

北斗双向授时技术在遥测地面站组网中的应用研究

张启福, 李景伟, 刘志全, 刘兴宇, 郭青瑞, 孟 聪
(甘肃酒泉十四支局 酒泉 735018)

摘要: 卫星授时以其安全、可靠、稳定、精准等优势广泛应用于各领域。本文立足遥测地面站对时间的高精度、协同性、实时性、网络化的需求, 在简述了几种典型授时技术应用特点的基础上, 深入开展了北斗卫星授时技术研究。首先对北斗时间系统的组成, 以及单向、双向授时技术优缺点等进行了论证, 重点分析了RDSS(Radio Determination Satellite Service, 卫星无线电测定业务)双向授时的技术实现、理论推导、误差影响和精度评估等; 然后, 结合遥测地面站授时现状和需求, 提出了遥测地面站组网应用中时统的总体思路, 通过三级控制、统一溯源、内外互联、由点到面的模式, 构建了“以北斗双向授时为主, NTP(Network Time Protocol, 网络时间协议)计算机网络授时为辅”的网络化授时体系, 并对遥测地面站组网应用场景和入网策略进行了分析论证。本文研究具有较强的实践性和可行性, 可为网络化授时应用提供参考。

关键词: 北斗卫星; RDSS双向授时; 遥测组网; NTP计算机网络; 授时体系

中图分类号: TB22 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)03-0061-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20221209001

引用格式: 张启福, 李景伟, 刘志全, 等. 北斗双向授时技术在遥测地面站组网中的应用研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(3): 61-68.

Research of BeiDou bidirectional time service technology in telemetry ground station network

ZHANG Qifu, LI Jingwei, LIU Zhiqian, LIU Xingyu, Guo Qingrui, Meng Cong
(Gansu Jiuquan 14th Branch, Jiuquan 735018, China)

Abstract: With its advantages of safety, reliability, stability and accuracy, satellites are widely used in various fields. Based on the requirements of telemetering ground stations for high accuracy, coordination, real-time and networking of time, the paper introduces several typical time service technologies and conducts in-depth research on BeiDou satellite time service technology. Firstly, the composition of BeiDou time system and the advantages and disadvantages of single and two-way time service technical realization, theoretical derivation, error impact and accuracy evaluation of RDSS two-way time service are analyzed emphatically. Then, combined with the current situation and requirements of the telemetering ground station time service, the general idea of time unification in the telemetering ground station networking application is proposed. Through three-level control, unified traceability, internal and external interconnection, and point-to-point mode, a networked time service system of "BeiDou two-way time service as the main, NTP computer network time service as the auxiliary" is constructed. The network application scenario and network access strategy of telemetry ground station are analyzed and demonstrated. The research has strong practicality and feasibility, and can provide reference for networked time service application.

Keywords: BeiDou satellite; RDSS Two-way time service; Telemetering networking; NTP computer network; Timing system

Citation: ZHANG Qifu, LI Jingwei, LIU Zhiqian, et al. Research of BeiDou bidirectional time service technology in telemetry ground station network[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(3): 61-68.

引 言

时间在我们生产、活动中发挥着十分重要的作用, 已广泛融入人工智能、通信、电力、交通、

航天、遥测、卫星定位等诸多行业领域, 可以为各类设施设备提供准确的时刻和间隔基准^[1], 尤其是在武器装备的发展中, 时码的应用更为重要和关键。遥测地面站作为获取高动态、远距离、长

航时飞行目标内部状态参数, 并对运行过程进行实时监控的主要装备, 已普遍应用于各类测量任务中^[2]。遥测地面站包括测量和安控两个重要功能, 前者负责信号的接收、解调、处理、存储和显示等。后者负责安控指令的生成、发送、接收、判别等, 在这些环节中, 时间作为遥测数据配时的关键参数, 需要有序、及时、准确地分发到各个分系统、设备终端和电子器件上, 从而保证遥测的井然有序, 以及事后处理中数据拼接、判别、评估的协同性。同时, 由于单一遥测地面站的作用能力有限, 多个地面站组网可延伸测控效能, 并实现网络化体系管理, 已成为发展的必然趋势, 因此, 这对于时间同步的要求将更加严格。

相比其他授时技术, 卫星授时技术具有实时性强、精度高、全天候、全天时等显著特点, 尤其是随着我国北斗三号系统建成, 北斗卫星授时以其安全、可靠、稳定、精准、抗干扰性强等优势, 不断得到重视和发展, 在我国科技、军事领域展现了巨大的效益。当前, 遥测地面站主要通过 GPS、北斗、GLONASS 等卫星授时终端获取时间, 不同地面站采用不同的终端类型和时码格式, 造成来源多样、格式各异、空地同步难, 主要体现在: 一是时码终端产品型号多、性能各异、厂家层次不齐, 组网各站时间不统一; 二是被测目标与地面站间通过无线信号传输, 受扰因素多, 时间同步存在偏差。同时, 一些国外的授时系统无法保证精度和可靠性, 由于跟踪卫星过少、卫星健康状况差、误差修正模型不精细等原因, 可能会造成几十甚至上百毫秒误差^[3], 尤其是在一些敌我对抗背景和形势下, 卫星导航定位干扰将严重影响授时。这些情况对于遥测信息的采集、判别、归整, 以及多源数据后处理等, 都会产生一定的困难。为此, 开展基于我国自主研发的北斗卫星授时技术在遥测地面站组网中的应用研究十分必要。

1 典型授时技术的发展

一般而言, 通信是授时的基础, 所以说, 有一种通信方式就会伴随着一种授时技术。20 世纪以来, 随着各种通信技术的发展, 相继出现了短波授时、长波授时、低频时码授时、广播电视授时、电话授时、计算机网络授时、卫星授时等技术^[4]。这些技术各有优势和不足, 相应的设备主要

集中在中国科学院国家授时中心(National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, NTSC), 可应用于不同的业务需求, 下面对几种典型的授时技术进行介绍。

1.1 短波授时(BPM)

通过频率范围为 3-30 MHz 的短波无线电信号发播标准时间频率信号, 信号覆盖范围可达 3 000 km, 时间准确度在毫秒级, 主要是依靠电离层反射的天波作为授时信号的传播载体。我国的短波授时台在 1970 年建成, 1981 年开展短波授时服务, 以 1 小时为周期重复发播 UTC(Universal Time Coordinated, 协调世界时)、UT1 时号以及载波、发播台 ID 识别信号。目前普遍应用于通信装备、航空航天航海等领域。

1.2 长波授时(BPL)

采用频率范围为 30~300 kHz 的无线电信号进行时间频率的传递, 借助沿着地球表面传播至接收点的地波信号和经过电离层反射到达接收点的天波信号这两种载体。这样做的优势在于, 可以合理利用地波信号传播路径的稳定性和传播时延的精确预测性, 实现高精度的授时, 精度可达微妙量级。目前是航天测控、国防时统等领域的主要设备。

1.3 低频时码授时(BPC)

低频时码授时以铯原子钟作为时间基准, 采用 30~300 kHz 的无线电连续波传播时间信号, 并通过卫星共视技术, 实现了用户接收机向 NTSC 产生和保持的 UTC 的溯源, 主要有地波、天波两种载体, 授时精度微秒级, 覆盖半径 3 000 km, 具有传输距离远、抗干扰能力强、信号稳定等特点, 现已广泛应用在国防、交通、科技等领域。

1.4 计算机网络授时

网络授时是随着计算机技术和互联网技术发展而兴起的一种新的授时服务, 在一个局域网或者广域网内, 通过服务器和用户机之间的特定信息交互, 对用户机的内置时间进行校准, 以实现网络内所用用户机终端时间同步。当前, 主要应用的是基于 NTP 和 PTP(Precision Time Protocol)两种网络协议的同步方式。前者精度达毫秒级, 使用简便易行。后者可达微秒甚至纳秒级, 但对于硬件要求高。在一般意义上, NTP 授时应用比较普遍, 尤其是在一个与外界隔绝的局域网内, NTP 授时具有安全、便捷、快速等特点, 这比较适合

遥测地面站组网中站间、站内分系统间、计算机终端间的时统，第三节中将重点分析论证。

1.5 卫星授时

1957年苏联第一颗人造卫星上天，开启了人类在太空建立参考站的序幕，之后美国建立子午仪卫星导航系统，初步具备授时和定位功能。随着技术的发展和需求的提高，1994年，美国建成GPS系统，相继俄罗斯、欧盟、中国、日本、印度等都建立了各自的导航定位系统^[4]，卫星授时以其精度高、应用广、全球化、智能化的特点受到各领域广泛的青睐，迅速成为当前主要的授时手段。

2 北斗卫星授时技术分析

北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation System, BDS, 简称“北斗系统”)是我国自主研发、独立运行的全球卫星导航系统，从1994年建设论证双星试验系统，到2012年建成北斗二号，再到2020年7月初步建成北斗三号，包括30颗卫星的北斗系统实现全球化布局，开始提供高精度的导航、定位、授时和通信服务，开放的B1I、B1C、B2a、B2b、B3I等五路公开信号为单双频接收设备提供了自由的选择^[5]。时间作为测量、定位

的基础元素，源源不断地向系统以及外部用户提供溯源基准。

2.1 北斗时间系统组成

相比其他卫星导航系统，北斗系统的内部时间主要通过地面控制站生成和保持。在北斗三号上还建立了独立于地面控制站的星间组网和测距体系，既保证了干扰环境下的空间卫星相对地面控制站独立运行，又确保了空地之间时间的精确同步，搭建起了北斗系统安全、高效的时间系统。

北斗时间系统主要由守时钟组、内部测量系统、外部比对系统、数据处理系统以及信号产生系统等5部分组成，是一整套的软硬件系统，其首要任务是为整个北斗系统提供统一的时间参考，即北斗系统时间(BeiDou System Time, BDT)^[1]。北斗时间系统的关键在于对守时钟组的合理配置，是将分布在多个地区铯、氢原子钟输出的时间进行综合调配。原子钟是守时钟组的核心设备，称为北斗系统的“心脏”，氢钟短期精度高，铯钟长期稳定性好，卫星搭载的铷钟体积小、功耗低、可靠性高、寿命长。这些原子钟通过远程时间比对、实验室内部比对等方式，产生系统时间，然后向UTC(NTSC)溯源，最终生成与国际UTC同步的时间基准^[6]，如图1所示。

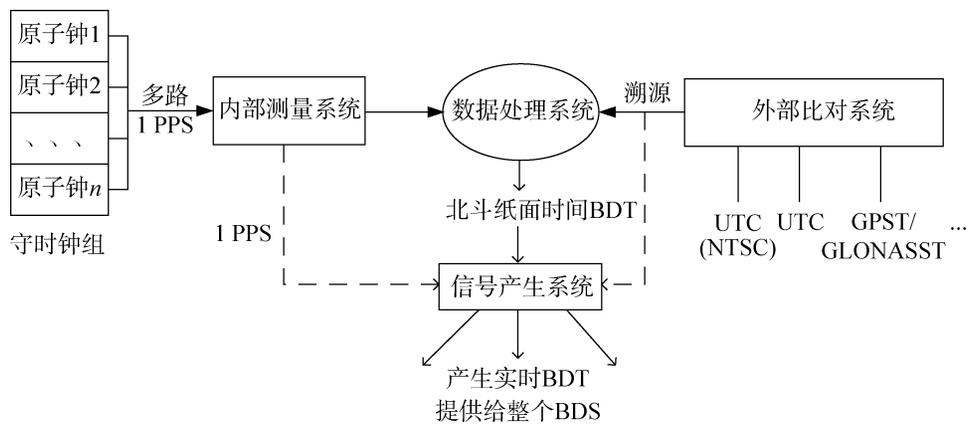


图1 北斗时间系统组成图

Fig.1 Composition diagram of BeiDou Time System

BDT起始历元为2006年1月1日零时零分零秒的UTC时，以原子时秒长为基本单位，采用周和周内秒连续计时，无闰秒，周上可以记录150年左右，秒上范围0~604 799 s。由于时间累积，BDT与UTC存在常量差，这个常量差在导航电文中实时播发给用户，用于完成用户本地时间的修正。

2.2 北斗双向授时技术分析

授时是北斗系统的基本服务之一，也是实现用户定位、定时的前提要素。对于遥测地面站，时间是遥测数据的标识，是被测目标内部参数和状态变化情况的实时反馈，具有十分重要的作用。按照10 Mbps码率计算，在1 ms的时间误差可能产

生上千字节的数据错差, 直接影响数据质量。

目前, 北斗系统可提供三种授时方式: 第一种是 RNSS 单向授时(Radio Navigation Satellite Service), 第二种是 RDSS 单向授时(Radio Determination Satellite Service), 第三种是 RDSS 双向授时(Radio Navigation Satellite Service)^[7]。通过详细对比分析可知, 前两种单向授时都是由用户终端接收卫星信号, 利用观测量信息自主完成时差的计算。这两种授时中, 卫星观测量参与解算, 会受到星历误差、大气时延改正残留误差、多路径效应等因素影响; 同时, 单向授时主要通过地球静止轨道卫星(GEO)实现, GEO 卫星的轨道姿态调整会大大影响星历精度, 致使授时精度严重变差。而 RDSS 双向授时以卫星为中继, 地面控制中心直

接将时间信息转发给用户, 可较大程度上避免上述影响, 授时更加稳定、精确。

RDSS 双向授时需要用户终端同时具备接收和应答发射能力。通过用户申请、地面控制中心反馈的方式进行, 卫星只作为中转站, 避开了观测量解算环节, 从源头直达末端。主要流程为: 首先, 用户向地面控制中心发射申请信号, 地面控制中心收到后, 计算出用户终端到卫星的单向传输时延; 然后, 通过出站信号将此时延信息经卫星转发给用户, 修正本地时间, 实现本地时间与 BDT 同步; 最后, 用户再结合出站信号中 BDT 与 UTC 偏差, 计算本地时间与 UTC 时差, 再次修正本地时间, 实现本地时间与 UTC 同步, 完成授时, 如图 2 所示。

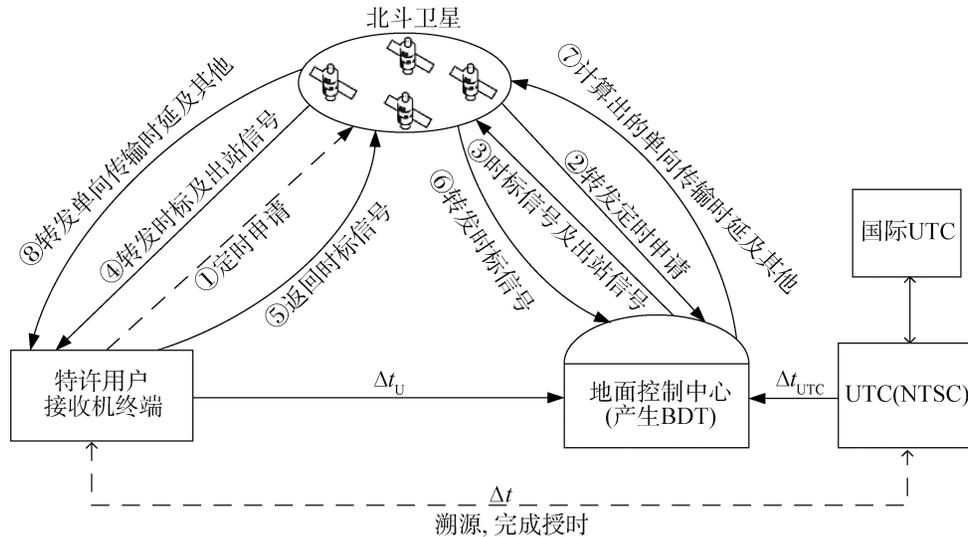


图 2 北斗 RDSS 双向授时流程图

Fig.2 Flow chart of bidirectional time service of BeiDou RDSS

设本地时间和 UTC 的时差为 Δt , 出站信号中 BDT 与 UTC 的偏差 Δt_{UTC} 已知, 因此关键是求解本地时间与 BDT 的时差 Δt_U 。授时可以分为两条链路, 链路一是“地面控制中心—卫星—用户”, 这个过程与 RDSS 单向授时类似; 链路二是“用户—卫星—地面控制中心”。以此列出链路方程为:

$$\begin{cases} \Delta t_{U1} = (t_{rc}^U - t_{sc}^C) - \tau_{up1} - \tau_{down1} - \tau_{other1} \\ -\Delta t_{U2} = (t_{rc}^C - t_{sc}^U) - \tau_{up2} - \tau_{down2} - \tau_{other2} \end{cases} \quad (1)$$

其中, t_{sc}^C 、 t_{rc}^U 、 τ_{up1} 、 τ_{down1} 、 τ_{other1} 表示链路一的控制中心发射信号时间、用户接收信号时间、地面控制中心到卫星的空间几何传播时延、卫星到用户的空间几何传播时延、其他时延; t_{sc}^U 、 t_{rc}^C 、 τ_{up2} 、

τ_{down2} 、 τ_{other2} 表示链路二的用户发射信号时间、控制中心接收信号时间、用户到卫星的空间几何传播时延、卫星到地面控制中心的空间几何传播时延、其他时延; 由于两条链路的路径相似, 则 τ_{up1} 与 τ_{down2} 、 τ_{down1} 与 τ_{up2} 、 τ_{other1} 与 τ_{other2} 都基本上相等, 相互误差在纳秒量级, 可忽略。

将式(1)中的两个方程相减, 则有:

$$\Delta t_U = \frac{1}{2} [(t_{rc}^U - t_{sc}^C) - (t_{rc}^C - t_{sc}^U)] + \sigma \quad (2)$$

$$\Delta t = \Delta t_U + \Delta t_{UTC} \quad (3)$$

由此可见, 只需要观测 1 颗或少许卫星就可实现授时, 避开了传统卫星授时需要先定位, 后解算时间的问题, 这对于一些复杂电磁环境、信号

弱的地域,以及干扰对抗背景下有效获取精准时间信息具有十分重要的应用价值。

2.3 RDSS双向授时精度评估

信号在空间传播,不同于真空无干扰的环境,必然存在误差,这样就会对授时精度产生影响。同时,用户接收机终端产品层出不穷,在硬件配置、信号处理、核心算法上各有差异,也会产生误差。

从影响层级分析,主要有4个方面误差。第一类,与信号空间传播有关的误差,主要包括电离层时延、对流层时延,属于系统误差^[8];电离层时延经建模改正后的误差约为17 ns;对流层时延受用户所处地域气象影响大,采用经验模型解算后,误差影响可控制在5 ns以内。第二类,与用户周围环境对信号反射有关的误差,主要是多路径误差,属于随机误差,严重时可导致信号失真、失锁,其产生的影响在5 ns左右。第三类,是卫星发射端存在的误差,主要与卫星有关,包括卫星钟差、星历误差等,属于系统误差;两者可通过地面控制中心解算后转发给用户,修正后的卫星钟差误差约为7 ns,星历误差影响约17 ns。第四类,用户接收机误差,主要包括接收机钟差误差、接收机天线相位中心误差、接收机噪声等;接收机钟差误差可作为未知量解算,接收机天线相位中心误差是天线相位中心与其几何中心不一致而产生的,影响较小,可忽略;接收机噪声与通道时延、放大器及电子设备热噪声、接收机时钟频率噪声等有关,属于随机误差,可通过多次观测进行估算,其影响最大约3 ns。

综合上述4个方面的误差影响,可对授时精度进行评估。则有:

$$\sigma_U = \delta_{\text{TDOF}} \times \sqrt{\sigma_{\text{ion}}^2 + \sigma_{\text{tro}}^2 + \sigma_{\text{mul}}^2 + \sigma_a^2 + \sigma_b^2 + \sigma_c^2 + \sigma_d^2} \quad (4)$$

其中, σ_U 、 σ_{ion} 、 σ_{tro} 、 σ_{mul} 、 σ_a 、 σ_b 、 σ_c 、 σ_d 表示授时精度、电离层时延、对流层时延、多路径误差、卫星钟差、星历误差、接收机噪声、接收机钟差误差。 δ_{TDOF} 表示时间精度因子,典型值取1.5。

经计算,双向授时精度约为39 ns。

3 遥测地面站组网应用情况

3.1 遥测地面站授时现状

遥测地面站担负被测目标飞行过程中标识状态的数字量、模拟量、开关量、图像、定位等内

部数据的接收职能,为目标性能和技术指标的验证、评估提供最为有效、可靠、高精度的数据支撑。当前,遥测地面站设备多样性趋势明显,有固定式、机动式、无人式等,各型设备一般具有自身的时码终端,一方面厂家型号种类多,主要包括GPS、北斗、内部晶振,以及GPS/GLONASS/BD多系统组合的终端^[9],单就GPS而言,就有NovAtel、Javad、Trimble、Topcon等诸多不同厂家,而各个厂家又因内嵌式程序和算法不同,配备诸多不同型号的时码卡,这在同一任务保障上会出现授时多元性现象;另一方面,地面站需要实时接收目标位置引导跟踪信息,如果地面站与卫星定位站的时间有偏差,就会导致引导偏差,尤其是对于高超音速目标,1秒就会偏差数公里,导致小波束的遥测设备跟踪失效。

3.2 遥测地面站组网授时分析

伴随着军事技术的不断发展,被测目标的速度越来越快、高度越来越高、航程也越来越远,威力有限的单套遥测地面站已经无法适应全程测量的需求,多套地面站组网保障成为必然趋势。

通过灵活调配多套固定站、机动站和无人站,合理配置在测控走廊,不仅实现全程测量的无缝衔接,而且确保关键区域的双备份保障。这个过程就涉及到网络内各地面站之间的协同、接力,不仅是在设备的效力范围上,更是在所获测量数据的拼接上。目前,在一次远距离、跨区域测量中,一般需要至少布设五到七套地面站,各站通过光纤、网线、移动通信等不同方式与控制中心交联,将测量数据实时汇聚至控制中心进行解密、解算、处理、显示等。每个站传输的数据都带有独立的时码信息。实践证明:由于各站的时间来源不同,且站内各分系统和配套计算机的取时基准、时间精度、误差累积也不同,导致站间的输出时间误差一般可达亚秒甚至数秒级^[9]。这个时间偏差致使控制中心在同一时间接收的数据无法“对齐”,尤其对于新型高码率目标更为严重,不仅无法及时判读被测目标真实状态,而且在事后效能评估中对多站数据“拼接”十分困难,难以实现多站网络化体系协同。如图3所示。

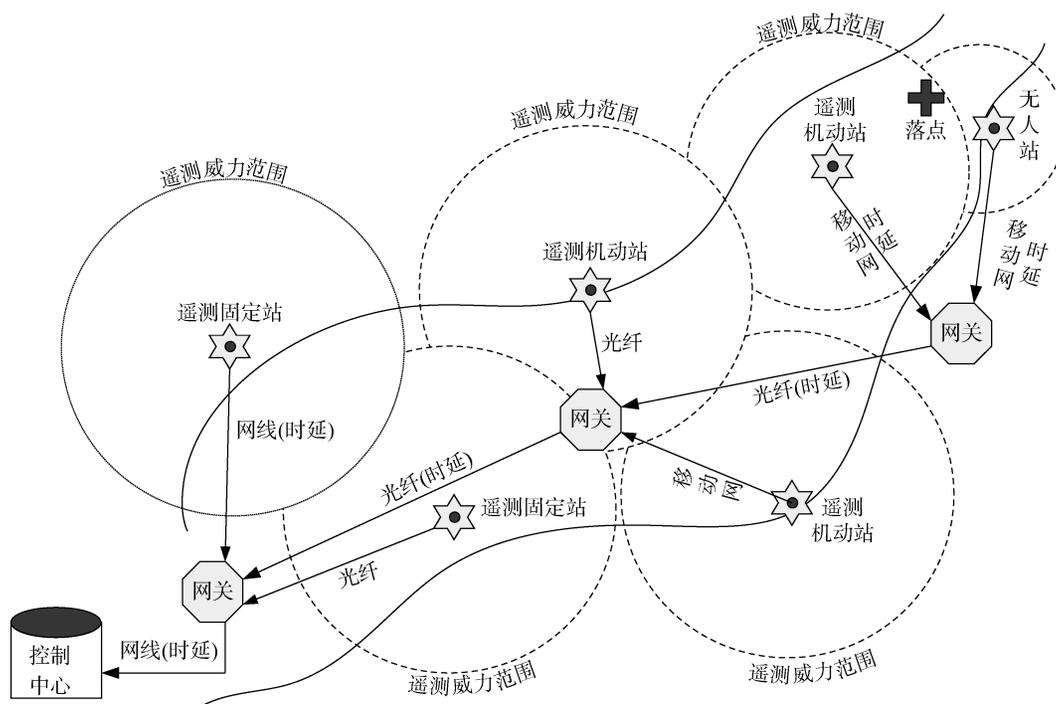


图 3 遥测地面站组网授时示意图

Fig.3 Telemetry ground station networking and time service diagram

4 北斗统一授时网络体系构建思路

4.1 总体技术思路

针对上述遥测地面站组网授时情况, 为满足网络化体系协同、无缝接力保障、不同类型设备数据精确“拼接”等测量需求, 就需要建立一个高精度的标准时间作为统一授时基准, 以“总”统“分”, 实现不同源数据“对齐”的时效性和准确性。目前, GPS 时钟服务器实现网络内计算机、服务器时间同步, 授时精度为 1~10 ms, 且 GPS 授时存在安全性不高、主控性不足的情况, 而北斗双向授时技术以其独特的优势, 兼具可溯源、保密强、抗干扰、安全可控等特点, 授时精度在纳秒级^[10], 可作为高精度统一授时基准, 必将在组网应用中发挥重要作用。

北斗统一授时应用体系的主体思想是, 构建“以北斗双向授时为主, NTP 计算机网络授时为辅”的授时系统。通过中心控制站、北斗授时基准站、遥测地面站等搭建三个层级的控制架构。第一级架构发挥统一向 UTC 溯源的功能; 第二级架构实现“由点到面”扁平化、区域性辐射, 传递标准时间; 第三级架构作为末端用时终端, 一方面基于 NTP 网络授时保证单站各分系统和计算

机时统, 另一方面通过内外互联, 完成站间信息交互的时统。以此建立统一溯源、三级控制、互为校验的网络化授时体系。

4.2 应用场景和入网策略分析

北斗统一授时应用体系可广泛应用于长航程、跨区域、组网式测量任务中, 将布设在不同的区域的固定站、机动站、无人站等接入同一网络, 通过逐级控制、节点辐射, 实现组网地面站内部、站间的统一授时, 让精准时间信息从顶层直达末端。

具体的入网策略可包括三个过程:

第一步, 在测量区域的多个关键站点布设北斗双向授时基准设备, 形成授时基准站, 可覆盖一定测区范围, 通过光纤网将各授时基准站连接至中心控制站, 一方面基准站通过接收北斗卫星信号实现双向授时, 另一方面中心控制站向产生 UTC 的地面控制中心溯源, 以此实现一级组网, 作为一级控制架构。各基准站与中心控制站实时交互时间信息, 实现基准网内的时间同步, 精度可控制在纳秒量级。

第二步, 以每个授时基准站为二级授时控制单元, 在不设置中间节点的情况下, 由点到面直接辐射控制下辖区域的遥测、卫星定位等装备,

这个传输采用直达式光纤网，如果不具备条件，需要采用中转或其他传输方式，则要综合考虑距离长短、网络稳定性、通信延迟等因素进行相应的时间同步补偿^[1]，以此可保证网络内各型装备的时间统一，同时对一些装备自带的时码终端进行校正，作为特殊情况下的备份和比对手段。以此建立二级控制架构。

第三步，以每型装备为三级授时控制单元，利用基于NTP网络协议对下分的配属数据处理计算机和设备分系统进行局域网授时，NTP服务器终端(布设在授时基准站)的时间可直接向卫星时间信号溯源，保证单型装备内部时间信息的稳定性

和独立性；同时，对部分有信息交互需求的不同装备(如卫星定位与遥测)，通过服务器互联，建立广域网下的NTP网络授时，这样就保证了不同装备之间、单装内不同计算机之间的时间同步。如果出现故障，可将故障定位在单装或计算机上，不会影响整体任务进度，从而大大提高了效力，有效控制了任务风险。

同时，以二级授时控制单元为预留组网接入点，对增加或临时调配的其他测控装备进行实时入网授时，形成了整体稳定、随机拓展的网络体系，并保证了网络化内所有装备的测量时统，如图4所示。

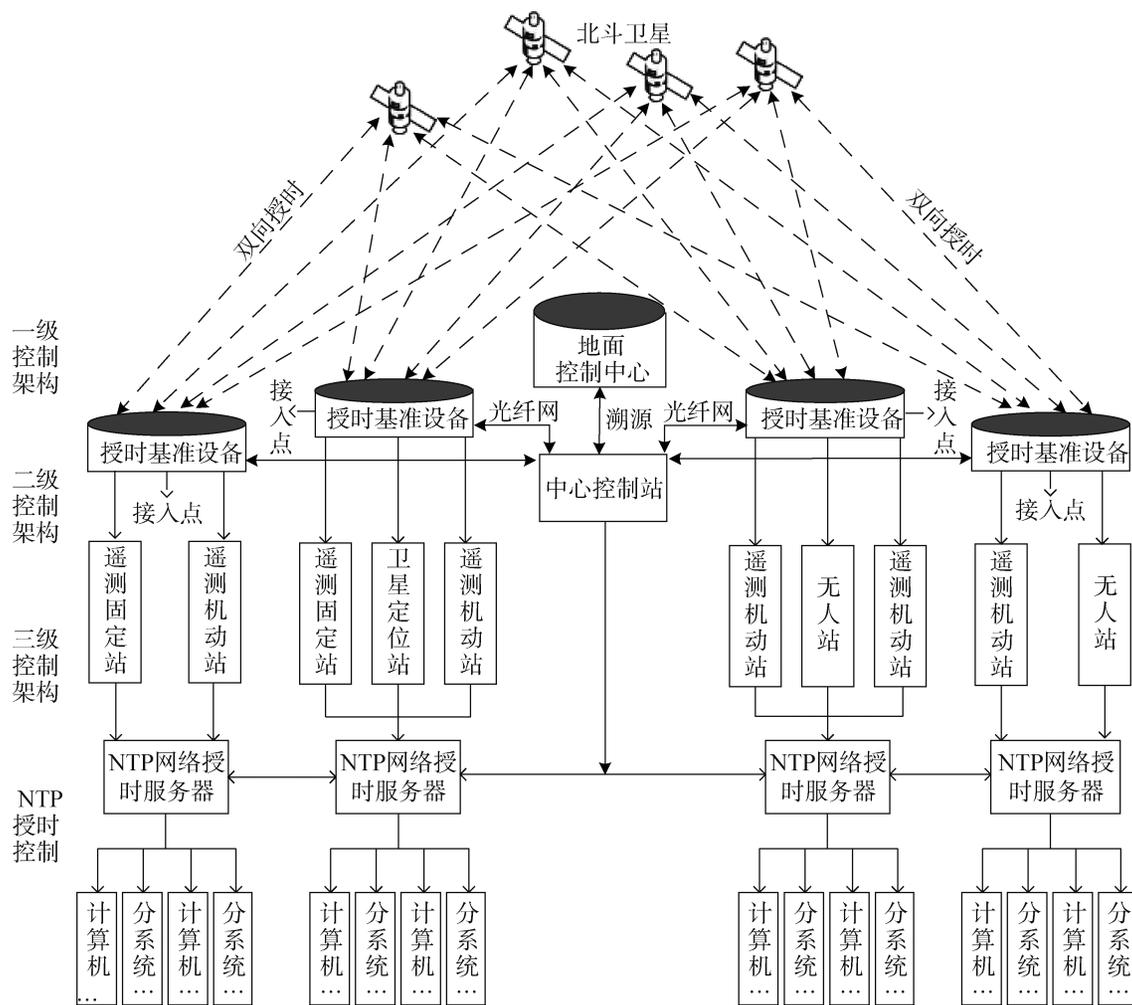


图4 北斗统一授时网络体系

Fig.4 BeiDou unified time service network system

5 结束语

本文基于遥测地面站授时多源、可靠性不足的现状，以及组网保障中对时间信息的协同性、

实时性、网络化等需求，构建了“以北斗双向授时为主，NTP计算机网络授时为辅”的多站网络化统一授时体系。首先，在对比分析现有典型授时技术发展特点和应用情况的基础上，指出了北

斗卫星授时的技术优势,介绍了北斗时间系统组成,论证了RNSS单向授时、RDSS单向授时和RDSS双向授时的优缺点,重点对北斗RDSS双向授时的技术实现、理论推导、误差影响和精度评估等进行了全面分析。然后,结合遥测地面站授时多元性、引导时间偏差、组网数据“拼接”困难等实际问题,提出了多站组网应用中时统构建的总体思路,构建了三级控制、统一溯源、内外互联、由点到面的网络化授时体系,并对遥测地面站组网应用场景和入网策略进行了分析。该思路提高了授时的稳定性、鲁棒性,减少了精度损失,具有较强的实践价值和可行性,可以为网络化统一授时提供参考。利用北斗卫星授时是未来必然趋势之一,尤其是随着“导航战”、“授时战”概念的提出和实践转化,授时环境将日益复杂严峻,需要在本文的基础上,进一步研究卫星共视技术、时间同步技术、地基增强网络差分技术^[12]等,更大程度上增强授时的精确性、安全性、可靠性。

参考文献

- [1] 吴海涛,李变,武剑锋.北斗授时技术及其应用[M].北京:中国工信出版集团,2016.
- [2] 李艳华,李凉海.现代航天遥测技术[M].北京:中国宇航出版社,2018.
- [3] 王庆涛,李彦爽,马瑞莉.北斗授时在燃气行业中的应用[J].卫星应用,2021(10): 52-54.
WANG Qingtao, LI Yanshuang, MA Ruili. Application of Beidou timing in gas industry[J]. Satellite Application, 2021(10): 52-54.
- [4] 谢钢. GPS原理与接收机设计[M].北京:电子工业出版社,2009.
- [5] 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 2.0 版)[OL]. [2013]. <http://www.beidou.gov.cn>
- [6] WU M, SUN B, WANG Y, et al. Sub-nanosecond one-way real-time service system based on UTC[J]. GPS Solutions, 2021, 25(2): 1-9.
- [7] 王宇,陈伟,范晓东. BDS多模授时技术在电力时间同步装置中的应用[J]. 导航定位学报, 2018(4): 46-50.
WANG Yu, CHEN Wei, FAN Xiaodong. Application of BDS multimode timing technology in power time synchronization device[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2018(4): 46-50.
- [8] 李响. GNSS单站授时技术及精度分析[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2020.
- [9] 袁炳南, 张国旺. 遥测网络时间同步技术实现及检测方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2018(26): 15-17.
YUAN Bingnan, ZHANG Guowang. Research on the realization and detection method of telemetry network time synchronization technology[J]. Computer Measurement and Control, 2018(26): 15-17.
- [10] 杨安洪, 卜鲍强, 姜忠武. 双模授时技术在航天测量设备中的应用[J]. 导航定位学报, 2015(3): 88-91.
YANG Anhong, BU Baoqiang, JIANG Zhongwu. Application of dual-mode timing technology in aerospace measurement equipment[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2015(3): 88-91.
- [11] 李芬. 北斗授时在电力计量系统工业物联网时钟同步的应用[J]. 卫星应用, 2021(7): 51-57.
LI Fen. Application of BeiDou time in power computing system clock synchronization in industrial internet of Things[J]. Satellite Application, 2021(7): 51-57.
- [12] XUE X, QIN H, LU H. High-precision time synchronization of kinematic navigation system using GNSS RTK differential carrier phase time transfer[J]. Measurement, 2021, 176(6): 109132.

[作者简介]

张启福 1986年生, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为遥测遥控与卫星导航定位技术。

李景伟 1976年生, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为遥测遥控与卫星导航定位技术。

刘志全 1987年生, 本科, 工程师, 主要研究方向为机动遥测遥控技术。

刘兴宇 1984年生, 本科, 工程师, 主要研究方向为卫星导航定位技术。

郭青瑞 1989年生, 本科, 工程师, 主要研究方向为机载测量技术。

孟 聪 1998年生, 本科, 助理工程师, 主要研究方向为卫星导航定位技术。

(本文编辑: 潘三英)