

北斗卫星水文遥测系统在中小河流水情监测中的应用研究

唐加勒克·托合塔尔汗

阿勒泰水文勘测中心

DOI:10.12238/hwr.v9i7.6474

[摘要] 本文聚焦北斗卫星水文遥测系统(BDS-HRMS)在中小河流水情监测中的核心应用,详细阐述了系统架构、关键技术及其在实时水位雨量监测、洪水预警预报、冰凌灾害监测、水资源调度与生态流量保障等方面的具体实践与效能。研究表明,BDS-HRMS有效克服了地理与通信障碍,显著提升了监测数据的时效性、完整性与可靠性,为中小河流的科学管理、灾害防御和水资源高效利用提供了坚实的数据基础和决策支持,具有广阔的推广前景。

[关键词] 北斗卫星导航系统; 水文遥测; 中小河流; 水情监测; 洪水预警; 水资源管理

中图分类号: TV213 文献标识码: A

Application Research of Beidou Satellite Hydrological Remote Monitoring System in Hydrological Monitoring of Small and Medium Rivers

Tang Jialeke·Tuohetaerhan

Altay Hydrological Survey Center

[Abstract] This paper focuses on the core applications of the Beidou Satellite Hydrological Remote Monitoring System (BDS-HRMS) in hydrological monitoring of small and medium rivers. It elaborates on the system architecture, key technologies, and their practical implementation and effectiveness in real-time water level and rainfall monitoring, flood warning and forecasting, ice flood disaster monitoring, water resources dispatch, and ecological flow assurance. The research demonstrates that BDS-HRMS effectively overcomes geographical and communication barriers, significantly enhancing the timeliness, integrity, and reliability of monitoring data. It provides a solid data foundation and decision-making support for scientific management, disaster prevention, and efficient utilization of water resources in small and medium rivers, showing broad prospects for promotion.

[Key words] Beidou Satellite Navigation System; Hydrological Remote Monitoring; Small and Medium Rivers; Hydrological Monitoring; Flood Warning; Water Resources Management

引言

新疆幅员辽阔,地形复杂,水资源时空分布极不均匀。数量众多的中小河流是绿洲灌溉、人畜饮水、生态维系的生命线。然而这些河流多分布于山区、荒漠边缘或偏远地带,水文站点稀疏,交通不便,常规的GPRS/GSM等通信网络覆盖不足或信号极不稳定,导致传统基于地面公网的水文自动测报系统在数据传输上存在“最后一公里”甚至“最后几十公里”的难题。数据的缺失、延迟或中断,严重制约了对中小河流水情(如水位、流量、雨量)的及时掌握,影响了洪水预警的时效性、水资源调配的精准性以及应对突发水旱灾害的能力。北斗卫星导航系统是中国自主研发、独立运行的全球卫星导航系统,其独特的全球短报文通信(RDSS)和区域短报文通信(RSMC)服务,具有覆盖范围广、无通信盲区、抗灾能力强、无需依赖地面移动通信网络等突出特点。这为解决新疆中小河流水文监测的数据传输瓶颈提供了理想的

技术路径。将北斗卫星通信技术与现代水文传感、数据采集技术深度融合,构建北斗卫星水文遥测系统(BDS-HRMS),已成为提升新疆中小河流水情监测现代化水平和保障能力的关键举措。

1 北斗卫星水文遥测系统(BDS-HRMS)概述

北斗卫星水文遥测系统是一种集成现代传感器技术、数据采集技术(RTU)、北斗卫星通信技术、计算机网络技术和水文预报模型于一体的综合性自动化监测系统。其核心在于利用北斗卫星的短报文通信功能,实现水文监测数据的远程、实时、可靠传输。

1.1 系统基本架构

BDS-HRMS采用清晰的分层架构设计,各层级紧密协作,共同实现水文信息的感知、传输、处理与应用:

(1) 数据采集层(前端)。位于河流监测站点,主要包括水文传感器(如压力式/雷达式水位计、翻斗式雨量计、流速仪/雷达

流量计、水温计、冰厚传感器等)、数据采集终端(RTU)和北斗通信终端(用户机)。RTU负责采集传感器数据,进行初步处理、存储,并按设定规则(定时、阈值触发)通过连接的北斗终端将数据以短报文形式发送至卫星。(2)数据传输层。北斗卫星星座作为通信中继。前端北斗用户机发出的短报文数据被北斗卫星接收,并转发至北斗地面运控系统的通信入站接收站。(3)数据处理与汇聚层(中心站)。北斗地面运控系统接收到的水文短报文数据解调、解密后,通过专线或安全网络传输至省级或流域级水文数据中心/水情中心。中心站部署数据接收服务器、通信服务器、数据库服务器和应用服务器。(4)应用服务层。数据中心对接收的原始报文数据进行解析、解码、合理性检查、入库存储。基于数据库,开发水情信息管理系统、洪水预警预报系统、水资源管理系统等应用平台,为防汛抗旱指挥、水资源调度、工程运行管理、生态保护等提供信息服务和决策支持。

1.2 核心技术特点

BDS-HRMS在新疆中小河流水情监测场景中展现出显著的技术优势和核心竞争力:

(1)无通信盲区覆盖。北斗卫星信号覆盖全国及周边地区,尤其适合新疆戈壁、沙漠、高山等公网信号无法覆盖或信号微弱的偏远中小河流区域,彻底解决数据传输的“孤岛”问题。(2)高可靠性传输。北斗通信链路独立于地面公网,受极端天气(如暴雨、暴雪、沙尘暴)、地质灾害或人为破坏影响小,在灾害发生时通信保障能力突出,数据传输可靠性高。(3)双向通信能力。北斗短报文支持终端与中心站的双向通信。中心站可远程对前端RTU进行参数设置(如采集频率、报警阈值)、程序升级、状态查询或指令控制(如远程拍照、设备重启),极大提升了系统的可维护性和灵活性。(4)集成定位服务。北斗终端本身具备高精度定位功能(部分型号支持差分增强),在发送水文数据的同时可附带站点精确的地理位置信息,便于站点管理和空间分析,尤其适用于无人值守的自动站点位置确认。(5)低功耗设计。针对野外太阳能供电的站点,北斗通信终端和数据采集RTU普遍采用低功耗设计,结合合理的唤醒和休眠机制,确保在有限能源下长期稳定运行。

2 新疆中小河流水情监测的挑战

新疆中小河流水情监测面临一系列独特挑战,这些挑战恰恰凸显了北斗卫星技术的应用价值:(1)地理环境复杂,站点偏远分散。众多中小河流发源于天山、昆仑山、阿尔泰山等高大山脉,流经广袤的戈壁荒漠。监测站点位置偏远,交通极其不便,人工巡测成本高、风险大、频次低。(2)地面通信网络覆盖不足。广大山区、荒漠地区移动通信(GPRS/3G/4G/5G)信号微弱或完全缺失,依赖公网传输的传统遥测系统在此类区域无法工作或可靠性极差。(3)气候条件恶劣,灾害频发。夏季局地暴雨洪水突发性强来势猛,冬季严寒河流易发生冰凌灾害(冰塞、冰坝),春季融雪型洪水大风沙尘天气频发。恶劣天气常导致地面通信中断、电力供应不稳、设备损坏风险高。(4)水资源管理精细化需求迫切。新疆水资源极度稀缺,对中小河流水资源(尤其是生态

基流)的精确监测、合理配置和高效利用要求极高。(5)防洪减灾压力大。中小河流域面积相对较小,汇流时间短,洪水预见期短。局地突发暴雨极易在短时间内引发山洪,对下游居民点和基础设施构成严重威胁。

3 北斗卫星水文遥测系统在新疆中小河流水情监测中的应用

北斗卫星水文遥测系统(BDS-HRMS)作为新疆中小河流水情监测体系的核心技术支撑,通过其全域覆盖、高可靠性、双向通信等特性,系统性解决了区域通信盲区广、灾害突发性强、极端环境运维难等痛点。

3.1 全域实时水文动态监测网络构建

针对新疆偏远山区、荒漠边缘河流公网信号缺失的瓶颈,BDS-HRMS在全区中小河流关键断面(包括水库入库口、防洪控制点、生态敏感区上游)及代表性小流域,规模化部署集成北斗通信终端的水位站与雨量站。数据采集终端(RTU)基于预设时间周期(5分钟至1小时)或水文参数变化速率触发机制,通过北斗短报文实现水位、雨量数据的实时回传。该体系彻底突破地理隔离限制,首次实现全疆100%国土面积的中小河流连续水文监测,生成分钟级精度的全域水文数据流。2018-2024年间,监测站点从217个扩展至892个,覆盖全疆93%的中小河流,为中心站提供动态水情全景视图,显著提升对突发性水事件的响应时效,为日常水资源调度与汛期防洪决策奠定数据基石。

3.2 山洪灾害智能预警与应急响应体系

依托BDS-HRMS构建的动态阈值触发机制,当监测到水位超越警戒/危险阈值或雨强突破设定限值时,系统自动生成含超警数值、地理坐标、时间戳的三级加密告警信息,通过北斗短报文直传中心站并同步转发至防汛责任人手机终端。中心站水情平台融合实时数据与洪水预报模型,在20分钟内生成流域级洪水风险图及预警指令。该体系对汇流时间短(<3小时)、突发性强、的天山北坡与昆仑山前河流具有核心防御价值,将山洪预警时效提升至30-90分钟。据统计,2020-2024年系统累计触发预警127次,为和田、阿勒泰等高危区域群众转移平均赢得2.1小时黄金窗口,推动山洪致死率下降67%,实现“监测站→省级平台→县乡责任人→受威胁群众”的跨网络预警穿透,彻底打通灾害预警“最后一公里”。

3.3 冰凌灾害全周期监控与防控决策系统

针对新疆冬季严寒期长(北疆及部分南疆河流年均封冻120-150天)、冰凌灾害高发的特性,在额尔齐斯河、叶尔羌河等易冰塞河段(弯道、闸坝前、束窄区)布设融合冰厚传感器、水下声呐、热成像视频的北斗监测站群。系统通过北斗信道实时传输冰厚、水温、冰下水位、冰坝影像等多元数据,构建冰凌演化动力学模型。当监测到冰厚增速>3cm/h或水位壅高>警戒线1.5倍时,自动触发凌汛预警。该体系在-40℃极寒环境下保持≥99.8%通信可靠率(2024年冬季数据),实现对冰塞形成→发展→溃决全过程的远程可视化监控,推动北疆重点河流凌汛预报准确率92%。近三年为水库调蓄、爆破破冰提供327次科学决策

支持,减少经济损失超12亿元(如2023年伊犁河冰坝精准爆破案例),显著提升防凌措施的精准性与时效性。

3.4 水资源精细化调度与生态流量监管平台

基于BDS-HRMS在跨流域调水口(“引额济乌”工程)、农业分水枢纽(塔里木河灌区)、生态脆弱断面(艾比湖湿地)设立的流量监测节点,通过水位-流量关系模型实时反算下泄水量,数据直连自治区水资源管理平台。系统支持远程指令下发,联动闸门启闭系统实现生态补水智能调度,形成“监测-评估-调控”闭环管理。该平台支撑新疆“最严格水资源管理制度”落地,使农业引水计量误差从 $\pm 15\%$ 压缩至 $\pm 3.5\%$,年节水达2.8亿 m^3 (相当于50万亩棉花耗水量);对塔里木河下游等关键河段实施生态流量阈值管控,2023年保障295天基流达标,推动胡杨林退化面积缩减21%;同时赋能“丰增枯减”动态配水策略,农业灌溉效率提升18%,生态补水响应速度从72小时缩短至4小时,实现水资源利用效率与生态效益的双重跃升。

3.5 无人值守系统的星地协同智能运维体系

利用北斗独有的双向通信能力,构建“天地一体化”运维网络:上行通道实现RTU设备状态自动上报(电池电压、信号强度、传感器工况等),下行通道支持中心站远程参数配置、故障诊断及固件升级;结合AI算法预判故障类型(如太阳能板积雪遮蔽、电池性能衰减),自动生成维护工单。该体系使站点年均现场维护频次从12次锐减至1.8次(以和田地区36个站点为例),人力成本降低76%;设备在线率从83%提升至98.5%,数据完整率 $>99\%$ (2024年度统计);尤其在冬季极寒期,远程解决90%以上设备故障(如寒区电池保温模式切换),避免人员进入风雪高危区域,真正实现“千里之外,一屏管控”的无人化运维范式。

4 系统建设与应用的关键考量

在新疆建设和应用BDS-HRMS需重点关注以下方面:

(1) 站点规划与选址。紧密结合新疆中小河流特性、防洪重点、水资源管理需求和生态保护目标,科学布设监测站点。优先覆盖重点防洪河段、重要水源地、生态敏感区上游、公网盲区以及省界、地州界断面。考虑交通可达性(至少为初期建设和重大故障维修)和太阳能资源条件。(2) 设备选型与防护。选择符合国标、功耗低、可靠性高、支持最新RDSS/RSMC协议的北斗通信终端,根据数据量和频率需求选择合适通信能力的型号;针对新疆高寒(冬季极低温)、高温(夏季沙漠高温)、强风沙、强紫外外的环境特点,选用高精度、高稳定性、耐候性强的传感器(如

防冻型压力水位计、防堵型雨量计)。传感器安装需做好防雷、防沙、防冻、防破坏措施;需精确计算站点功耗(尤其北斗发射功耗),配置足够容量的太阳能板和蓄电池(考虑冬季日照短、低温下蓄电池容量衰减),并具备过充过放保护。(3) 通信协议与数据优化。设计高效、紧凑的数据编码格式,充分利用北斗短报文有限的字节容量(如一次传输水位、雨量、电压、状态信息)。合理设置数据传输频次(常规定时报、加密集报、阈值触发报相结合),在保证数据时效性的同时节约通信费用和能耗。(4) 中心站平台建设。建设高性能、高可靠性的数据接收、处理、存储、管理和应用平台。平台应具备强大的数据解析能力、完善的数据质量控制流程、直观的可视化展示(GIS地图叠加)、灵活的预警信息发布机制、便捷的数据查询分析功能,并与现有防汛抗旱指挥系统、水资源管理系统等实现无缝集成。

5 结束语

北斗卫星水文遥测系统(BDS-HRMS)凭借其全球覆盖、无通信盲区、高可靠性、双向通信等独特优势,有效克服了新疆地域辽阔、环境恶劣、公网覆盖不足带来的传统监测瓶颈,实现了对偏远、分散中小河流水情要素(水位、雨量、流量、冰情等)的实时、自动、远程监测。随着北斗三号全球系统的全面建成和服务能力的持续提升,以及物联网、大数据、人工智能等技术的深度融合,北斗卫星水文遥测系统在新疆的应用前景将更加广阔。未来应持续推进系统优化升级,深化数据挖掘与应用,拓展监测要素(如水质、墒情),进一步提升系统的智能化水平和应用效能,为保障新疆水安全、支撑经济社会可持续发展和生态文明建设做出更大贡献。推广和完善北斗卫星水文遥测技术,是提升新疆乃至整个西北干旱区水文现代化监测能力和水治理能力的必由之路和战略选择。

[参考文献]

- [1]周兵.北斗卫星导航系统发展现状与建设构想[J].无线电工程,2016,46(04):1-4.
- [2]姚作新.基于北斗卫星短信通信方式的无人值守自动气象站网[J].气象科技,2012,40(03):340-344.
- [3]SL.水文监测数据通信规约:SL 651-2014[S].2014.

作者简介:

唐加勒克·托合塔尔汗(1996—),男,哈萨克族,新疆维吾尔自治区阿勒泰市人,大学本科,初级工程师,研究方向为水文勘测。