



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 北斗三号系统时频体系设计与实现
作者: 卢鋈, 武建峰, 袁海波, 申建华, 孟轶男, 宿晨庚, 陈颖
DOI: 10.13203/j.whugis20200529
收稿日期: 2021-12-09
网络首发日期: 2022-03-22
引用格式: 卢鋈, 武建峰, 袁海波, 申建华, 孟轶男, 宿晨庚, 陈颖. 北斗三号系统时频体系设计与实现[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20200529>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

引用格式：

卢璠, 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, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20200529 (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, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20200529)

北斗三号系统时频体系设计与实现

卢璠¹ 武建峰² 袁海波² 申建华³ 孟轶男¹ 宿晨庚¹ 陈颖¹

- 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等方法实现北斗系统内部的时间同步, 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与其它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 4.6×10^{-15} , 星载钟本地时间准确度达到 1.25×10^{-11} , 星载钟万秒稳定度达到 1.65×10^{-14} , 同时BDT相对于其他卫星导航系统的时差保持在50ns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 文献标志码: A

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。而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, 其时间也会与系统时间的偏差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^[1]。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1980年1月6日0时(UTC), 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 1×10^{-14} 。俄罗斯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一小时对氢原子组与UTC(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 5×10^{-14} 。我国北斗系统也建有自己的时间频率体系BDT。BDT采用国际单位制(SI)秒为基本单位连续累计, 不闰秒, BDT起始历元为2006年1月1日协调世界时(UTC)00时00分00秒。BDT通过中科院国家授时中心维持的UTC(NTSC)与国际UTC建立联系, 时差偏差保持在50ns以内。实际实验中, BDT相对于UTC的5天频率稳定度约 8×10^{-15} 。

北斗全球卫星导航系统, 又称北斗三号系统, 是我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^[2-4], 这些新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、全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)时差监测等方面提出了新的要求^[5-8]。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

收稿日期: 2021-12-09

项目资助: 国家自然科学基金(42074044); 中国科协青年人才托举工程(2019QNRC001)。

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

通讯作者: 孟轶男, 博士, 工程师。shenj1217@163.com

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三个部分。北斗三号时频系统三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^[9-10]，加入星间链路后可有效提升北斗定轨精度^[11-12]。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，涉及到基于 Ka 星间链路的伪距测量^[13]、伪距观测量历元归化^[14]，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）^[15-16]，原子钟频率稳定性分析^[17-18]等方面，为北斗三号全球星间链路的实施奠定了基础。由于激光星间链路由于具有通信速率高、信噪比高、抗干扰能力强等优点^[19]，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，最后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、时间应用与服务等等核心指标。并从系统运行状况说明北斗三号时频体系设计，较好的支撑了北斗全球系统整个时间体系能力的跃升和时间互操作目标的实现。

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，支撑系统其它设备的有效运行，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、协调性等方面的特性。为支撑北斗三号卫星导航系统的稳定运行，时频体系应具备如下七大功能：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。

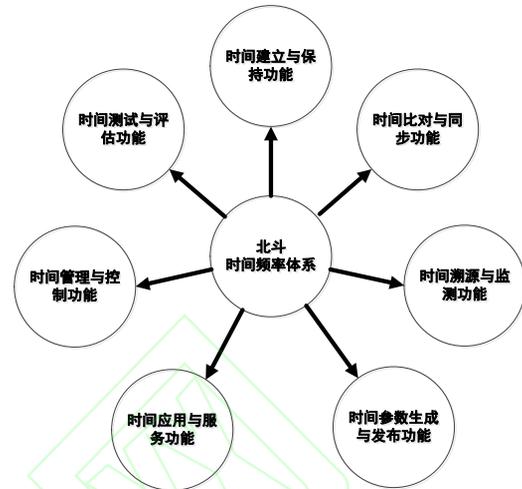


图 1 时频体系功能视图

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，一是北斗系统时间建立与保持，二是监测站、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、建立与保持具体包含主要包含各类站点、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有星地直接比对、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有站间双向、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

不闰秒，采用周、周内秒连续计数。当前 BDT 实际频率准确度为 1.3×10^{-14} ，天稳定度达到 4.6×10^{-15} 。BDT 通过国家授时中心保持的 UTC(NTSC)，最终实现与国际标准时间 UTC 直接的同步^[20-23]。

2.2 北斗三号卫星时间基准建立与维护

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 10MHz 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 10.23MHz 参考频率信号和 1PPS 时间信号。设定卫星时间与 BDT 物理偏差小于 1 毫秒，当星上时间与 BDT 物理偏差小于 1 毫秒（实际控制阈值可为 0.9 毫秒）时，在导航电文中广播钟差参数；当偏差超出 0.9 毫秒时，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通过式（1）计算出信号发射时刻的北斗时：

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

式中， t 为信号发射时刻的北斗时，单位为秒； t_{sv} 为信号发射时刻的卫星测距码相位时间，单位为秒； Δt_{sv} 为卫星测距码相位时间偏移，单位为秒，由式（2）给出：

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

式中， t 可忽略精度，用 t_{sv} 替代。 Δt_r 是相对论校正项，单位为秒，其值为：

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

其中， e 为卫星轨道偏心率，由本卫星星历参数得到； \sqrt{A} 为卫星轨道长半轴的平方，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；

$F = -2 \frac{\sqrt{\mu}}{C^2}$ ； $\mu = 3.986004418 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ 为地球引力常数； $C = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$ 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，需使用下式修正：

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

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、功分离放大装置等多个部分组成。每个卫星上配置三至四台原子钟，星载钟钟类型包括星载铷钟、星载氢钟，钟组组合模式为三台铷钟组合或者两铷和两氢组合。

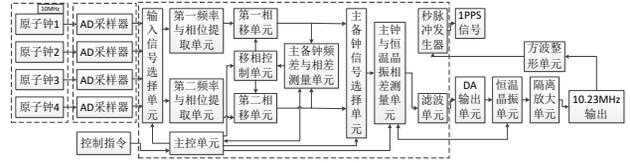


图 3 星上时频系统构成

Fig.3 Constitute of Time and Frequency System for Satellites

四台原子钟分别输出 10MHz 信号，对应电学连接至一路 AD 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 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各钟，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 天，要求以星载氢钟为频率参考时，10.23 MHz 输出信号天稳优于 7×10^{-15} ，频率漂移率优于 10^{-14} ；以铷钟为频率参考时，10.23MHz 输出信号天稳优于 2×10^{-14} ，频率漂移率优于 10^{-13} ^[24]。

2.3 北斗三号地面段的时间基准建立与维护

北斗三号时频系统地面段的时间建立与维护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（Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer，TWSTFT）法，并将导航卫星共视法作为备份手段，站间钟差测定精度可达到优于 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试验评估工作，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度，星载钟本地时间的准确度、稳定度，以及与 GNSS 时间偏差，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
系统时间稳定度	一定时间内系统钟组输出时间信号漂移的最大量	2×10^{-14}
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	2×10^{-11}
星载钟本地时间稳定度	一定时间内卫星原子钟输出时间信号漂移的最大量	3×10^{-14}
与 GNSS 时间偏差	BDT 与其他 GNSS 系统间时间最大偏差	50 ns

3.1 系统时间稳定度

选取 2020 年 1 月 13 日至 3 月 10 日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度评估（阿伦方差）曲线如图 4 所示。根据系统时间稳定度定义，由图 5 可知北斗三号系统天稳定度评估结果 4.6×10^{-15} ，表明系统时间达到了设计使用要求。

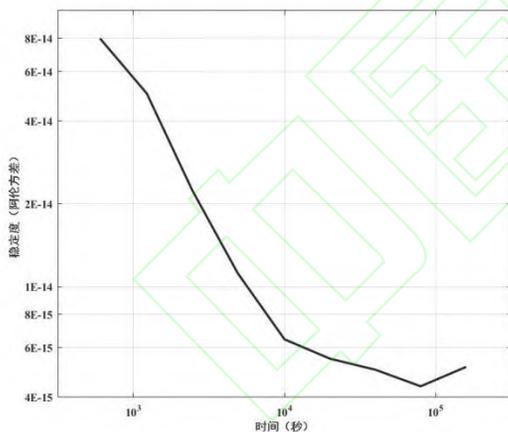
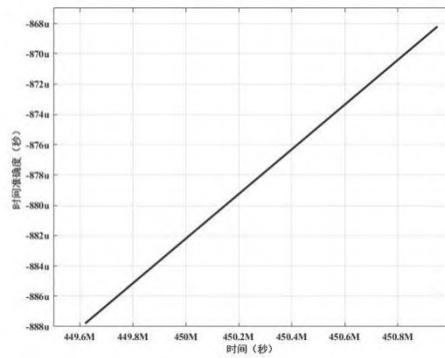


图 4 北斗三号系统时间天稳定度评估结果（数据长度 60 天）

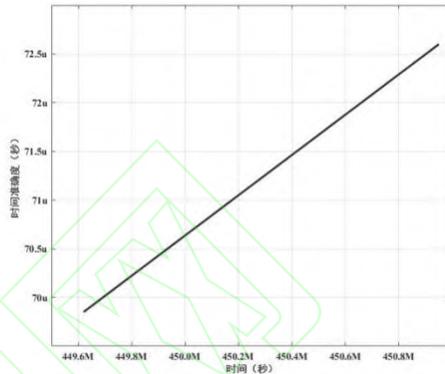
Fig.4 Day Stability Evaluation Results of BDS-3's Time

3.2 星载钟本地时间的准确度和稳定度

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号试验结果如图 5 所示。本次试验的监测时长为 1.6×10^6 秒，试验期间 M14 星的星钟总漂移偏差为 20 微秒，I1 星的星钟总漂移偏差为 2.5 微秒。根据原子钟时间准确度的定义，M14 星时间准确度为 1.25×10^{-11} ，I1 星时间准确度为 1.6×10^{-10} 。



(a) M14

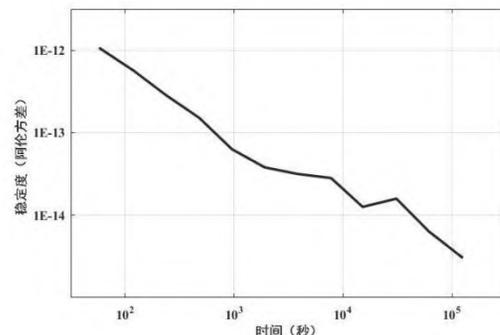


(b) I1

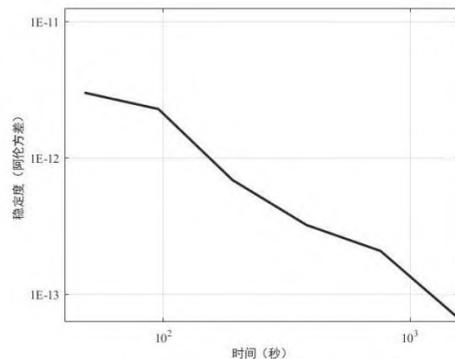
图 5 北斗三号卫星时间准确度试验结果

Fig.5 Time Accuracy Evaluation Results of BDS-3

对 M14、I1 星的时间偏差进行天稳定度评估（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度为 1.65×10^{-14} ，I1 星万秒稳定度为 9.9×10^{-13} 。



(a) M14



(b) I1

图 6 北斗三号卫星时间万秒稳定度评估结果

Fig.6 10000s 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 1.25×10^{-11} ，万秒稳定度优于 1.65×10^{-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试验结果
Tab.2 Time Accuracy and 10000s Stability Evaluation Results for several BDS-3 satellites

北斗三号卫星	监测时间段 (秒)	星载钟本地时间的准确度		星载钟万秒稳定度	
		试验结果	设计要求	试验结果	设计要求
M13 星	1.6×10^6	1.07×10^{-11}	2×10^{-11}	1.65×10^{-14}	3×10^{-14}
M14 星	1.6×10^6	1.25×10^{-11}		1.65×10^{-14}	
M18 星	1.6×10^6	3.8×10^{-10}		1.58×10^{-14}	
11 星	1.6×10^6	1.6×10^{-10}		9.9×10^{-13}	

3.3 GNSS 时间偏差监测

时间性能直接影响着导航系统 PNT 性能，所以各导航系统都力求将自己的导航系统保持的系统时间性能不断提高。同时，系统监时差监测精度直接影响着各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 10ns 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 时差监测技术试验。图 7 是单站法 GNSS 时差监测原理，图中参考主钟 (Reference Master Clock) 一般为协调世界时的物理实现，比如 UTC(NTSC)。

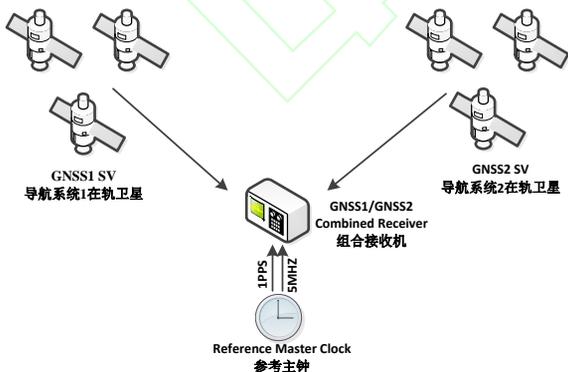


图 7 单站法时差监测原理

Fig.7 Time Difference Monitoring Principle by Single Satiation

按照图 7 原理，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结算 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 秒)。

以 UTC(NTSC)为参考，单站法 GNSS 时差实际计算过程：

第一步，计算 $\Delta T_i = \text{UTC(NTSC)} - \text{GNSST}(i)$ ；

第二步，计算 $\Delta T_j = \text{UTC(NTSC)} - \text{GNSST}(j)$ ；

第三部，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 是 2019 年 1 月 1 日至 2019 年 11 月 30 日，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。

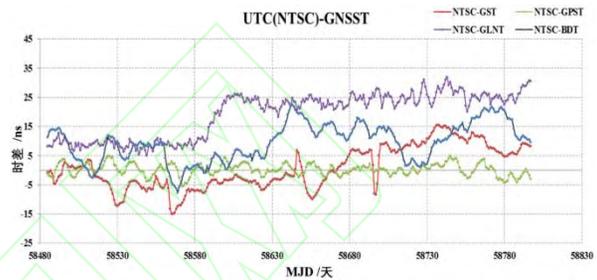


图 8 GNSS 时间偏差监测结果

Fig.8 Time Difference Monitoring Results of GNSS

从图 8 中可以看出，在 11 个月的时差监测中，GPS 系统时间保持较稳定，其他三个导航系统的波动相对较大。相对于 UTC(NTSC)，BDT 的波动范围在 26ns 以内；GST 的波动范围在 32ns 以内；GPST 的波动范围在 10ns 以内；GLNT 的波动范围在 35ns 以内。这种波动直接表现为 GNSS 系统授时的稳定度。基于上述检测结果，采用实验中提出的解算方法，我们何以方便地得到 GNSS 系统间的时差，见图 9 所示。

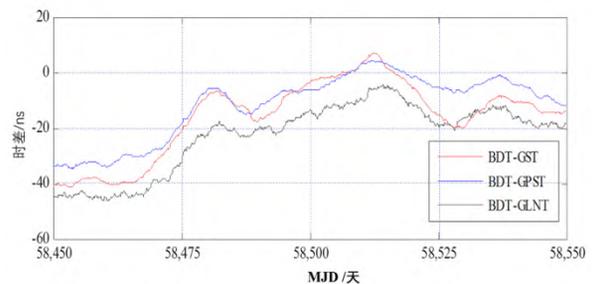


图 9 BDT 与其他卫星导航系统时差情况

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 50ns 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,结合我国北斗系统的特点,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,达到国际同类水平。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 H, Li X, Lu X, et al. Basis of time for navigation satellite system (in Chinese). *Science Press*, 2011.9 (吴海涛,李孝辉,卢晓春等. 卫星导航系统时间基础[M]. 科学出版社, 2011.9)
- [2]Yang Y, Lu M, Han C. Some notes on interoperability of GNSS (in Chinese). *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 Y, Xu Y, Li J, Yang C. Progress and performance evaluation of BeiDou global navigation satellite system: Data analysis based on BDS-3 demonstration system (in Chinese). *Science China Earth Sciences*, 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 J, Yang Q. Study on GNSS Interoperability (in Chinese). *Scientia sinica(physica, mechanica & astronomica)*, 2010, 40(05):534-540 (卢鋈, 杨强文. GNSS 互操作研究[J]. 中国科学, 2010, 40(05):534-540)
- [5]Wu Y. Key technologies of GNSS time scale (in Chinese). *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2017, 46(04):533 (伍贻威. GNSS 时间基准关键技术研究[J]. 测绘学报, 2017, 46(04):533)
- [6]Yuan H, Zhang J, Guang W. The study on different methods of time offsets monitoring of GNSS (in Chinese). *The 9th China satellite navigation academic annual meeting*, 2018 (袁海波;张继海;广伟. 不同 GNSS 时差监测方法研究[C]. 中国卫星导航学术年会, 2018)
- [7] Yang Y, Yang Y, Wang W, et al. Accuracy analysis of MGEX clock error products (in Chinese). *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2018,35(05):441-445 (杨宇飞,杨元喜,王威,赵昂. MGEX 钟差产品精度分析[J].测绘科学技术学报, 2018,35(05):441-445)
- [8]Yang Y. Progress, contribution and challenges of Compass/Beidou satellite navigation system (in Chinese). *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 H. Research on method of satellite-ground time synchronization base on Ka band ISL system of BDS(in Chinese). *University of Chinese Academy of Sciences (national time service center of 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]. 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2017)
- [10]Zhu J. Research on orbit determination and time synchronizing of navigation satellite based on crosslinks(in Chinese). *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]. 国防科学技术大学, 2011)
- [11]Yang Y, Yang Y, Hu X, et al. Comparison and analysis of two orbit determination methods for BDS-3 satellites (in Chinese). *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 Y, Ren X. Maintenance of Space Datum for Autonomous Satellite Navigation (in Chinese). *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 R, Wei Z, Jia X. BDS-3 satellite orbit and clock determination with one-way inter-satellite pseudorange and monitoring station data (in Chinese). *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 Y, Song X, Jia X, et al. Naturalisation Method Research on Inter-Satellite Link Observation Data (in Chinese). *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(10): 1201-1206 (毛悦, 宋小勇, 贾小林. 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 H, Zhong C. Research on Time Keeping Algorithm of the Autonomous Navigating of Navigation Constellation (in Chinese). *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 Y. Adaptive Kalman filtering algorithm for atomic clock state model(in Chinese). *Journal of Time and Frequency*, 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]. 时间频率学报, 1990, 13(2): 84-93)
- [17]Liu S, Jia X, Sun D. Performance Evaluation of GNSS On-board Atomic Clock(in Chinese). *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(02):277-284)
- [18]Wu Y, Yang B, Xiao S, Wang M. Atomic Clock Models and Frequency Stability Analyses(in Chinese). *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(8): 1226-1232 (伍贻威, 杨斌, 肖胜红, 王茂磊. 原子钟模型和频率稳定度分析方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(8): 1226-1232)
- [19]Zhu F, Zhou L, Sun J, et al. Time synchronization based on intersatellite laser communication links (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2021, 51(1): 162-167 (朱福南, 周黎莎, 孙建锋, 陈卫标. 基于激光通信链路的星间时间同步技术[J]. 中国科学:物理学天文学, 2021, 51(1): 162-167)
- [20]Hang Y, Wang H, Zhang S. Remote time and frequency transfer experiment based on BeiDou Common View[C]//*European Frequency and Time Forum (EFTF)*, 2016.
- [21]Liang K, Zhang A, Pei C, Zuo F. Preliminary Implementation of Time and Frequency Transfer by BDS[C]. *Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium*, 2013.
- [22]Li W, Zhang J, 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*, 2015.
- [23]Yuan H ,Guang W , Yang F. Time service through BD GEO satellites[C]. *Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC)*, 2013.
- [24]Guo S, Cai H, Meng Y, et al. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance (in Chinese). *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2019,48(7):810-821(郭树人,蔡洪亮,孟铁男,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)

Design and implementation of time and frequency architecture for BeiDou-3 system

Lu Jun¹ Wu Jianfeng² Yuan Haibo² Shen Jianhua³ Meng Yinan¹ Su Chengeng¹ Chen Ying¹

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 navigation satellite 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 then the unification of BeiDou system 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 4.6×10^{-15} , the local time accuracy of satellite clocks reached 1.25×10^{-11} , the 1000s frequency stability of satellite clocks reached 1.65×10^{-14} , and the time difference between BDS and other navigation satellite system maintained within 50ns.. **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.

Keywords: time and frequency; time synchronization; time and frequency traceability; time difference monitoring

First author: LU Jun, PhD, research fellow, satellite navigation technology. E-mail: lujun@beidou.gov.cn

Corresponding author: Meng Yinan, PhD, engineer. E-mail: shenj1217@163.com

Fundation support: The National Natural Science Foundation of China(42074044); the Young Elite Scientist Sponsorship Program By CAST (2019QNR001).

网络首发:

标题: 北斗三号系统时频体系设计与实现

作者: 卢鋈, 武建峰, 袁海波, 申建华, 孟轶男, 宿晨庚, 陈颖

收稿日期: 2021-12-09

DOI: 10.13203/j.whugis20200529

引用格式:

卢鋈, 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, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20200529 (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, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20200529)