建立与保持;(2)监测站、注入站以及卫星本地时间产生建立与保持。系统时间建立与保持是通过系

统原子钟资源综合来建立全系统统一的时间频率参考基准;监测站、注入站以及卫星本地时间产生、建立与保持主要包含各类站点、卫星时频资源配置、本地时间产生、本地时间溯源等。

### 2)时间比对与同步功能

卫星导航系统各节点时间与系统时间基准的比对和同步控制,包括卫星时间与系统时间的比对与同步控制、地面站时间与系统时间的比对与同步控制等方面。卫星与系统时间的比对包括星地直接比对、星间直接或间接比对(基于星间链路)、站间直接或间接比对等方式;地面站与系统时间的比对包括站间双向、站间共视、远程光纤比对等方式。

### 3)时间溯源与监测功能

北斗系统时间溯源通过将北斗时直接控制到其参考时间UTC( $k$ )实现;各导航系统时差监测与播发是通过多种方法监测北斗系统时间与GPS、GLONASS、Galileo系统时间之间的时差,建立时差模型,通过参数方式播发给用户。

### 4)时间参数生成与发布功能

时间频率相关的导航电文参数生成与信息发播,主要包括卫星钟差、BDT向UTC( $k$ )/UTC溯源偏差、GNSS系统之间的时间偏差模型等参数的生成与发布功能。

### 5)时间应用与服务功能

北斗全球系统的时间频率应用服务及相应的测试校准服务,主要包括北斗授时服务、时频传递服务、时频测试校准服务等方面,如卫星无线电定位系统(radio determination satellite system, RDSS)短报文服务、卫星无线电导航业务(radio navigation satellite system, RNSS)单向授时服务、卫星共视时频传递应用、卫星双向时频传递服务、标准时间测试与校准应用等。

### 6)时间管理与控制功能

系统时间及各类原子钟的管理与控制,包括系统时间平稳切换的管理控制、系统时间溯源的管理控制、各类站钟/星钟的主备切换的管理控制、各类站钟/星钟的时间频率调整控制、区域系统向全球系统时间平稳过渡的管理控制等。

### 7)时间测试与评估功能

时频体系设计的各项功能与指标的测试与评估,主要包括系统时间的建立与保持指标的测试与评估、时间比对与同步指标测试与评估、时间溯源与监测指标测试与评估等。

## 2 北斗三号时频体系的建立与维持

北斗三号系统时频体系是由空间段、地面段和用户段构成的有机整体。北斗三号时频体系的建立与维持既需要北斗系统内部的时间基准的统一,这是北斗系统正常运行与提供服务的基本条件,还需要北斗系统与其他卫星导航系统保持时间集中的统一,这是北斗系统可与其他系统实现兼容互操作的基础。

图2给出了北斗三号系统时频体系的建立与维持流程,采用信号/信息传递流程的形式对时频体系进行了构建。

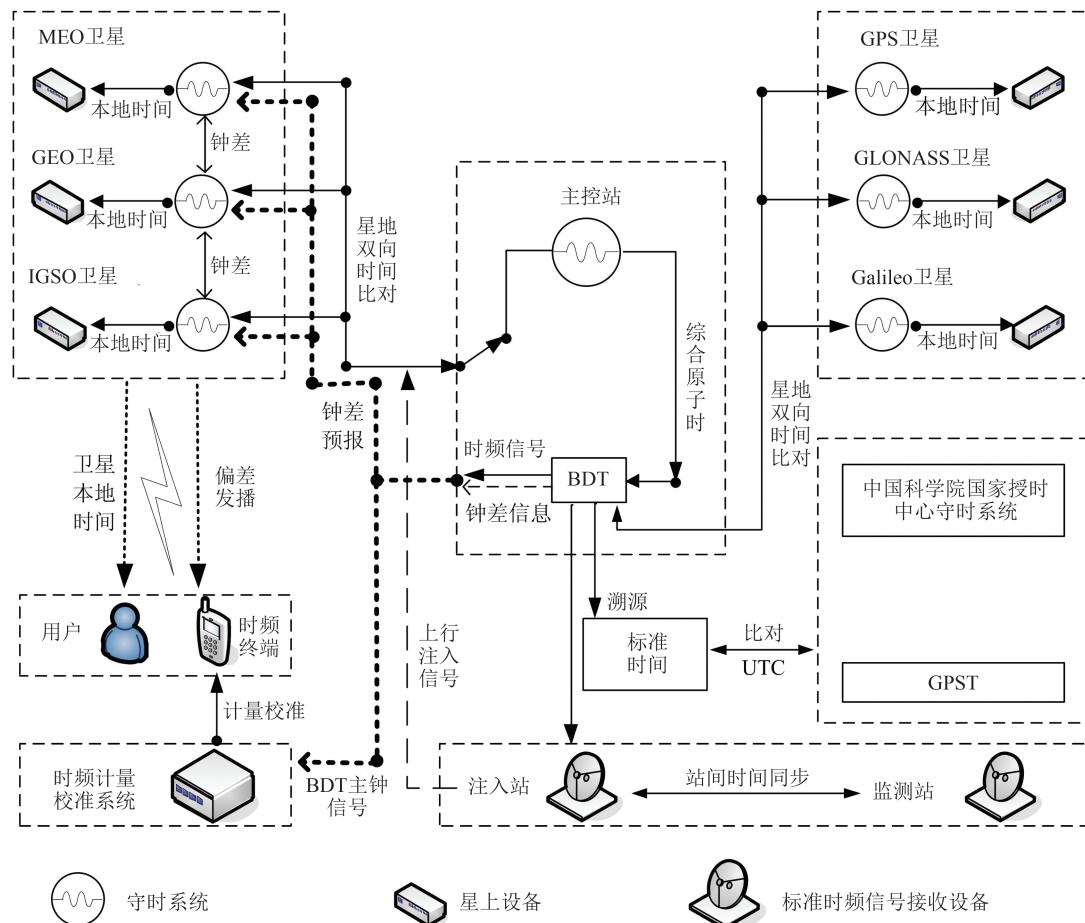


图2 时频体系建立与维持流程

Fig. 2 Establish and Maintain Process of Time and Frequency System

北斗三号系统时频体系建立与维持设计包括以下内容:

1) 系统内部的时间同步。系统内部之间需要完成精密的时间比对和时间同步以支撑系统协调运行。基于星间链路实现星载钟之间的比对与时间同步;基于星地时间比对链路实现主控站与卫星间的星地时间比对与精密同步;基于卫星双向、地面有线双向时间比对链路实现主控站各分系统之间的比对与精密同步。

2) BDT 系统时间的建立及保持。BDT 系统时间的建立与保持主要在主控站完成,通过对地面钟组选择、配置,对所有钟同步数据采用系统时间尺度算法等方法计算生成系统时间 BDT,并对主控站内主钟进行驾驭,从而获得北斗三号系

统的系统时间,并产生本地实时的物理信号。

3) 星钟时间预测及调整。通过各星钟与主钟的比对数据建立星钟预测模型,获得星钟的实时钟差预测值,并通过上行注入站将该数据发送到卫星上,由星钟进行调整或更新钟差参数。

4) 时间溯源和 GNSS 时差监测预报。通过直接或间接的溯源比对数据,以及 GNSS 时差监测数据,保持 BDT 与其他 GNSS 系统的时间比对与溯源基准统一。

5) 系统时间的广播。卫星广播系统时间参数模型给用户接收机,由接收机完成系统的授时和定位功能的实现。

### 2.1 BDT 系统时间的建立、保持与溯源

BDT 溯源于协调世界时,沿用北斗二号系统

时间基准的定义,起始历元为2006-01-01 UTC 00:00:00。BDT通过UTC(NTSC)与国际UTC建立联系,两者偏差保持在50 ns以内(模1 s)<sup>[20-23]</sup>。当前BDT实际频率准确度为 $1.3 \times 10^{-14}$ ,天稳定度达到 $4.6 \times 10^{-15}$ 。

## 2.2 北斗三号卫星时间基准建立与维持

卫星本地时间参考点定义在星载时频信号输出端口,以高精度星载原子钟输出的10 MHz的频率信号为参考,为卫星有效载荷提供精确、高可靠、稳定并且连续的10.23 MHz参考频率信号和1 pps(pulse per second)时间信号。设定卫星时间与BDT物理偏差小于1 ms,当星上时间与BDT物理偏差小于1 ms(实际控制阈值可为0.9 ms)时,在导航电文中广播钟差参数;当偏差超出0.9 ms时,通过星上时间保持系统进行微量步进物理调整。

星载钟相对于BDT的钟偏建模为时间的二次函数,在电文中广播卫星钟偏移、相对频率偏移、相对频率漂移等参数,由主控站推算并上载到卫星,作为导航电文的一部分。用户接收到导航电文后可计算出信号发射时刻的BDT,计算如下:

$$t = t_{sv} - \Delta t_{sv} \quad (1)$$

式中,t为信号发射时刻的北斗时,单位为s; $t_{sv}$ 为信号发射时刻的卫星测距码相位时间,单位为s; $\Delta t_{sv}$ 为卫星测距码相位时间偏移,单位为s,计算如下:

$$\Delta t_{sv} = a_0 + a_1(t - t_{oc}) + a_2(t - t_{oc})^2 + \Delta t_r \quad (2)$$

式中, $a_0$ 为钟差; $a_1$ 为钟速; $a_2$ 为钟速变化率; $t$ 可忽略精度,用 $t_{sv}$ 替代; $t_{oc}$ 为第一数据块的参考时刻; $\Delta t_r$ 是相对论校正项,单位为s,其值为:

$$\Delta t_r = F \cdot e \cdot \sqrt{A} \cdot \sin E_k \quad (3)$$

式中,e为卫星轨道偏心率,由卫星星历参数得到; $\sqrt{A}$ 为卫星轨道长半轴的开方,由本卫星星历参数得到; $E_k$ 为卫星轨道偏近点角,由本卫星星历参数计算得到; $F = -2\sqrt{\mu}/C^2$ ,其中 $\mu = 3.986\ 004\ 418 \times 10^{14}\text{ m}^3/\text{s}^2$ 为地球引力常数, $C = 2.997\ 924\ 58 \times 10^8\text{ m/s}$ 为光速。使用不同频点信号需要进一步修正频间相位差,例如使用B1I信号进行定位解算,需使用下式修正:

$$(\Delta t_{sv})_{B1I} = \Delta t_{sv} - T_{GD1} \quad (4)$$

对使用B2a信号的用户,需进行如下修正:

$$(\Delta t_{sv})_{B2a} = \Delta t_{sv} - T_{GD2} \quad (5)$$

式中, $T_{GD1}$ 、 $T_{GD2}$ 分别是B1和B2频点上系统时间偏差修正量。星上时频系统构成如图3所示,由电源及电源控制分机、星载原子钟、时频生成与保持单机、功分隔离放大装置等多个部分组成。每个卫星上配置3~4台原子钟,星载钟钟类型包括星载铷钟、星载氢钟,钟组组合模式为3台铷钟组合或者两铷和两氢组合。

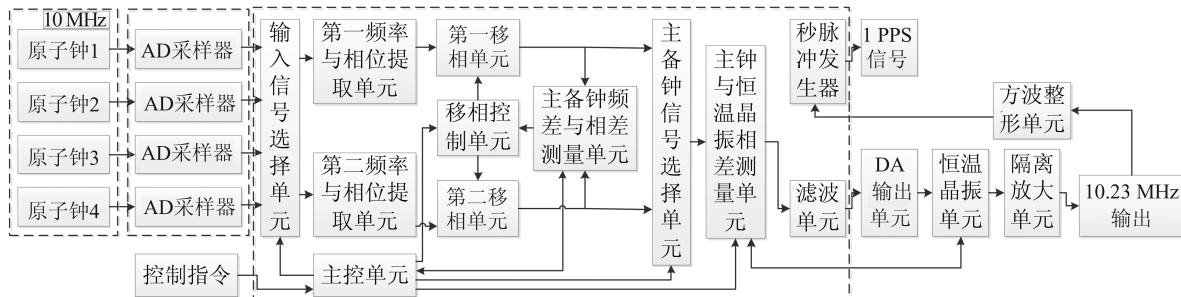


图3 星上时频系统构成

Fig. 3 Constitute of Time and Frequency System for Satellites

4台原子钟分别输出10 MHz信号,对应电学连接至一路AD(analog to digital)采样器;输入信号选择单元与所有AD采样器及主控单元相连;第一、二频率与相位提取单元、移相控制单元以及第一、二移相单元实现频率和相位提取及移相;主备钟频差与相差测量单元测量主备钟频差与相差完成主备钟同步;主钟与恒温晶振相差测量单元与主备钟信号选择单元相连,并通过滤波单元、DA(digital to analog)输出单元与恒温晶振单元形成反馈回路,实现主钟与恒温晶振同步;主控单元对主备钟相差和频差测量值以及主钟

与恒温晶振相差测量值进行实时监控,并在两测量值同时超过预先设定的阈值时,通过控制信号切换主钟与备钟,实现主备卫星钟时频信号无缝切换功能。其中,主备钟切换前后相位跳变小于20 ps,性能指标处于国际先进水平。

卫星时间调整间隔不小于200 d,要求以星载氢钟为频率参考时,10.23 MHz输出信号天稳优于 $7 \times 10^{-15}$ ,频率漂移率优于 $1 \times 10^{-14}$ ;以铷钟为频率参考时,10.23 MHz输出信号天稳优于 $2 \times 10^{-14}$ ,频率漂移率优于 $1 \times 10^{-13}$ <sup>[24]</sup>。

### 2.3 北斗三号地面段的时间基准建立与维持

北斗三号时频系统地面段的时间建立与维持的目的是保持地面段主控站与其他地面站之间的时间基准统一。地面段以主控站原子钟组为核心,综合各地面站、卫星钟组资源建立系统时间,作为北斗三号系统的时间基准。地面段主控站、其他地面站的时间同步主要采用双向卫星时间频率传递,并将导航卫星共视法作为备份手段,站间钟差测定精度可优于0.3 ns。同时各地面站具备独立时频系统,其原子钟配置采用原子钟组模式,在原子钟组中选取性能最优的原子钟作为主钟,使用相位微调仪,根据系统时间和主钟差值,对主钟频率进行微调,从而生成地面站的站内时间标准。

## 3 北斗三号时频体系运行和监测评估结果

通过北斗三号持续开展的系统集成与实验评估工作,对北斗三号系统时频体系的关键指标运行情况进行监测分析,包括系统时间的稳定性,星载钟本地时间的准确度、稳定性,以及与GNSS时间的偏差,各指标含义如表1所示。

表1 卫星导航系统关键指标体系

Tab. 1 Key Index of Satellite Navigation System

指标	指标定义	卫星导航服务对时频体系要求
系统时间稳定性	一定时间内系统钟组输出时间信号漂移的最大量	$2 \times 10^{-14}/d$
星载钟本地时间准确度	一定时间内卫星原子钟输出的时间信号相对于标准时间的偏差	$2 \times 10^{-11}$
星载钟本地时间稳定性与GNSS时间偏差	一定时间内卫星原子钟输出时间信号漂移的最大量 BDT与其他GNSS系统间时间最大偏差	$3 \times 10^{-14}/10^4 s$ 50 ns

### 3.1 系统时间稳定性

选取2020-01-13—2020-03-10北斗三号系统时间与某参考时间的比对结果,对BDT系统时间偏差进行天稳定性评估(阿伦方差)曲线如图4所示。根据系统时间稳定性定义,由图4可知,北斗三号系统天稳定性评估结果为 $4.6 \times 10^{-15}/d$ ,表明系统时间达到了设计使用要求。

### 3.2 星载钟本地时间的准确度、稳定性

选取M14和I1卫星为典型代表,分别搭载铷钟和氢钟,以BDT为参考对两颗卫星的星钟输出信号进行准确度评估。两颗卫星的星钟输出时间信

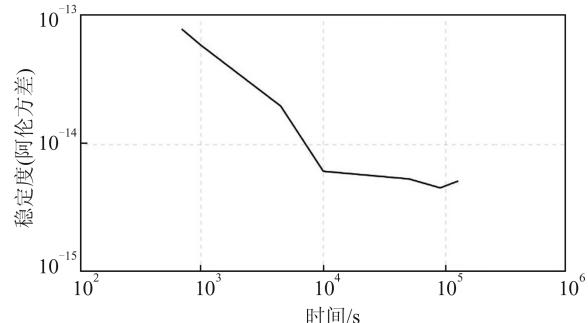


图4 北斗三号系统时间天稳定性评估结果  
(数据长度60 d)

Fig. 4 Day Stability Evaluation Results of BDS-3's Time

号实验结果如图5所示。本次实验的监测时长为 $1.6 \times 10^6$  s,实验期间M14星的星钟总漂移偏差为20  $\mu$ s,I1星的星钟总漂移偏差为2.5  $\mu$ s。根据原子钟时间准确度的定义,M14星时间准确度为 $1.25 \times 10^{-11}$ ,I1星时间准确度为 $0.16 \times 10^{-11}$ 。

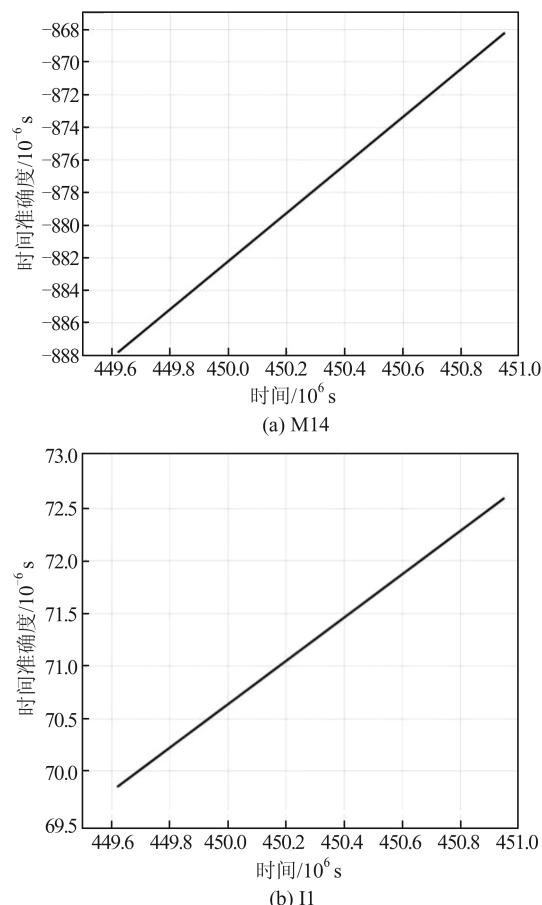


图5 北斗三号卫星时间准确度实验结果  
Fig. 5 Time Accuracy Evaluation Results of BDS-3

对M14、I1星的时间偏差进行天稳定性度的评估(阿伦方差)曲线如图6所示。由图6可知,M14星时间信号万秒稳定性为 $1.65 \times 10^{-14}$ ,I1星万秒稳定性为 $0.99 \times 10^{-14}$ 。

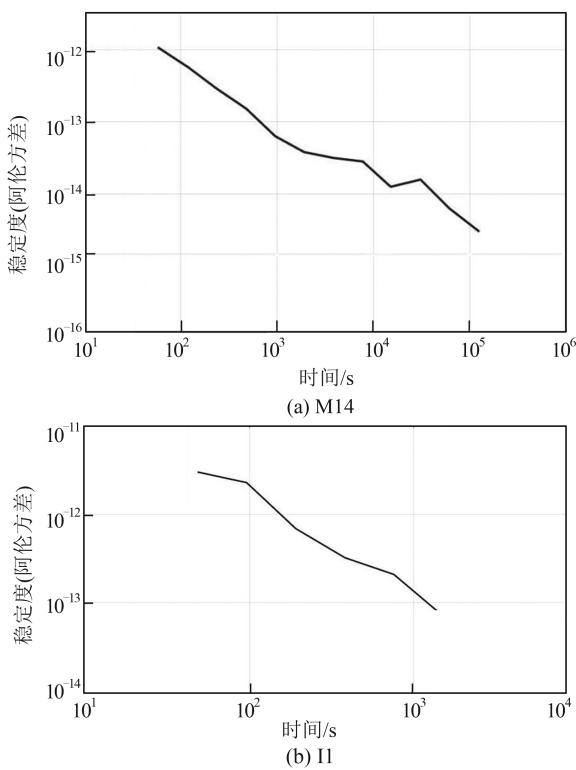


图6 北斗三号卫星时间万秒稳定度评估结果

Fig. 6 10 000 s Stability Evaluation Results of BDS-3's Time

同期,对监测时间段内的其他北斗三号卫星进行了卫星时间信号的准确度和稳定度评估,评估结果见表2。由表2可知,本时间段内北斗三号卫星时间准确度优于 $1.25 \times 10^{-11}$ ,万秒稳定度优于 $1.65 \times 10^{-14}$ ,均优于导航系统提供服务对时间信号的指标需求。

表2 北斗三号部分卫星时间准确度与稳定度实验结果  
Tab. 2 Time Accuracy and 10 000 s Stability Evaluation Results for Several BDS-3 Satellites

北斗三号卫星	监测时间段/ $10^6$ s	星载钟本地时间的准确度		星载钟万秒稳定度	
		实验结果	设计要求	实验结果	设计要求
		$/10^{-11}$	$/10^{-11}$	$/10^{-14}$	$/10^{-14}$
M13星	1.6	1.07		1.65	
M14星	1.6	1.25	2	1.65	3
M18星	1.6	0.38		1.58	
I1星	1.6	0.16		0.99	

### 3.3 GNSS时间偏差监测

时间性能直接影响着导航系统PNT(positioning, navigation, and timing)性能,因此各导航系统都力求将其系统时间性能不断提高。同时,系统间时差监测精度直接影响整个导航系统之间的兼容与互操作,按照当前的研究,系统间时

差监测精度处于10 ns水平,可以满足米级用户多系统兼容PNT需求,对更高精度的需求还在进一步研究中,因此导航系统时间和系统时差监测已经是多模导航系统发展的重要研究内容之一。

采用单站时差监测技术,以UTC(NTSC)为参考,开展了GNSS时差监测技术实验。图7是单站法GNSS时差监测原理,图中参考主钟(reference master clock, RTK)一般为协调世界时的物理实现,比如UTC(NTSC)。

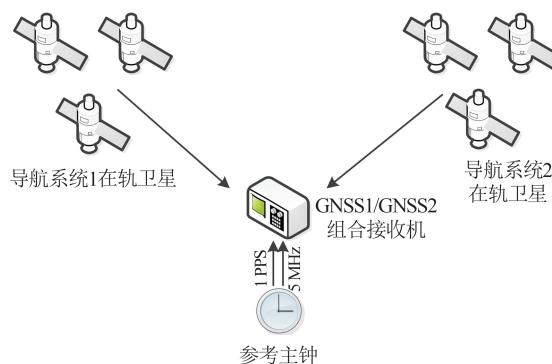


图7 单站法时差监测原理

Fig. 7 Time Difference Monitoring Principle by Single Satiation

由图7可知,可以通过直接接收多模导航系统广播电文、观测数据,并采用精密单点定位技术直接解算UTC(NTSC)-GPST(GPS系统时间)、UTC(NTSC)-GST(Galileo系统时间)、UTC(NTSC)-GLNT(GLONASS系统时间)和UTC(NTSC)-BDT(北斗系统时间),再通过互差计算,即可计算出不同导航系统之间的时差(模1 s)。

以UTC(NTSC)为参考,单站法GNSS时差实际计算过程:(1)计算 $\Delta T_i = \text{UTC(NTSC)} - \text{GNSST}(i)$ ;(2)计算 $\Delta T_j = \text{UTC(NTSC)} - \text{GNSST}(j)$ ;(3)计算两系统间时差:

$$\begin{aligned} \text{GNSST}(i) - \text{GNSST}(j) &= \Delta T_j - \Delta T_i = \\ &(\text{UTC(NTSC)} - \text{GNSST}(j)) - \\ &(\text{UTC(NTSC)} - \text{GNSST}(i)) \end{aligned}$$

图8展示了2019-01-01—2019-11-30以UTC(NTSC)为参考,实际监测的各GNSS系统时间相对于UTC(NTSC)的偏差。从图8中可以看出,在11个月的时差监测中,GPST保持较稳定,其他3个导航系统的波动相对较大。相对于UTC(NTSC),BDT的波动范围在26 ns以内;GST的波动范围在32 ns以内;GPST的波动范围在10 ns以内;GLNT的波动范围在35 ns以内。

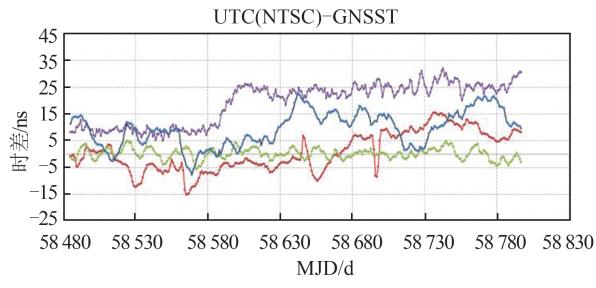


图 8 GNSS 时间偏差监测结果

Fig. 8 Time Difference Monitoring Results of GNSS

这种波动直接表现为 GNSS 系统授时的稳定性。基于上述检测结果,采用实验中提出的解算方法,可以得到 GNSS 系统间的时差,结果如图 9 所示。

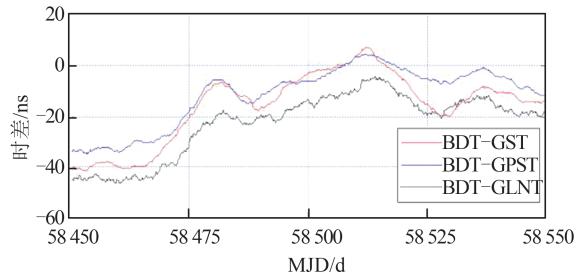


图 9 BDT 与其他卫星导航系统时差情况

Fig. 9 Time Difference of BDS Compared with Other GNSS

从图 8 和图 9 中可以看出,BDT 相对于 GPST、GST 和 GLNT 的时差基本保持一致,波动范围在 50 ns 以内,说明 BDT 与 GPST、GST 和 GLNT 等其他系统的时间基准能力相当,具备可兼容互操作的基本条件。同时,由图 9 可以看出,2019 年随着北斗三号系统建设的不断完善,BDT 与其他系统时间基准的时差也在不断改善。

#### 4 结语

本文从北斗三号时频体系定义出发,结合中国北斗系统的特点,设计给出了卫星导航系统时频体系的功能要求与组成架构,论述了时频体系七大功能如何建立与维持,给出了时频体系运行和监测评估结果,并与其他系统时频体系进行了比较。

北斗三号与北斗二号相比,体系建立与维持更加先进、科学、完备。与其他 GNSS 系统相比,在星间比对能力和 RDSS 授时方面具有一定独特优势,增加了 GNSS 时差监测功能,实现了参数播发,为 GNSS 兼容互操作、北斗系统国际化奠定了基础。从体系运行监测评估结果来看,系统

时间、卫星钟性能指标更优,满足了新一代系统使用要求。随着北斗三号星座的全面建成,北斗系统时频体系日趋完善,系统的时间溯源精度和授时精度性能良好,与国际其他卫星导航系统保持良好的一致性。

#### 参 考 文 献

- [1] Wu Haitao, Li Xiaohui, Lu Xiaochun. Time Base of Satellite Navigation System[M]. Beijing: Science Press, 2011. (吴海涛, 李孝辉, 卢晓春. 卫星导航系统时间基础[M]. 北京: 科学出版社, 2011.)
- [2] Yang Yuanxi, Lu Mingquan, Han Chunhao. Some Notes on Interoperability of GNSS [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(3): 253-259. (杨元喜, 陆明泉, 韩春好. GNSS 互操作若干问题[J]. 测绘学报, 2016, 45(3): 253-259.)
- [3] Yang Yuanxi, Xu Yangyin, Li Jinlong, et al. Progress and Performance Evaluation of Bei Dou Global Navigation Satellite System: Data Analysis Based on BDS-3 Demonstration System[J]. *Scientia Sinica (Terra)*, 2018, 48(5): 584-594. (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.)
- [4] Lu Jun, Yang Qiangwen. Study on GNSS Interoperability [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2010, 40(5): 534-540. (卢鳌, 杨强文. GNSS 互操作研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40(5): 534-540.)
- [5] Wu YWei. Key Technologies of GNSS Time Scale [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016. (伍贻威. GNSS 时间基准关键技术研究[D]. 长沙: 国际科学技术大学, 2016.)
- [6] Yuan Haibo, Zhang Jihai, Guang Wei. The Study on Different Methods of Time Offsets Monitoring of GNSS[C]//The 9th China Satellite Navigation Academic Annual Meeting, Harbin, China, 2018. (袁海波, 张继海, 广伟. 不同 GNSS 时差监测方法研究[C]//第九届中国卫星导航学术年会, 中国哈尔滨, 2018.)
- [7] Yang Yufei, Yang Yuanxi, Wang Wei, et al. Accuracy Assessment for IGS MGEX Clock Products [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2018, 35(5): 441-445. (杨宇飞, 杨元喜, 王威, 等. MGEX 钟差产品精度分析[J]. 测绘科学技术学报, 2018, 35(5): 441-445.)
- [8] Yang Yuanxi. Progress, Contribution and Challenges of Compass/BeiDou Satellite Navigation System [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*,

- 2010, 39(1): 1-6. (杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 1-6.)
- [9] Lü Hongchun. Research on Method of Satellite-Ground Time Synchronization Base on Ka Band ISL System of BDS[D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2017. (吕宏春. 基于北斗Ka星间链路体制的星地时间同步方法研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2017.)
- [10] Zhu Jun. Research on Orbit Determination and Time Synchronizing of Navigation Satellite Based on Crosslinks [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (朱俊. 基于星间链路的导航卫星轨道确定及时间同步方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.)
- [11] Yang Yufei, Yang Yuanxi, Hu Xiaogong, et al. Comparison and Analysis of Two Orbit Determination Methods for BDS-3 Satellites[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(7): 831-839. (杨宇飞, 杨元喜, 胡小工, 等. 北斗三号卫星两种定轨模式精度比较分析[J]. 测绘学报, 2019, 48(7): 831-839.)
- [12] Yang Yuanxi, Ren Xia. Maintenance of Space Datum for Autonomous Satellite Navigation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1780-1787. (杨元喜, 任夏. 自主卫星导航的空间基准维持[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 1780-1787.)
- [13] Ruan Rengui, Wei Ziqing, Jia Xiaolin. BDS-3 Satellite Orbit and Clock Determination with One-way Inter-Satellite Pseudorange and Monitoring Station Data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(3): 269-275. (阮仁桂, 魏子卿, 贾小林. 星间单程伪距联合监测站数据确定北斗三号卫星轨道和钟差[J]. 测绘学报, 2019, 48(3): 269-275.)
- [14] Mao Yue, Song Xiaoyong, Jia Xiaolin, et al. Naturalisation Method Research on Inter-Satellite Link Observation Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(10): 1201-1206. (毛悦, 宋小勇, 贾小林, 等. 星间链路观测数据归化方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(10): 1201-1206.)
- [15] Yi Hang, Zhong Chongxia. Research on Time Keeping Algorithm of the Autonomous Navigating of Navigation Constellation [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2012, 32(5): 22-26. (易航, 仲崇霞. 导航星座自主导航的守时算法研究[J]. 宇航计测技术, 2012, 32(5): 22-26.)
- [16] Lu Yang. Study on Adaptive Kalman Filtering Algo-
- rithm of Atomic Clock State Model[J]. *Publications of the Shaanxi Astronomical Observatory*, 1990, 13(2): 84-93. (陆洋. 原子钟状态模型的自适应Kalman滤波算法研究[J]. 陕西天文台台刊, 1990, 13(2): 84-93.)
- [17] Liu Shuai, Jia Xiaolin, Sun Dawei. Performance Evaluation of GNSS On-board Atomic Clock [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(2): 277-284. (刘帅, 贾小林, 孙大伟. GNSS星载原子钟性能评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(2): 277-284.)
- [18] Wu Yiwei, Yang Bin, Xiao Shenghong, et al. Atomic Clock Models and Frequency Stability Analyses[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(8): 1226-1232. (伍贻威, 杨斌, 肖胜红, 等. 原子钟模型和频率稳定性分析方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(8): 1226-1232.)
- [19] Zhu Funan, Zhou Lisha, Sun Jianfeng, et al. Time Synchronization Based on Intersatellite Laser Communication Links[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2021, 51(1): 162-167. (朱福南, 周黎莎, 孙建锋, 等. 基于激光通信链路的星间时间同步技术[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51(1): 162-167.)
- [20] Yi H, Wang H B, Zhang S K, et al. Remote Time and Frequency Transfer Experiment Based on BeiDou Common View[C]//The European Frequency and Time Forum (EFTF), New York, USA, 2016.
- [21] Liang K, Zhang A M, Pei C, et al. Preliminary Implementation of Time and Frequency Transfer by BDS[C]// Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC), Prague, Czech Republic, 2014.
- [22] Li W, Zhang J H, Guang W, et al. The Performance Evaluation of the BD One-Way Time Service [C]// Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum, Denver, USA, 2015.
- [23] Yuan H B, Guang W, Yang F. Time Service Through BD GEO Satellites [C]// Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC), Prague, Czech Republic, 2014.
- [24] Guo Shuren, Cai Hongliang, Meng Yinan, et al. BDS-3 RNSS Technical Characteristics and Service Performance[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(7): 810-821. (郭树人, 蔡洪亮, 孟轶男, 等. 北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J]. 测绘学报, 2019, 48(7): 810-821.)