低轨互联网卫星在水利行业应用场景与前景

钱　峰[1,2]，庞治国[1,2*]，沈乃政[3]，方昊然[1,2]

（1.中国水利水电科学研究院，100038，北京；2.水利部防洪抗旱减灾技术创新中心（水旱灾害防御中心），100038，北京；3.山东智洋上水信息技术有限公司，255000，济南）

摘　要：低轨互联网卫星作为国家重要的空间基础设施和战略性公共资源，凭借广覆盖、低时延、高可靠、强韧性的核心优势，以及通信、导航、遥感一体化的服务能力，为水利行业高质量发展与智慧水利建设提供了新型技术支撑。当前，水利行业在常规监测数据采集传输、突发水旱灾害应急处置等核心场景，仍面临监测覆盖盲区、传输稳定性不足、数据共享不畅、应急通信薄弱等痛点，难以满足全域感知、快速响应、智能决策的发展要求。本文立足上述行业需求，系统梳理水利行业现状痛点与新型空间基础设施能力供给的对应关系；结合低轨互联网卫星在通信、遥感、导航融合及信号遥感应用等方面的能力，从广域覆盖与低时延通信、大容量数据传输、应急快速响应、通信与遥感融合四个维度，分析其与水利业务需求的适配性；在此基础上，探索常规监测保障、突发灾害应对、跨区域协同等典型融合应用场景，提出面向水利业务融合的关键技术创新路径，旨在推动低轨互联网卫星与水利行业深度融合，全面提升水安全保障能力与水利数字化治理水平，为智慧水利建设和水利新质生产力发展提供借鉴参考。

关键词：低轨互联网卫星；水利行业；数据传输；应急通信；融合应用

Application scenarios and prospects of low Earth orbit internet satellites in water conservancy

QIAN Feng[1,2], PANG Zhiguo[1,2*], SHEN Naizheng[3], FANG Haoran[1,2]

(1.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2.Technology Innovation Center for Flood & Drought Disaster Prevention and Reduction (Flood and Drought Disaster Prevention Center), Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 3.Shandong Zhiyang Shangshui Information Technology Co., Ltd., Jinan 255000, China)

Abstract: As critical national space infrastructure and a strategic public resource, low Earth orbit (LEO) internet satellites, with their core advantages of wide coverage, low latency, high reliability, and strong resilience, together with their integrated communication-navigation-remote sensing service capability, provide novel technical support for the high-quality development of the water conservancy and the construction of smart water conservancy. At present, the water conservancy sector still faces challenges in core scenarios such as routine monitoring data acquisition and transmission and emergency response to sudden-onset floods and droughts, including blind spots in monitoring coverage, unstable data transmission, poor data sharing, and weak emergency communication, making it difficult to meet the development requirements of full-domain perception, rapid response, and intelligent decision-making. Based on the above industry needs, this paper systematically examined the correspondence between current pain points in the water conservancy and the capability supply

收稿日期：2026-06-09　修回日期：2026-10-17

作者简介：钱峰，水利部防洪抗旱减灾技术创新中心（水旱灾害防御中心）副主任，正高级工程师，主要从事水旱灾害防御、水利信息化方面研究。

通信作者：庞治国，正高级工程师，主要从事水利遥感技术应用研究。E-mail：pangzg@iwhr.com

基金项目：国家自然科学基金项目（52509043）；北京市自然科学基金项目（L241046）。

of the new-generation space infrastructure. Drawing on the capabilities of LEO internet satellites in integrated communication, remote sensing, and navigation, as well as signals-of-opportunity remote sensing applications, it analyzed their compatibility with water conservancy business requirements from four dimensions: wide-area coverage and low-latency communication, large-capacity data transmission, rapid emergency response, and communication-remote sensing integration. On this basis, the paper explored typical integrated application scenarios such as routine monitoring assurance, emergency disaster response, and cross-regional coordination, and proposed key technology innovation paths for water conservancy business integration, aiming to promote the deep integration of LEO internet satellites with water conservancy, comprehensively enhance water security assurance capabilities and the level of digital water governance, and provide a reference for the construction of smart water conservancy and the development of new quality productive forces in water conservancy.

Keywords: LEO internet satellites; water conservancy; data transmission; emergency communication; integrated application

中图分类号：TV+V474　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1123(2026)20-0001-11

DOI：10.3969/j.issn.1000-1123.2026.20.001

一、引 言

2026年全国水利工作会议作出部署，系统推进数字孪生水利建设，加快形成水利新质生产力。在全球气候变化加剧的大背景下，极端水旱灾害发生频次显著增加、强度持续上升，水利工程安全风险交织叠加，对水利行业信息基础设施的监测精度、响应速度、覆盖范围、系统韧性提出了前所未有的更高要求。当前，依托地面站点观测、人工巡查与单一通信链路的传统水利信息基础设施，在感知能力、响应效率、覆盖范围和抗风险能力上已难以适配新时代水利高质量发展需要。亟需突破现有技术瓶颈，构建全域覆盖、全程在线、全时可靠的天空地一体化信息基础设施，为筑牢国家水安全屏障、加快水利现代化进程提供新型基础底座。

近年来，低轨互联网卫星星座已成为继地面光纤、移动蜂窝网络之后第三代信息基础设施的核心载体，被多个主要航天国家纳入国家战略级布局。从国际上看，美国SpaceX公司部署的星链（Starlink）星座2026年已突破1.1万余颗在轨卫星规模，实现了对中低纬度大部分区域的连续宽带覆盖，并已在多个突发事件中验证了其应急通信效能；欧洲Eutelsat公司建设的OneWeb星座与亚马逊公司建设的柯伊伯（Kuiper）星座也在加速组网。国内方面，中国卫星网络集团有限公司建设的GW星座、上海垣信卫星科技有限公司建设的千帆星座（G60）等国家级与商业级巨型星座正同步推进，卫星批量化制造、规模化发射、星地一体测运控等关键工程能力快速形成。与此同时，第三代合作伙伴计划（3rd Generation Partnership Project，3GPP）先后在Release17（R17）、Release18（R18）版本中完成非地面网络（Non-Terrestrial Network，NTN）的标准化定义，为卫星系统与5G/6G地面网络的体系化融合提供了规范支撑，推动了低轨星座由单一通信平台向通信、导航、遥感一体化（通导遥融合）服务平台的演进，使其在偏远地区覆盖、应急通信保障、广域物联感知等场景中展现出地面网络难以替代的应用优势。

当前国内水利行业卫星通信主要依赖北斗卫星导航系统和天通一号卫星。北斗短报文已广泛应用于水文测报、山洪灾害预警等场景，成为水利监测数据回传以及断路、断网、断电“三断”极端工况下应急通信的关键保底手段。天通一号作为我国自主可控的静止轨道移动通信卫星，可同时支持语音、短消息和低速数据传输，在灾害现场指挥、应急通信传输等方面发挥了重要支撑作用。二者均属于窄带卫星通信，受报文长度、传输带宽与终端部署规模约束，难以满足高清视频、影像、大规模物联感知数据的实时回传需求。

随着低轨互联网卫星技术快速发展，低轨星座在水利领域的应用潜力逐步受到国内外学者的关注。针对低轨卫星过境时间离散的特征，已有研究围绕远程水位、水文监测数据的传输调度与终端能耗优化构建了传输调度模型；彭木根等提出低轨通信与遥感融合架构及试验验证方案；国外学者基于星链终端网络实测，分析了传输速率和时延变化特征，并构建了LENS长期测量数据集，为低轨卫星通信性能评估提供了实

测数据基础。但上述研究多聚焦于单项技术试验与水文远程监测的通信性能测试评估，面向水利全业务链条的标准化传输体系、多星融合终端适配方案以及规模化业务应用仍较为有限，整体尚处在起步探索阶段。

本文立足国家水利战略布局与行业核心需求，聚焦常规水利监测数据采集传输、突发灾害应急通信保障两大关键场景，梳理行业痛点，探索融合应用场景，开展衍生科研创新，提出保障措施，为低轨互联网卫星在水利行业的规模化、规范化应用提供思路。低轨互联网卫星赋能水利行业发展的总体框架见图1。

二、水利行业信息采集传输与应急处置现状

当前，我国水利行业在常规监测数据采集传输、突发灾害应急监测处置等核心业务环节，仍存在诸多现实短板，这些短板问题直接制约了智慧水利建设的推进成效，具体体现在以下三个方面。

1.常规水利监测系统数据采集传输情况

常规水利监测涵盖水文监测、水资源监测、水利工程安全监测、河湖生态监测等多个领域，其核心需求是实现监测数据的实时采集、稳定传输与高效处理。从行业实际应用情况来看，常规监测在数据采集传输环节仍存在三方面突出短板。

一是监测覆盖存在明显盲区，全域监测能力不足。当前我国水利监测站点的布局呈现明显不均衡态势，多集中于平原、城镇等地面通信网络便捷、人口密集的区域；而在高原、深山、偏远牧区、近海海域等地形复杂、人口稀少、交通不便的区域，受地理条件限制，地面通信基站部署难度大、运维成本高，致使监测站点布设稀疏、覆盖率极低，形成大量监测空白区域。例如，西藏冰湖、西北内陆河流域以及偏远山区山洪沟等区域，传统地面监测设备难以实现常态化部署，水文、水资源等核心数据无法及时采集，直接影响相关区域水资源管理与灾害监测预警等工作的有序开展。

二是数据传输稳定性不足，时效性难以保障。当前常规水利监测数据传输主要依赖地面光纤、4G/5G等通信方式，受极端天气、地质灾害、线路老化等外部因素影响较大，传输链路易出现中断、卡顿等问题。北斗短报文通信方式虽能在断路、断网、断电“三断”情况下实现监测数据应急传输，可在一定程度上缓解极端场景下的数据传输中断难题，但受其单次报文容量限制，难以承载高清图片、视频及海量监测数据；偏远区域已部署的监测站点，受地面网络建设条件制约，普遍存在带宽不足、传输时延较高等问题，同样难以实现高清影像及海量数据的实时传输，由此导致监测数据

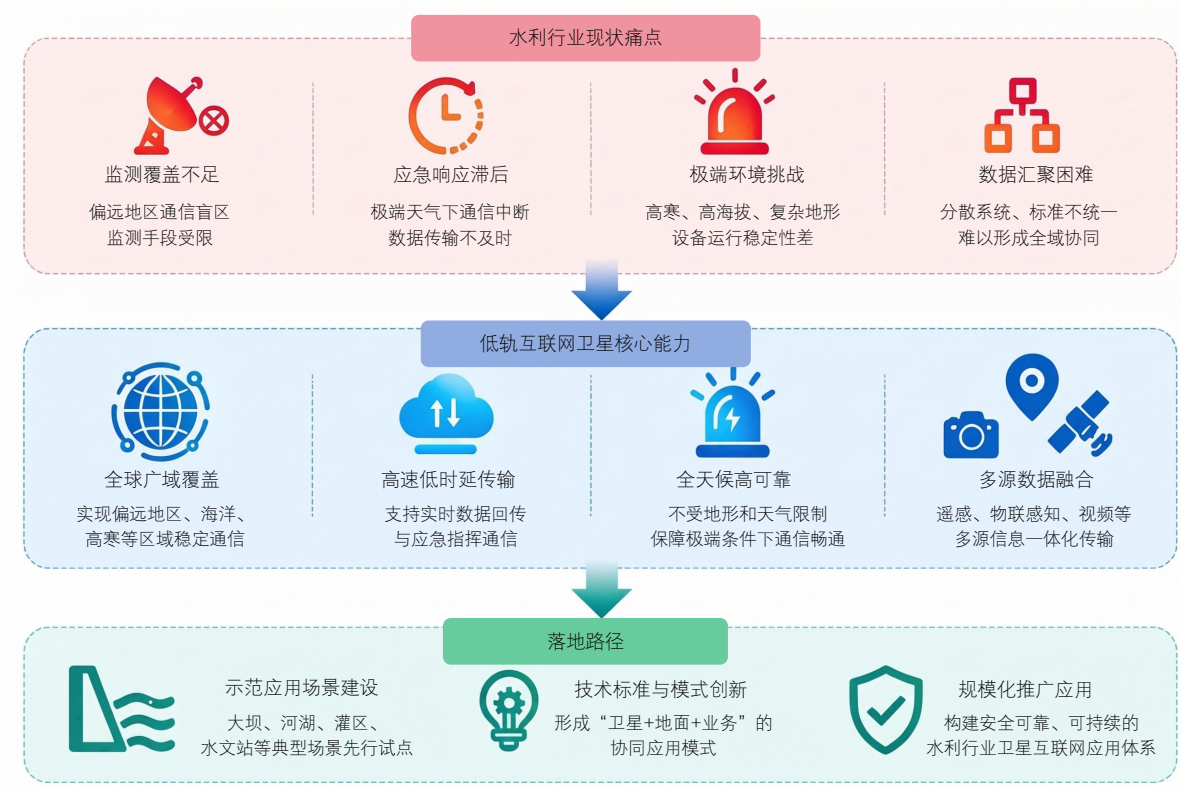


图1　低轨互联网卫星赋能水利行业发展的总体框架

出现不同程度的滞后，难以满足当前水利业务精细化、常态化管理的实际需求。

三是系统兼容性较差，数据共享机制不健全。当前，不同类型的监测系统（如水文监测、大坝监测、河湖监测等）多为独立建设，各系统采用的通信协议、数据格式不统一，且分别依赖各自独立的传输链路，缺乏统一的接入标准和协同机制。这种现状导致各类监测数据呈现碎片化分布，跨系统、跨区域的数据共享难度较大，形成了明显的“信息孤岛”，大幅降低了监测数据的综合利用效率，不利于水利业务的协同推进。

2.突发灾害应急监测处置情况

水利突发灾害（如暴雨、洪水、山洪、滑坡、堤坝溃决等）具有突发性和破坏性强、影响范围广等特点，应急处置的核心需求是快速搭建灾情现场与指挥中心的通信链路，实现灾情信息实时上报、处置指令精准下达，结合当前实际情况，应急处置仍存在两大突出短板。

一是应急通信链路搭建效率偏低，响应滞后问题突出。结合以往突发灾害处置经验，灾害发生后，地面通信基站、光纤线路等基础设施往往会遭到严重损毁，导致灾情现场与指挥中心的通信瞬间中断，现场灾情信息（如水位、流量、灾情范围、人员被困情况等）无法及时上报，指挥中心的处置指令也难以传递至现场，延误了灾情处置与应急救援的最佳时机。而当前广泛使用的传统应急通信方式（如应急通信车、便携式电台），受地形、交通等条件限制较大，部署速度缓慢，无法满足突发灾害快速响应、高效处置的实际需求。

二是灾情信息获取不够全面，处置精准度有待提升。突发灾害发生后，现场往往伴随交通中断、道路损毁、人员无法进入等情况，依赖当前现有的信息获取手段难以全面、实时掌握关键的灾情动态信息，这种情况导致指挥中心无法准确判断灾情等级、精准研判灾害发展态势，进而难以制定科学、高效的应急处置方案，严重影响了应急处置工作的精准度和实效性。

3.卫星技术融合相关科研与产业适配情况

除上述核心业务环节的短板外，当前水利行业在与卫星技术融合应用过程中，还面临科研创新滞后、产业适配不足、标准体系缺失等现实问题。从当前实际情况看，现有卫星技术与水利业务的融合多停留在基础应用层面，针对水利行业特殊场景、特殊需求的衍生技术研发投入不足，尤其是对卫星通信信号遥感服务能力的挖掘不够深入，未能充分发挥卫星技术的综合效能。同时，当前卫星终端设备普遍存在成本偏高、轻量化程度不足的问题，与水利监测设备、应急装备的适配性较差，且行业内缺乏统一的技术规范和检测标准，这些因素共同制约了卫星技术在水利行业的规模化、规范化应用。水利行业现状痛点与低轨互联网卫星核心能力对应关系见表1。

三、低轨互联网卫星核心业务能力适配分析

低轨互联网卫星系统由大量低轨卫星组成，通过星间链路、星地链路实现全球覆盖、高速通信，其核心业务能力包括广域宽带移动接入、高速宽带接入、广域物联数据采集、应急突发响应、卫星通信信号遥感等，与水利行业的核心业务需求高度适配，能够有效破解行业短板。典型低轨互联网卫星星座参数见表2。

表1　水利行业现状痛点与低轨互联网卫星核心能力对应关系

业务环节	现状痛点	低轨互联网卫星对应能力
常规监测覆盖	覆盖有盲区，全域感知不足	广域覆盖与低时延通信
数据传输	带宽受限，传输滞后	大容量、高带宽传输
应急通信	链路易毁，响应滞后	应急快速响应、多星组网冗余
监测维度	信息孤岛，维度单一	通信、遥感、导航融合（通导遥融合）

表2　典型低轨互联网卫星星座参数对比

星座名称	国家和地区/运营方	规划规模（颗）	轨道高度（km）	备注
Starlink	美国/SpaceX	29 988（Gen2申请规模）	340～615	已实现规模化运营，截至2025年底在轨容量约450 Tbps
OneWeb	欧洲/Eutelsat	648	约1200	一代星座已完成部署，主要面向企业级及偏远地区互联
GW	中国/中国星网	12 992（2035年）	500～1145	国家新型空间基础设施，正加速组网部署
G60	中国/上海垣信	约15 000	约1160	商业低轨星座代表项目，2024年起密集发射

1.广域覆盖与低时延通信能力

低轨互联网卫星轨道高度通常在300～2000 km，相较于高轨卫星，其传输时延仅为数十毫秒，性能接近地面光纤网络，可支撑监测数据近实时传输；多卫星组网能够实现全球无死角覆盖，尤其可覆盖高原、深山、近海等地面通信盲区，有效解决水利监测覆盖不足、数据传输滞后等问题。以中国星网GW星座、上海垣信千帆星座为代表，相关星座规模化组网工作持续推进，有望实现我国全域及“一带一路”沿线区域覆盖，为水利监测业务提供稳定的通信支撑。

2.大容量数据传输能力

低轨互联网卫星具备大容量、高带宽的传输优势，可支撑高清视频及雨水情、水质、大坝变形等多源海量监测数据的实时快速传输，突破传统卫星通信带宽受限的瓶颈。以Starlink星座为例，截至2025年底其在轨容量约450 Tbps。当前国内水利行业常规遥测业务带宽需求较低，高清影像、视频等大容量感知业务多为按需短时回传，暂无统一口径的并发带宽统计指标。但低轨星座充足的带宽资源完全可满足水利行业多站点、多类型监测数据并发传输的潜在需求。此外，低轨卫星单星寿命相对较短（一般为5～7年），技术迭代周期短，便于快速适配水利行业不断增长的数据传输需求。

3.应急快速响应能力

低轨互联网卫星支持快速部署与灵活组网。突发灾害发生后，指挥中心可通过车载、机载、便携式等卫星终端，快速搭建灾情现场与后方指挥终端的通信链路，实现语音、图像、视频等数据的实时传输。由于卫星系统冗余度高，个别卫星失效对整个网络性能影响较小，应急通信的稳定性能够得到有效保障。再加上手机直连卫星技术的快速发展，现场人员可通过普通智能手机上报灾情信息。

4.通信与遥感融合能力

低轨互联网卫星与遥感卫星、导航卫星协同组网，可实现通信与遥感的深度融合。依托通信卫星信号的反射、散射观测，可开展水位、土壤水分、大气水汽等水利关键要素的遥感监测，进一步拓展水利监测的覆盖范围并提升监测精度。同时，低轨星座能够为合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar，SAR）、重力卫星等专业遥感载荷提供中继传输通道，显著缩短观测数据回传时延，充分挖掘遥感数据的时效价值，为水利科研创新提供丰富的数据支撑。

5.低轨互联网卫星与现有卫星通信对比分析

低轨互联网卫星的核心优势体现在中高流量水利业务的数据传输成本和多模态数据传输能力。对比天通卫星和北斗短报文，相信随着我国星网工程终端规模、数据流量与并发业务量的持续增长，低轨卫星在大容量数据传输场景下的成本优势将会凸显。参考星链美国市场资费，流量成本约0.3美元/GB，表3对比了北斗短报文、天通一号与星链的主要性能及费用。

但也要看到，低轨宽带终端在供电保障与环境适应性方面仍存在应用短板。星链终端Starlink Standard Actuated平均功耗50～75 W，天通终端功耗12～18 W，偏远野外测站若要保持持续在线，需配置相应光伏与储能设备；强降雨会造成卫星链路性能衰减，峡谷、岸坡及植被遮挡区域选址难度会显著增加。因此，工程部署需在规划时就统筹考虑终端功耗、供电保障、链路可用率及后期运行维护成本等因素。

四、低轨互联网卫星与水利行业融合应用场景探索

立足智慧水利建设对透彻感知、快速响应、全域覆盖、系统韧性等方面的现实需求，结合上述低轨互联网卫星的核心业务能力，本节从常规监测保障、突发灾害应对、跨区域协同三个维度，系统梳理低轨互联网卫星与水利业务深度融合的典型应用场景，以期实现卫星技术与水利业务的精准对接，提升水利行业智能化水平。低轨互联网卫星与水利行业的融合应用场景示意

表3　北斗短报文、天通一号与星链在水利场景中的主要性能与费用对比

类别	北斗短报文	天通一号	星链（Starlink）
主要业务能力	水位、雨量等数据上报，设备状态监测与应急告警	应急语音、短信及窄带数据传输	视频会商、图片与无人机影像回传、多终端宽带联网
通信容量与速率	单次支持1000个汉字，默认发送间隔60 s	物联网业务最高带宽为384 kbps	最高下载速率为300 Mbps
终端功耗与供电	待机约2 W，发射峰值约18 W，持续1.5 s	手持机采用电池供电，数据传输及便携终端使用功耗12～18 W	平均功耗50～75 W
费用	北斗短报文卡1000元/年，1800条信息	1000元/年（包含语音75 min，短信5条）；流量数据另行报价	80美元/月（含300 GB）

见图2，具体应用场景如表4所示。

1.常规水利监测数据采集传输场景

（1）水文水资源监测融合应用

在偏远区域及地面通信盲区布设的水位计、流量计、水质传感器等水文监测终端，普遍存在站点分布分散、单站数据量小、供电条件有限、长期运维难度大等问题。借助低轨卫星终端可将监测数据实时回传至水利监测平台，实现水文要素常态化采集。针对西藏冰湖、西北内陆河流域等地面网络难以覆盖的区域，可部署轻量化卫星监测终端，完成水位、流量、水质等关键要素的实时采集；依托卫星的广域覆盖能力，实现跨流域水文数据同步传输与共享，打破“信息孤岛”难题。针对山洪、冰湖溃决等高风险预警业务，还应配套现场告警装置并预留备用通信通道，构建多重保障手段。

（2）水利工程安全监测融合应用

面向水库大坝、河湖堤防、高边坡等水利工程，可布设变形、渗压、渗漏等多类监测设备，构建“现场传感器—边缘采集—地面与卫星链路—监测平台”一体化架构，依托低轨卫星将监测数据实时回传至工程安全监测中心，实现工程安全的实时监控与风险预警。实际部署中，需重点考虑峡谷地形与建筑物遮挡导致的信号遮蔽问题，并针对多普勒频偏实施有效补偿等。以大坝关键部位为例，部署卫星监测终端实时传输变形数据，一旦监测值超出预警阈值即自动发出预警；同时，利用卫星低时延优势支撑监测数据的快速分析处理，切实提升工程安全风险预判能力。



图2　低轨互联网卫星与水利行业融合应用主要场景全景

表4　低轨互联网卫星与水利行业融合应用场景汇总

场景类别	具体场景	调用的卫星能力	典型用例
常规监测保障	水文水资源监测	广域覆盖＋低时延传输	西藏冰湖、西北内陆河流域水位、流量、水质实时采集
常规监测保障	水利工程安全监测	低时延传输＋大容量接入	大坝变形、渗压、渗漏数据实时回传与阈值预警
常规监测保障	河湖生态监测	通导遥融合＋高清图文传输	河湖库“四乱”（乱占、乱采、乱堆、乱建）、水污染、岸线侵占快速发现与处置
突发灾害应对	应急通信链路快速搭建	应急响应＋多星组网冗余	车载、机载、便携式终端建立现场与指挥中心语音视频链路
突发灾害应对	灾情实时监测与评估	通导遥融合＋抗毁韧性	“三断”情况下洪水淹没范围、堤坝破损、植被损毁动态获取
突发灾害应对	应急指挥协同调度	广域覆盖＋低时延双向通信	跨地域、跨部门指挥指令下达与现场进展同步
跨区域协同	跨区域协同监测	全球覆盖＋加密传输＋通导遥融合	跨境河段水文、水质、岸线变化获取与多边联合预警

（3）河湖生态监测融合应用

依托低轨互联网卫星广域覆盖、高速传输能力，结合通信与遥感深度融合技术，构建“遥感识别—现场核查—边缘处理—卫星回传”的业务流程，对河湖水域范围、水质状况、植被覆盖等生态指标开展实时动态监测。通过卫星遥感全域感知与现场高清图文数据实时回传的有机衔接，可形成天空地一体化的河湖生态立体监测体系，实现对河湖库“四乱”、水污染、岸线侵占等问题的快速发现、精准定位与及时处置，为河湖长制实施和安澜江河、生命江河、幸福江河“三个江河”保护治理体系落地提供有力支撑。

2.突发灾害应急监测处置场景

（1）应急通信链路快速搭建

以山洪灾害现场为例，救援人员可携带便携式卫星终端，实时上报灾情范围、人员被困情况等信息，指挥中心据此制定救援方案、下达救援指令，显著提升应急救援时效。随着6G与天地融合通信的发展，卫星直连手机、智能穿戴等泛在终端将进一步增强应急通信及人员定位、转移监测能力。

（2）灾情实时监测与评估

极端灾害造成地面“三断”工况下，可依托低轨卫星抗毁性强、不依赖地面网络的通信与遥感融合能力，快速获取洪水淹没范围、堤坝破损程度、植被损毁情况等现场灾情动态，并将灾情信息回传至指挥中心，为灾情精准研判、应急物资调配、人员转移安置等工作提供可靠的数据支撑，有效增强水利应急监测体系的整体韧性。

（3）应急指挥协同调度

依托低轨卫星通信网络，指挥中心可向现场救援队伍实时下达救援指令、应急物资调配信息，同时同步接收一线救援进展、险情动态等关键信息，实现跨地域、跨部门的高效协同调度与信息互通互享，全面提升应急指挥的精准度、时效性与系统性。

3.跨区域协同监测场景

跨区域、跨流域水利监测业务场景特殊，采用常规地面监测与通信手段往往存在部署实施难度大、空间覆盖不连续、数据传输链路易中断、信息安全保障能力不足等现实问题。水利监测需要保障大量野外分散测站实现持续联网、数据实时回传与多方协同共享，可依托低轨互联网卫星补全地面通信盲区短板，融合遥感观测与加密传输能力，为水资源调度、跨境水安全联合预警提供支撑，其中星座区域覆盖连续性与测站数据回传时效，是通信方案选型配置的核心考量指标。

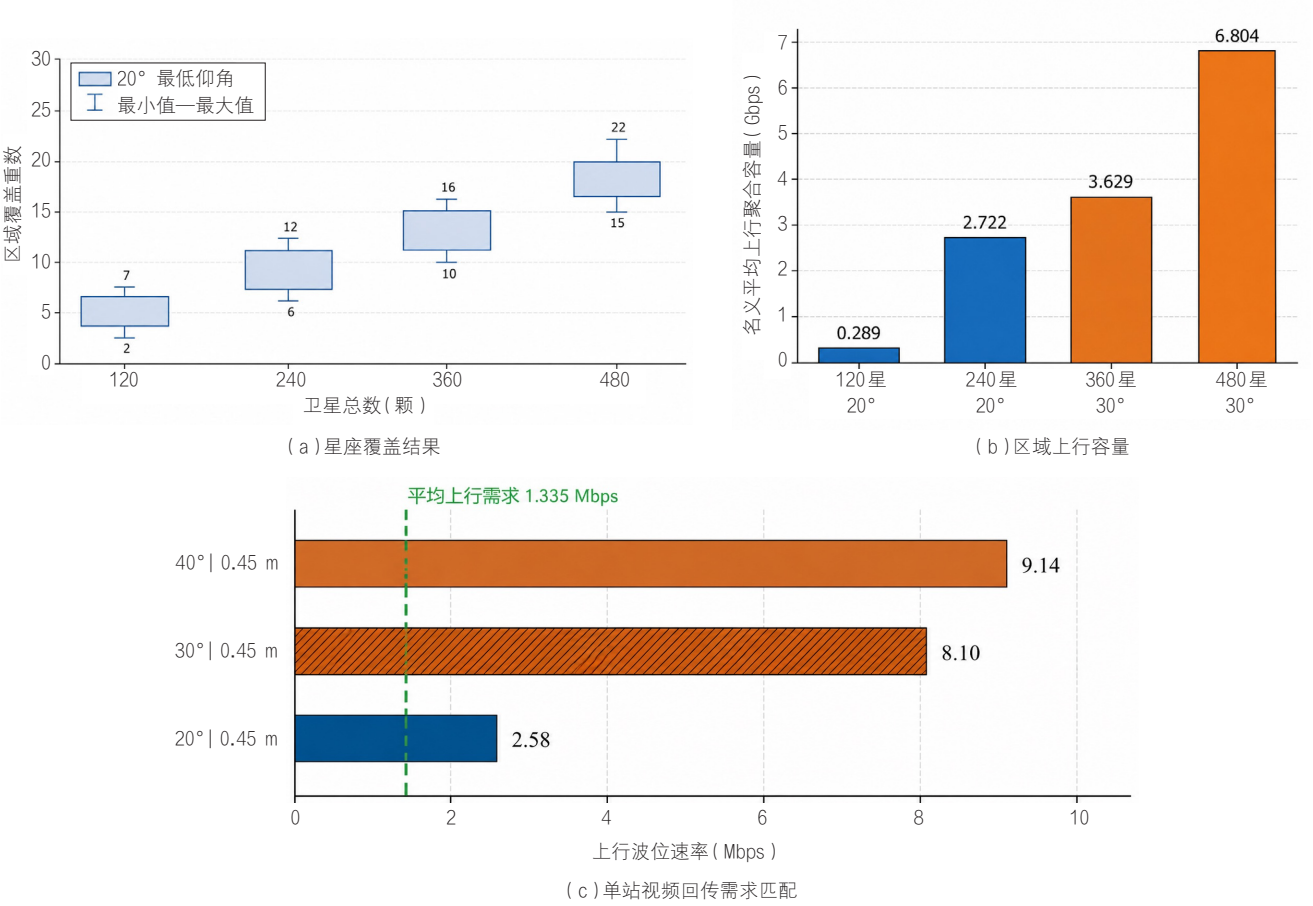
以西藏光谢错冰湖为研究区域开展仿真试验：采用轨道高度550 km、倾角55°、单轨道面布设10颗卫星的Walker星座，设置总星数120、240、360、480颗，利用GMAT和Python开展覆盖仿真。结果表明，在最低通信仰角20°条件下，120星构型可实现至少2重覆盖，480星可达至少15重覆盖。按单站每分钟产生10 MB视频数据计算，上行速率2.58 Mbps和8.10 Mbps对应的传输耗时分别为32.51 s和10.36 s，均满足60 s回传周期要求（见图3）。仿真表明，通过合理配置星座覆盖与链路资源，低轨互联网卫星可保障偏远测站周期性数据稳定回传，能够为跨流域水资源协同调度、跨境水安全联合预警与多边合作提供稳定高效、安全可靠的天空地一体化技术支撑。

五、低轨互联网卫星融合应用的水利技术创新探索

如前文所述，融合应用场景的低轨互联网卫星规模化落地，还需以底层关键技术的突破作为支撑。低轨互联网卫星具备星座规模庞大、全域覆盖、信号资源丰富、重访频率高等特征，围绕其核心业务能力开展面向水利业务的衍生技术创新研究，能够有效拓展水利监测维度、提升感知精度与系统韧性。以下从卫星通信信号遥感、天地一体化监测预警、终端适配、通算融合、标准体系五个方面，探讨低轨互联网卫星与水利行业深度融合的关键技术创新路径。

1.卫星通信信号遥感监测技术研发

基于低轨卫星通信信号的反射、散射特性开展水利关键要素反演算法研发，可弥补传统遥感技术在时空分辨率与覆盖范围方面的短板。例如，研发低轨卫星通信信号水位反演技术，通过解析卫星信号经水面反射后的回波，实现水位高精度、全时段监测，补齐传统水位监测手段在偏远区域、复杂地形条件下的能力短板；开展土壤水分反演技术研究，依托卫星通信信号的L波段特性削弱大气、植被等干扰因素，实现土壤水分高精度动态监测，为干旱研判、农业灌溉调度、水资源管理提供数据支撑；探索大气水汽反演技术，利用卫星通信信号的天顶对流层延迟量实现大气水汽的高精度探测，为短临降水预报、水旱灾害预警提供技术支撑。此外，可利用低轨通信卫星发射的Ku/Ka宽带通信信号，在地面布设双通道接收设备，分别采集卫星直达信号与地表反射、散射信号，对比两路信号的时延、多普勒、幅度、相位差异，反演地表介质特性，实现目



（a）星座覆盖结果　（b）区域上行容量

（c）单站视频回传需求匹配

图3　低轨互联网卫星西藏冰湖需求仿真计算结果

标识别与地表成像。

2.天地一体化水利监测预警技术研发

面向水利全域感知、灾害预警、工程安全与智能管控业务需求，综合低轨卫星监测、遥感与地面监测数据，构建天地一体化水利监测预警模型，提升水利灾害预警精度与响应时效性。整合卫星回传的雨量、水位数据与遥感地形、植被信息，基于大数据、人工智能技术研发山洪灾害精准预警模型；结合大坝变形、渗压监测数据及工程周边遥感地形资料，研发大坝安全风险动态预判预警模型，提升工程安全运维能力。依托低轨卫星低时延、高信号强度、高精度、收敛速度快的导航增强特征，结合改正数下发与低轨测距增强能力，开展大坝等水利工程形变监测研究。采用PPP-RTK技术架构，剥离轨道、电离层等误差干扰，抑制多路径效应，实现大坝形变毫米级实时监测，破解传统GNSS监测成本高、覆盖范围有限、偏远区域运维不便的短板，整体框架示意见图4。Wang等利用北京地区1 Hz模拟数据、150颗低轨导航增强卫星开展试验，结果表明解算启动后5～30 min内浮点解稳定性提升超过60%。同时，进一步融合卫星导航增强、InSAR遥感与地面监测数据，构建多源融合的大坝形变预警模型，借助深度学习算法预判形变发展趋势，提前识别大坝微小形变隐患，推动大坝监测由“事后处置”向“事前预警、主动防控”转型，服务安全大坝、生态大坝、智能大坝“三个大坝”建设，为水利工程安全运维提供更高精度、更高效的技术支撑。

3.轻量化卫星终端与水利设备适配技术研发

针对水利监测设备、应急装备的轻量化、低功耗和便携化需求，开展低轨卫星终端与水利设备的适配技术研发，降低卫星技术的应用门槛。研发轻量化、低成本的卫星监测终端，适配水文、大坝等各类水利监测设备，实现监测数据的无缝接入与传输；研发手机直连卫星的水利专业应用，为一线人员提供便捷的监测数据与灾情信息上报通道；探索卫星终端与无人机、无人艇的适配技术，构建“卫星+无人平台”的立体化监测体系，拓展水利监测的场景与范围；探索天地融合网络下的智能穿戴产品，提升灾害下人员转移的全流程监控能力和快速呼救、快速定位、快速救援

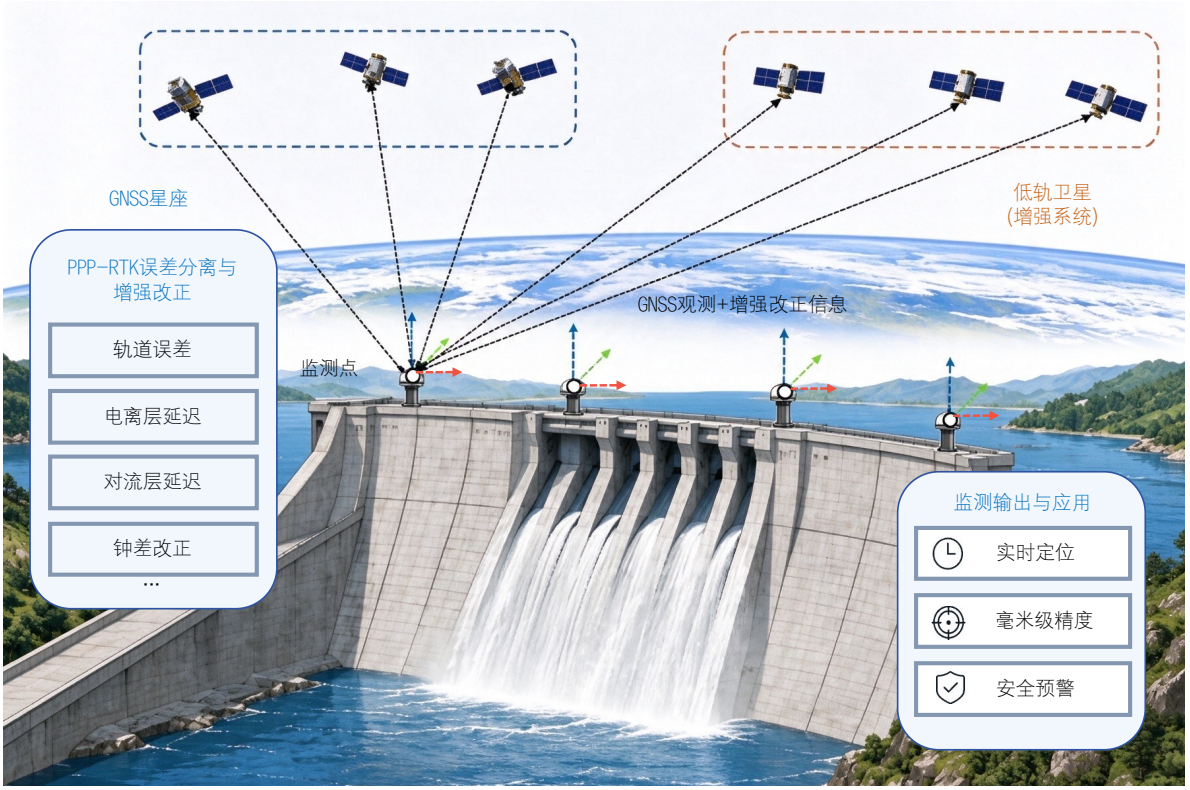


图4　基于低轨卫星增强的PPP-RTK大坝形变监测原理

的应急能力。

4.通算融合与在轨计算技术创新

依托低轨互联网卫星的云网融合能力开展通算融合技术研发，实现卫星通信与计算能力的深度融合。探索在轨计算技术，充分利用算力卫星资源，对监测数据进行实时处理与分析，减少数据回传量，提升数据处理效率；构建星地一体化分布式算力网络，融合天基、地基算力，实现水利监测数据的快速分析、共享与应用，为水利业务的精细化管理提供技术支撑；研发通算融合产品，实现卫星数据与水利业务数据的深度融合，提升水利业务的敏捷性与智能化水平。

5.标准规范与检测验证体系技术研发

当前低轨互联网卫星在水利行业尚缺乏专用标准规范与成熟检测验证体系，制约了其规模化落地与高质量发展。立足低轨互联网卫星广域覆盖、大容量传输、导航增强、通导遥融合等核心能力，面向水利常规监测与应急处置核心需求，构建水利领域专用标准体系与检测验证技术，研制适配水利场景的验证方法、测试平台与评价指标，形成统一接口、统一数据、统一应用、统一认证的完整支撑体系，为卫星技术与水利业务深度融合提供基础性、创新性、引领性保障。

六、结论与展望

本文立足国家水安全战略与智慧水利建设需求，系统分析了当前水利行业在信息采集传输、应急监测处置、卫星技术融合等方面的现实短板，指出低轨互联网卫星广域覆盖、大容量传输、导航增强、通导遥融合的核心能力与水利业务高度适配，可有效破解监测盲区、传输中断、应急薄弱、协同不足等关键问题。围绕常规监测保障、突发灾害应对、跨区域协同等典型应用场景，在卫星通信信号遥感、天地一体化监测预警、终端适配、通算融合等方面开展技术创新探索，为水利高质量发展提供了可行技术路径。

面向“十五五”水利高质量发展与国家水安全保障战略需求，低轨互联网卫星作为新型空间基础设施，将深度融入水利科技创新体系，成为体系化推进、系统性提升水利科技创新能力的重要支撑。在应用场景方面，低轨互联网卫星将与5G、6G、人工智能、大数据等技术深度融合，紧密对接国家水网工程建设需求，拓展数字孪生水利、智能水资源调度、跨区域水安全协同管理等创新应用场景；在科研创新方面，基于卫星通信信号遥感的水利监测技术、天地一体化预警模型等将

不断完善，为水利行业提供更加强有力的科技支撑；在产业发展方面，轻量化、低成本的卫星终端将实现规模化推广，卫星与水利融合应用的产业链将不断完善，形成“技术研发—产品制造—应用推广”的良性循环。同时，随着技术规范的完善、检测实验室的建成、政策支持的加强，低轨互联网卫星有望在水利行业实现规模化、规范化应用，为有效破解行业痛点，提升水安全保障能力、水资源利用效率、水生态保护水平，推动水利高质量发展注入新的动力，助力智慧水利、数字孪生水利建设落地见效。

未来，随着我国低轨互联网卫星星座的持续规模化部署与技术不断成熟，在水利科技创新“三箭齐发、三型平台、三方合力、三位一体、三项机制”总体布局引领下，在政策引领、标准先行、检测支撑、人才保障的一体化支撑体系下，低轨互联网卫星与水利行业的融合应用将迎来广阔前景。卫星与水利的融合应用将不断向全域化、智能化、精准化、韧性化升级，显著提升我国水旱灾害防御能力、水资源节约集约利用能力、水资源优化配置能力、江河湖泊生态保护治理能力，为保障国家水安全、建设数字中国提供坚实可靠的天空地一体化技术支撑。

参考文献：

[1] 李国英.体系化推进、系统性提升水利科技创新能力[N].光明日报，2026-04-14(10).

[2] 钱峰，夏润亮.数字孪生水利赋能水利新质生产力发展框架研究[J].中国水利，2024(8)：6-10+5.

[3] Kinman G，Žilić Ž，Purnell D.Scheduling Sparse LEO Satellite Transmissions for Remote Water Level Monitoring[J].Sensors，2023，23(12)：5581.

[4] Gupta A，Chakrabarty P，Bishnoi M M，et al.Low Earth orbit satellite competition：Challenge or opportunity？[C]//International Conference on Data Science and Communication.Berlin：Springer，2024：221-236.

[5] Hapgood M，Liu Huixin，Lugaz N.SpaceX：Sailing close to the space weather？[J].Space Weather，2022，20(3)：e2022SW003074.

[6] Fang Tzu-Wei，Kubaryk A，Goldstein D，et al.Space weather environment during the SpaceX Starlink satellite loss in February 2022[J].Space Weather，2022，20(11)：e2022SW003193.

[7] Zhang Jingrui，Cai Yifan，Xue Chenbao，et al.LEO mega constellations：Review of development，impact，surveillance，and governance[J].Space：Science & Technology，2022：e9865174.

[8] Ge Haibo，Li Bofeng，Jia Song，et al.LEO enhanced Global Navigation Satellite System（LeGNSS）：Progress，opportunities，and challenges[J].Geo-spatial Information Science，2022，25(1)：1-13.

[9] Pang Zhiguo，Zhang Pengjie，Jiang Wei.BDS empowers smart water conservancy construction：Current status，challenges，and future opportunities[J].ISPRS Annals of the Photogrammetry，Remote Sensing and Spatial Information Sciences，2025：623-629.

[10] Zhou Linghao，Zhang Enhong，Liang Hong，et al.Practical performance assessment of water vapor monitoring using BDS PPP-B2b service[J].Applied Sciences，2025，15(14)：8033.

[11] Zhang Jiahua，Morton Y J，Wang Yang，et al.Mapping surface water extents using high-rate coherent spaceborne GNSS-R measurements[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing，2022，60：1-15.

[12] Ma Sami，Chou Yi Ching，Zhang Miao，et al.LEO satellite network access in the wild：Potentials，experiences，and challenges[J].IEEE Network，2024，38(6)：396-403.

[13] Li Xingxing，Huang Jiaxin，Li Xin，et al.Review of PPP-RTK：Achievements，challenges，and opportunities[J].Satellite Navigation，2022，3(1)：28.

[14] Gao Rui，Liu Zhizhao，Odolinski R，et al.Improving GNSS PPP-RTK through Global Forecast System zenith wet delay augmentation[J].GPS Solutions，2024，28(2)：66.

[15] 彭木根，张世杰，许宏涛，等.低轨卫星通信遥感融合：架构、技术与试验[J].电信科学，2022，38(1)：13-24.

[16] 庞治国，吕娟，路京选，等.北斗导航卫星系统在水利行业的应用与展望[J].中国防汛抗旱，2024，34(4)：1-7.

[17] Zhao Jinwei，Pan Jianping.LENS：A LEO Satellite Network Measurement Dataset[C]//Proceedings of the 15th ACM Multimedia Systems Conference.2024：278-284.

[18] 张朋杰，庞治国，路京选，等.GNSS-R水位监测研究进展与其在我国水利行业应用展望[J].全球定位系统，2024，49(1)：34-44.
[19] 吴树范，王伟，温济帆，等.低轨互联网星座发展研究[J].北京航空航天大学学报，2024，50(1)：1-11.
[20] 蔡阳，崔倩.卫星遥感水利应用进展与展望[J].中国水利，2024(11)：9-16.
[21] 张建刚，张宏宇，李朝纲，等.Ka高通量卫星通信水利应用关键技术研究[J].水利信息化，2024(6)：46-54+70.
[22] Chen Lifu, Cai Xingmin, Xing Jin, et al.Towards transparent deep learning for surface water detection from SAR imagery[J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2023, 118：103287.
[23] Ma Sami, Chou Yi Ching, Zhao Haoyuan, et al.Network Characteristics of LEO Satellite Constellations：A Starlink-Based Measurement from End Users[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2023, 2023：13697.
[24] Wang Kan, El-Mowafy A, Wang Wei, et al.Integrity monitoring of PPP-RTK positioning; PartⅡ：LEO augmentation[J].Remote Sensing, 2022, 14(7)：1599.
[25] Adjovu G E, Stephen H, James D, et al.Overview of the application of remote sensing in effective monitoring of water quality parameters[J].Remote Sensing, 2023, 15(7)：1938.
[26] Lin Xingqin, Rommer S, Euler S, et al.5G from Space：An Overview of 3GPP Non-Terrestrial Networks[J].IEEE Communications Standards Magazine, 2021, 5(4)：147-153.
[27] Luo Xuewen, Chen Hsiao-Hwa, Guo Qing. LEO/VLEO satellite communications in 6G and beyond networks—Technologies, applications, and challenges[J].IEEE Network, 2024, 38(5)：273-285.
[28] Gomez-del-Hoyo P, Samczynski P.Starlink-Based Passive Radar for Earth's Surface Imaging：First Experimental Results[J].IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024, 17：13949-13965.
[29] Mheldeen D, Jassim M.Application of GNSS technique for horizontal monitoring of dam deformation：Case study of Darbandikhan Lake[J]. The Iraqi Geological Journal, 2025：90-103.
[30] Qu Zhicheng, Zhang Gengxin, Cao Haotong, et al.LEO Satellite Constellation for Internet of Things[J].IEEE Access, 2017, 5：18391-18401.

责任编辑 唐 瑾
杨文杰