

DOI: 10.19364/j.1674-9405.2024.06.008

# Ka 高通量卫星通信水利应用关键技术研究

张建刚<sup>1</sup>, 张宏宇<sup>2</sup>, 李朝纲<sup>3</sup>, 温特<sup>3</sup>, 柴凌云<sup>3</sup>

(1. 水利部信息中心, 北京 100053; 2. 水利部海河水利委员会引滦工程管理局水利信息网络中心, 河北 唐山 063015; 3. 中国卫通集团股份有限公司, 北京 100094)

**摘要:** 水利行业近年来开始在水利监测、抢险救援、超视距数据传输等领域应用 Ka 高通量卫星通信, 但也面临降雨衰减较大等挑战。Ka 高通量卫星通信在克服降雨衰减方面的关键技术主要包括自适应编码调制、极低信噪比通信 2 种技术, 采用卫星链路预算方法对 2 种技术在潘家口水库的抗雨衰能力进行仿真分析。结果表明: 不采用上述技术的通信系统抗雨衰能力仅为 0.5 dB, 降雨发生后通信很快中断; 采用上述技术的通信系统抗雨衰能力最高可达 20.0 dB, 可在 25 mm/h 的雨强场景中保持通信不中断。因此, 需要选择自适应编码调制范围和极低信噪比通信能力优秀的卫星通信网络系统开展 Ka 高通量卫星通信水利应用, 以增强卫星通信可靠性, 支撑水利高质量发展。

**关键词:** Ka 高通量卫星; 卫星通信; 水利应用; 降雨衰减; 自适应编码调制; 极低信噪比

中图分类号: TN927; TV1

文献标识码: A

文章编号: 1674-9405(2024)06-0046-09

## 0 引言

水利部是我国最早使用卫星通信专网的部委, 1994 年开始建设水利卫星通信网并经历 2 代升级扩容, 截至 2022 年 4 月已建成以水利部信息中心卫星主站为核心, 7 个流域、29 个省为分中心, 固定站、车载站、便携站为主体的, 覆盖全国的大型卫星通信专网, 支持雨水情数据报汛、防汛抗旱异地会商、应急处置等功能<sup>[1]</sup>。其中, 水利甚小孔径终端 (VSAT) 专网采用了 Ku 频段宽带通信卫星系统, 卫星固定站实现几百 Kbit/s 至 1 Mbit/s 量级的水利监测数据传输, 卫星车载站和便携站保障了雨情、灾情发生时的标清视频会议会商和应急指挥调度。在移动通信卫星方面, 截至 2022 年底水利行业已采购并部署 6 404 部国产天通一号卫星电话和 1 776 部进口卫星电话, 在应急移动话音业务领域发挥了重要作用<sup>[2]</sup>。在电视广播卫星方面, Ku 频段广播卫星服务水利灾情预警与信息发布, 利用卫星直播系统终端小型化、低功耗和低成本等优势, 发布卫星云图、遥感数据等业务信息, 填补水利地网信息发布系统覆盖盲区的水利机构对专业信息快速共享的空白, 提升业务信息共享能力; 发布水情、雨情、灾情等水利预警信息, 弥补地网及水利卫星专网覆盖范围之外的乡村、河流、水库等风险点无法

实时接收预警信息的短板, 保障人员安全, 支撑灾害发生过程中的决策和灾后信息发布。

目前水利卫星通信应用主要面临两大挑战:

1) 高精度、大范围、实时等全流域透彻感知要求采集海量且异构的数据, 如文本、无人机航迹、监测站点点位、遥感影像、激光点云、视频等数据, 对信息传输技术提出了巨大挑战。2) 暴雨、洪涝等灾害发生时天气恶劣, 卫星链路性能易受影响, 存在通信中断的风险, 影响现场人员通信、水文数据采集等保底类业务的可靠性, 可能存在安全隐患。

Ka 高通量卫星通信在水利行业的应用机遇与挑战并存: 一方面, 针对现有通信网络的覆盖不全、带宽不足、通信基础薄弱等问题, 引入 Ka 高通量卫星网络, 可为全流域透彻感知数据传输和应急抢险通信保障能力提升提供解决途径; 另一方面, Ka 频段雨衰影响较为明显, 灾害场景下的通信可靠性面临挑战。为解决 Ka 频段雨衰带来的通信可靠性问题, 需要针对自适应编码调制 (ACM)、极低信噪比 (VL-SNR) 通信等关键技术开展研究。

## 1 Ka 高通量卫星通信水利应用前景与挑战

### 1.1 Ka 高通量卫星通信简介

高通量卫星采用多点波束和频率复用等技术,

收稿日期: 2024-05-27

基金项目: 水利部重大科技项目 (SKS-2022129)

作者简介: 张建刚 (1966—), 男, 江苏如东人, 高级工程师, 主要从事水利信息化工作。E-mail: jgzhang@mwr.gov.cn

在相同的频率资源下,整颗卫星的通信容量是传统卫星通信容量的数倍<sup>[3]</sup>。为满足带宽和数据速率需求,高通量卫星的工作频段正在从 C/Ku 频段向频率更高的 Ka 频段扩展。Ka 频段与其他频率较低的频段相比,频带资源丰富,可用频带较宽,C/Ku 频段的带宽约为 500 MHz,而 Ka 频段的带宽可达 2.5 GHz,容量可达 10 G~1Tbit/s,能更好地满足卫星高吞吐量需求。同时,Ka 频段高通量卫星还具有天线增益大、地面有效辐射功率值较高、设备终端尺寸灵活等特点。

高通量卫星网络具有开放、共享的特征,为用户提供随遇接入、按需使用的公网服务,一般采用流量售卖的服务模式,资源价格较低。运营商负责建设信关站等地面基础设施,用户无需自行建站,大大降低前期建设投入,但实现小站与小站通信时需要经历四跳通信,时延较高。

目前在中国境内具有落地运营能力的 Ka 高通量卫星共 3 颗(中星 16, 19 和 26 号卫星),其中最新一代为中星 26 号卫星,通信容量超过 100 Gbit/s,用户终端峰值速率可达 450 Mbit/s,覆盖中国国土及周边地区,能够充分满足不断增长的消费级带宽、基站回传、移动性业务等新兴应用的高速通信业务需求,可应用于远程教育、医疗、互联网接入、机载和船舶通信、应急通信等领域。

## 1.2 Ka 高通量卫星通信水利应用场景

依托高通量卫星不受地域限制、带宽大、速率高、网络抗毁能力强、终端耗电低、建设简易等优势,可以在大型水库、小型水库、中小河流或山洪灾害易发地点等区域实现地面网络的有效补充和延伸,为水利监测站点的可视化常态监测、水利野外作业、防汛应急抢险救援等场景,提供便捷、高速的通信保障服务,有利于推动智慧水利建设,助力水利行业的信息化发展。具体内容介绍如下:

1) 保障水利监测站点的可视化常态监测。2022 年 11 月,北京市智慧水务发展研究院在怀柔西台子村通量塔无网无电区域搭建水文监测试点,通过现场架设 Ka 高通量卫星终端,结合太阳能供电系统,建立水利监测站点与高通量卫星地面站的卫星通信链路,监测区域内水利遥测终端机(RTU)采集的水文、气象、土壤等水利监测感知数据,上行和下行速率分别为 10 和 40 Mbit/s,目前已在野外免维护运行 1 年以上。

2) 保障水利野外作业、防汛应急抢险救援。海

河“23·7”流域性特大洪水期间,京津冀晋豫防汛应急通信保障累计投入 Ka 高通量卫星应急通信站点 71 个,并发使用中星 16 和 26 号 Ka 星队网络资源 365 Mbit/s。工业和信息化部、应急管理部统筹指挥调度中型无人机 1 架、无人直升机 1 架,搭载 Ka 高通量卫星网络相控阵终端及高空基站,对北京王平镇、北京潭柘寺镇、河北涿州等地区进行应急通信保障,为数千名用户提供语音、短信、上网、视频等服务。

3) 为水下机器人、无人机、无人测船等的超视距实时通信和控制提供通信保障。黄河水利委员会、海河水利委员会、珠江水利委员会已经通过水利卫星进行中继,将无人机采集的视频图像通过卫星链路传给后方指挥中心,为防汛决策提供了重要支撑,通过卫星通信实现了无人设备的超视距操作,并实时回传到后方指挥部,与倾斜摄影、三维成像、数字孪生等系统互联,大幅度提高了装备的使用效率。

## 1.3 Ka 高通量卫星通信水利应用挑战

Ka 高通量卫星使用频率较高的 Ka 波段,受降雨衰减影响较大。降雨衰减主要指电磁波进入雨层后引起的衰减,主要包括雨滴吸收和散射导致的衰减。由于雨滴直径大约为 0.5~12.0 mm,与 Ka 波段波长非常接近,当电磁波入射到雨滴上时,外界电场力作用使得雨滴内部自由电子和束缚电荷产生剧烈振动,雨滴吸收一部分入射的电磁波能量,同时将另一部分电磁波能量散射出去。在应用 Ka 波段卫星开展通信应用时,需要关注降雨衰减问题,特别是水利应用场景天气恶劣、降雨较多时,需要注意雨衰带来的干扰与影响,卫星通信系统的抗雨衰能力成为影响 Ka 高通量卫星通信水利应用效果的关键因素。

## 2 Ka 高通量卫星通信水利应用关键技术

目前,第 2 代卫星数字视频广播扩展标准(DVB-S2X)和第 2 代卫星数字视频广播返回信道标准(DVB-RCS2)分别是 Ka 高通量卫星通信系统前向和反向链路主要使用的通信体制。本研究基于使用 DVB-S2X 和 DVB-RCS2 通信体制的 Ka 高通量卫星通信系统,研究水利应用关键技术,主要包括 ACM 和 VL-SNR 通信等技术。

### 2.1 ACM 技术

ACM 技术是卫星通信中的一项重要技术,旨在优化卫星链路的利用率和性能。ACM 技术可针对当前链路质量,在支持的调制编码方式(MODCOD)范

围内进行实时动态调整,提升 Ka 高通量卫星通信系统吞吐量,优化用户使用体验。ACM 技术中,发送端可根据接收端反馈的信噪比情况,使用本地配置的编码调制方式切换决策算法,自适应地调整信号发送所采用的编码调制方式,当通信链路质量由于降雨或其

他外界因素发生变化时,能够自动切换至适合当前链路状态的编码调制方式,动态选择最佳的编码调制方式,优化信号传输效率和提高可靠性,满足不同需求和应用场景。卫星通信前向和反向链路 ACM 技术实现过程如图 1 所示。

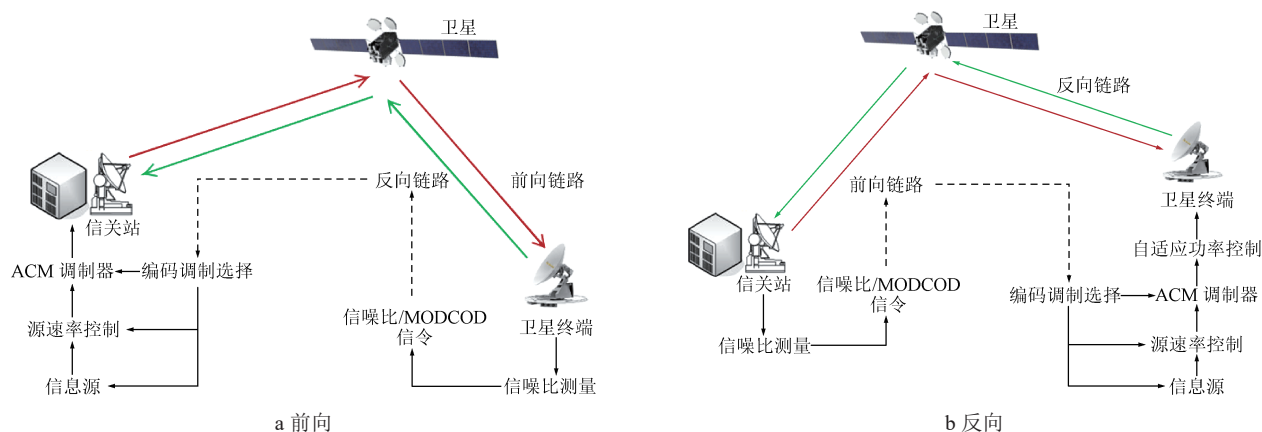


图 1 卫星通信前向和反向链路 ACM 技术实现过程

ACM 技术特性主要包括以下 4 个方面:

1) 调制方式的自适应性。ACM 允许在不同信道条件下动态调整调制方式。通常情况下, DVB-S2X 调制方式包括四元相移键控(QPSK)、八元相移键控(8PSK)、十六元幅度相移键控(16APSK)和三十二元幅度相移键控(32APSK)等, DVB-RCS2 调制方式包括 QPSK, 8PSK, 以及十六元正交幅度调制(16QAM)等选项。在信道质量良好的情况下,可以选择更高阶的调制方式,提高数据传输速率;在信道质量较差时,可以通过较低阶的调制方式增加信号的容错性<sup>[4]</sup>。

2) 编码方式的自适应性。ACM 还允许在不同信道条件下动态调整纠错编码方案。通常情况下, DVB-S2X 纠错编码包括 BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) 码和低密度奇偶校验码(LDPC), DVB-RCS2 纠错编码为涡轮码。在信道质量良好情况下,可以选择较高码率的纠错编码,以提高数据传输速率;在信道质量较差时,可以使用较低码率的纠错编码,以增加信号的容错性。

3) 反馈机制。ACM 需要接收端向发送端提供关于当前信道质量的反馈信息,包括接收信噪比、误比特率、信道衰落等指标。发送端根据接收到的反馈信息动态调整调制和编码参数,最大程度地利用当前信道条件。

4) 带宽效率和灵活性。引入 ACM 技术可以提

高卫星链路的带宽效率和灵活性,使卫星通信系统更好地适应不同的信道条件和业务需求。通过动态调整调制和编码参数, ACM 可在保证可靠性的同时使系统吞吐量最大化,同时削弱信道质量波动对系统吞吐量造成的剧烈影响,使系统吞吐量随信道质量缓慢变化<sup>[5]</sup>,实现系统吞吐量随信道质量的提高而增加,并在信道条件恶化时逐渐减少,从而提高整个系统的性能。

ACM 技术通过动态调整调制和编码参数,使卫星链路能够根据实际情况灵活适应不同的信道条件,从而提高传输效率和性能。

## 2.2 VL-SNR 通信技术

通过在前向链路应用 VL-SNR 模式,采用新的 MODCOD 并进行匹配的帧结构设计,反向链路应用直接序列扩频(DSSS)技术,通过调整扩频因子(SF),可在一定范围内优化通信系统的解调门限,提升基带设备在大雨衰、强干扰环境下的通信能力,介绍如下:

1) 前向链路的 VL-SNR 技术。VL-SNR 是 DVB-S2X 中引入的新技术,通过增添二进制相移键控(BPSK)等新的 MODCOD,并设计适应性的帧结构,可提升基带设备的通信能力,支持接收端在 VL-SNR 或干扰严重等环境下正常解调,在水利行业中的应用能够有效对抗雨衰对 Ka 高通量卫星通信的影响,提供更加稳定的通信链路。另外, VL-SNR 与 DVB-S2/S2X 系统兼容,可基于现有

的 DVB-S2/S2X 系统设备进行布署, 从而节省系统升级成本。VL-SNR 组帧过程如图 2 所示, 主要包

括流适配、前向纠错编码 (FEC)、扩频、映射、物理层组帧及调制等阶段<sup>[6]</sup>。

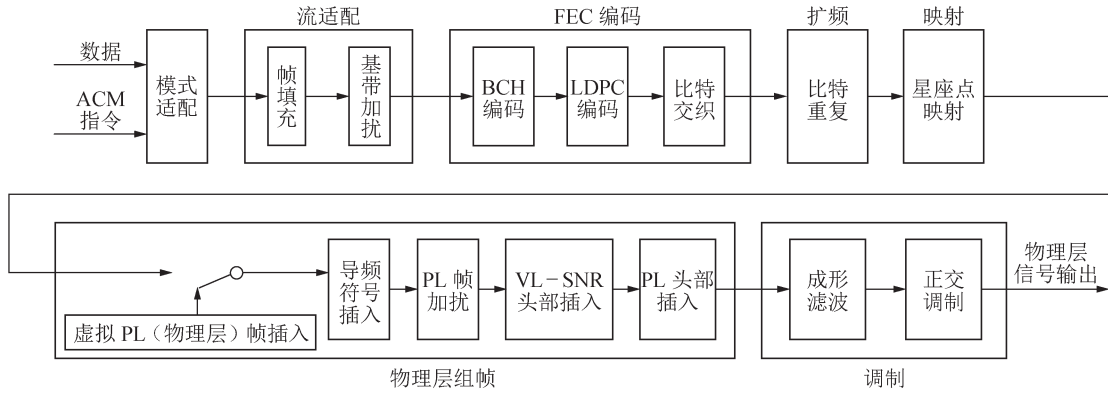


图 2 VL-SNR 组帧过程

由于 VL-SNR 帧的发送不连续且具有一定的突发特性, 解调工作相对困难, 为确保顺利恢复数据, 接收端需要在 VL-SNR 环境下, 对信号进行精准的频率和相位估计, 并尽可能减少同步所需时间。在频率估计方面, 可采用时频联合的载波同步方案, 利用导频基于时域相关算法提升估计精度<sup>[7]</sup>。在相位估计方面, 可将卡尔曼滤波方法同码辅助算法结合, 通过将高增益编码译码输出的软信息用于卡尔曼滤波器更新过程误差信号迭代, 在减少性能损失的同时, 精准跟踪多普勒频偏下的相位变化<sup>[8]</sup>。在定时同步和帧同步方面, 可采用改进的带有补零的频域移位平均周期图算法, 通过多速率频域移位运算对多支路多普勒变化率的匹配进行简化, 减少捕获性能的损失<sup>[9]</sup>。

在 DVB-S2X 协议中, 基于加性高斯白噪声 (AWGN) 信道, 当误帧率 (FER) 为  $1 \times 10^{-5}$  时, VL-SNR 模式下各 MODCOD 的理论解调门限如表 1 所示。

表 1 VL-SNR 模式下各 MODCOD 的理论解调门限

类别	FEC 帧类型	MODCOD	解调门限/dB
Set 1	short	$\pi/2$ BPSK 1/5 SF 2	-9.90
Set 1	short	$\pi/2$ BPSK 11/45 SF 2	-8.30
Set 1	medium	$\pi/2$ BPSK 1/5	-6.85
Set 2	short	$\pi/2$ BPSK 1/5	-6.10
Set 1	medium	$\pi/2$ BPSK 11/45	-5.50
Set 2	short	$\pi/2$ BPSK 4/15	-4.90
Set 1	medium	$\pi/2$ BPSK 1/3	-4.00
Set 2	short	$\pi/2$ BPSK 1/3	-3.72
Set 1	normal	QPSK 2/9	-2.85

VL-SNR 模式可划分为 Set 1 和 Set 2, 分别对应包含 30 780 和 14 976 个有效调制符号, 涵盖 normal, medium, short 3 种 FEC 帧类型, 提供 9 种可选的 MODCOD。VL-SNR 模式能够支持在更低的信噪比环境下通信, 最低解调门限约为 -9.90 dB, 此时应用的 MODCOD 为  $\pi/2$  BPSK 1/5 SF 2。

2) 反向链路的 DSSS 技术。扩频技术基于香农信息理论, 当信道容量一定时, 增加信号的带宽可以降低通信对信噪比的要求, 从而实现低信噪比下的通信。

为提升反向链路中基带设备在低信噪比环境下的通信能力, 可基于 DVB-RCS2 通信体制<sup>[10]</sup>, 应用 DSSS 技术扩展信号带宽, 降低解调门限。在通信流程上, 针对编码后的突发数据, 终端首先使用扩频码序列进行频谱扩展, 再调制发送; 主站接收信号后首先进行解调, 再使用相同的扩频码序列进行解扩, 最终将信号还原为原始信息。

基于 AWGN 信道, 当 FER 为  $1 \times 10^{-5}$  时, DVB-RCS2 中应用 DSSS 技术的部分 MODCOD 的理论解调门限如表 2 所示。

表 2 DVB-RCS2 中应用 DSSS 技术的部分 MODCOD 的理论解调门限

MODCOD	解调门限/dB
QPSK 1/3 SF 32	-11.0
QPSK 1/2 SF 32	-9.6
QPSK 1/3 SF 16	-8.0
QPSK 1/2 SF 16	-6.6
QPSK 1/3 SF 8	-5.0
QPSK 1/2 SF 8	-3.6
QPSK 2/3 SF 8	-1.7

通过比较 DVB-RCS2 协议中未应用 DSSS 技术时支持的最低信噪比,与改造后 DVB-RCS2 协议应用 DSSS 技术时支持的最低信噪比发现,该技术能够支持基带设备在更低的信噪比环境下进行通信,此时应用的 MODCOD 为 QPSK 1/3 SF 32,解调门限约为  $-11.0$  dB。后续可通过增大扩频操作使用的扩频

因子,进一步拉低解调门限,降低频谱效率,提升在强降雨衰的链路条件下的卫星通信可靠性。

### 2.3 关键技术的算法流程

本研究针对水利应用场景,设计接收端运行的支持 VL-SNR 通信的单次 ACM 算法流程如图 3 所示。

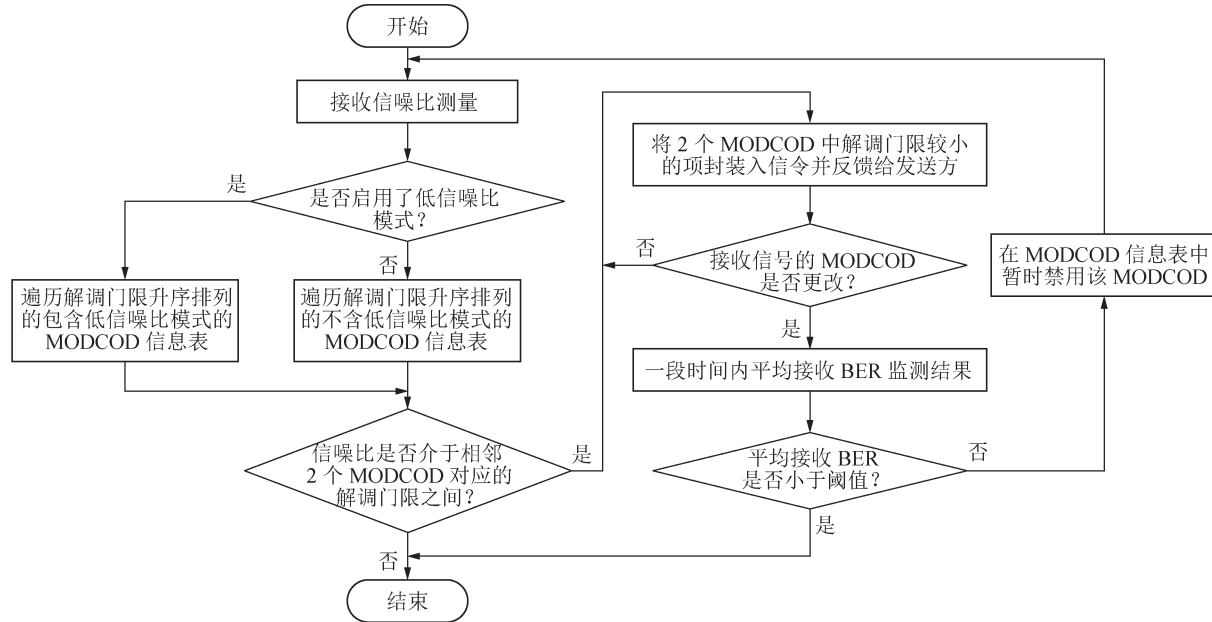


图 3 接收端运行的支持 VL-SNR 通信的单次 ACM 算法流程

接收端每次运行支持 VL-SNR 通信的 ACM 算法时,须经历以下 3 个阶段:

1) 接收信噪比测量。接收端针对下变频后输入基带处理设备中的信号进行信噪比测量,即得到信号功率与噪声功率之比。

2) 模式判断与 MODCOD 信息表遍历。首先,接收端判断当前是否启用 VL-SNR 模式,并依据判断结果选择将要遍历的 MODCOD 信息表。其次,按照解调门限升序对 MODCOD 信息表中的内容进行重排列,再遍历信息表,判断信噪比是否介于相邻 2 个 MODCOD 对应的解调门限之间。若判断结果为真,则选取 2 个 MODCOD 中解调门限较小的项封装入信令,反馈给发送方,发送方将切换使用接收方选取的新 MODCOD 进行后续的业务数据传输;否则,接收端认为当前链路状况极差,发送方现有的 MODCOD 无法支撑通信,最后结束流程。

3) MODCOD 切换及通信质量监测。在流程未结束的前提下,接收端监测接收信号使用的 MODCOD 是否切换成功。若在相应定时器超时后仍未切换,则重复将新选取的 MODCOD 封装入信令并反馈给发

送方;若 MODCOD 成功切换,接收端将在设定的一段时间内持续进行误比特率 (BER) 监测,计算平均接收 BER 监测结果,并与设定的阈值进行比较。若计算结果大于阈值,则认为切换后的 MODCOD 不满足通信质量要求,将暂时禁用 MODCOD 信息表中该类 MODCOD,然后重新运行 ACM 算法流程;否则,认为切换后的 MODCOD 满足通信质量,结束流程。

## 3 Ka 高通量卫星通信水利应用性能分析

### 3.1 场景设计

基于中星 26 号高轨高通量卫星通信网络,使用国产化卫星通信系统,为位于河北省潘家口水库的卫星终端提供数据传输备份和应急通信保障服务,其中数据传输备份实现低速监测信息、语音业务、工程视频备份传输,应急通信保障实现视频会商、指挥调度通信保障。卫星终端天线的等效口径为  $0.98$  m,功放的输出功率为  $4$  W,基于功带平衡的原则,针对以上服务场景进行链路预算。

衡量卫星通信系统的抗雨衰能力需要定量描

述实时雨量和通信质量的关系,为进行降雨衰减预测,提出多个计算降雨衰减的模型,其中 ITU-R 雨衰模型<sup>[11]</sup>在给定频率、仰角、极化角和地球站位置等参数的情况下,根据雨强大小预测雨衰值,是当前国际广泛认可的降雨预测模型。将潘家口水库经纬度(118.30°E, 40.39°N)、海拔(0.25 km)代入 ITU-R 雨衰模型,分别针对卫星终端下行接收频率和上行发送频率,建立雨强和雨衰值的映射关系如表 3 所示。卫星终端的抗雨衰能力须超过对应雨强下的雨衰值,才可保持通信不中断。

表 3 潘家口水库雨强与雨衰值的关系

雨强/ (mm · h <sup>-1</sup> )	雨衰值/dB	
	19 980 MHz (终端下行接收频率)	29 890 MHz (终端上行发射频率)
5	2.90	6.57
10	5.54	11.78
15	7.69	15.56
20	9.43	18.83
25	10.99	21.75
30	12.42	24.41
35	13.74	26.86
40	14.97	29.15
45	16.13	31.30
50	17.23	33.33

### 3.2 计算方法

卫星通信链路包含前向和反向链路,各自包含上行和下行链路,卫星终端基于卫星通信链路实现与主站之间的双向通信。前向和反向链路中上行与下行链路、链路整体的信噪比,以及信息速率的预算方法<sup>[12]</sup>如下:

1) 上行链路。上行链路计算是针对发送端到卫星这段空间链路的计算,旨在利用已知上行链路参数计算得到发送端上行发射信号到达卫星接收机输入端口的载波信号功率与噪声功率之比,即上行链路信噪比  $(C/N)_u$ ,定义为

$$(C/N)_u = P_t - L_u + t_s - 10 \lg(B_u) - k, \quad (1)$$

式中:  $P_t$  为发送端的等效全向辐射功率;  $L_u$  为上行链路总传输损耗,主要包含自由空间传播损耗和雨衰等;  $t_s$  为上行链路卫星接收系统品质因数;  $B_u$  为上行链路载波噪声带宽;  $k$  为玻尔兹曼常数,取值为  $-228.6 \text{ dB} (\text{W}/(\text{K} \cdot \text{Hz}))$ 。

2) 下行链路。下行链路计算是针对卫星到接收

端这段空间链路的计算,旨在利用已知下行链路参数计算得到卫星下行转发信号到达接收端接收机输入端口的载波信号功率与噪声功率之比,即下行链路信噪比  $(C/N)_d$ ,定义为

$$(C/N)_d = P_s - L_d + t_r - 10 \lg(B_d) - k, \quad (2)$$

式中:  $P_s$  为下行链路卫星链路载波信号的等效全向辐射功率;  $L_d$  为下行链路总传输损耗,主要包含自由空间传播损耗和雨衰等;  $t_r$  为接收端接收系统品质因数;  $B_d$  为下行链路载波噪声带宽。

3) 链路整体。链路整体计算是针对发送端到接收端空间链路整体的计算,旨在利用上行和下行链路的已知参数计算得到整个链路系统,在接收端接收机输入端口的载波信号功率与总的噪声及干扰功率之比,即链路整体的信噪比  $C/N$ ,定义为

$$C/N = 10 \cdot \lg \left\{ \left[ 10^{\frac{(C/N)_d}{10}} \right]^{-1} + \left[ 10^{\frac{(C/N)_s}{10}} \right]^{-1} + \left[ 10^{\frac{(C/I)_a}{10}} \right]^{-1} + \left[ 10^{\frac{(C/I)_s}{10}} \right]^{-1} + \left[ 10^{\frac{(C/I)_x}{10}} \right]^{-1} + \left[ 10^{\frac{(C/I)_i}{10}} \right]^{-1} \right\}, \quad (3)$$

式中:  $(C/I)_a$  为链路载波信号功率与相邻信道干扰信号功率之比;  $(C/I)_s$  为链路载波信号功率与相邻卫星系统干扰功率之比;  $(C/I)_x$  为链路载波信号功率与交叉极化信号产生的干扰功率之比;  $(C/I)_i$  为链路载波信号功率与互调信号产生的干扰功率之比。

4) 信息速率  $R_b$ 。  $R_b$  定义为

$$R_b = R_s \times \eta, \quad (4)$$

式中:  $R_b$  为通信的信息速率;  $R_s$  为通信的符号速率;  $\eta$  为通信时选用 MODCOD 在不考虑降系数条件下的频谱效率。

使用以上链路计算方法,针对不同场景下的前向和反向链路接收端信噪比进行预算。

### 3.3 仿真计算

假定 1 种终端初始通信状态: 不考虑雨衰,系统为终端分配的前向带宽为 115.5 MHz,反向带宽为 9.6 MHz; 前向使用 DVB-S2X 通信体制,不启用 VL-SNR 模式,反向基于 DVB-RCS2 通信体制,不启用 DSSS。在这种状态下,对卫星通信链路的性能进行预算,结果如表 4 所示。由表 4 可知: 当雨衰为 0 时,前向链路信噪比约为 9.99 dB,可使用的最高阶 MODCOD 为 16APSK-2/3,通信速率可达 266.93 Mbit/s; 反向链路信噪比约为 11.77 dB,可使用的最高阶 MODCOD 为 8PSK-5/6,通信速率可达 16.40 Mbit/s。以上为未附加用户链路雨衰条件下的极限通信能力。

表4 前向和反向链路整体的预算结果

序号	参数名称	参数值	
		前向	反向
1	上行信噪比/dB	16.04	11.86
2	下行信噪比/dB	11.24	29.09
3	全链路信噪比/dB	9.99	11.77
4	支持的最高阶 MODCOD	16APSK-2/3	8PSK-5/6
5	前向通信速率/(Mbit·s <sup>-1</sup> )	266.93	
6	反向通信速率/(Mbit·s <sup>-1</sup> )	16.40	

基于以上假定的终端初始通信状态,对 ACM 技术、VL-SNR+DSSS 技术在 Ka 高通量卫星通信中的抗雨衰能力进行定量分析,分为无 ACM 无 VL-SNR+DSSS、有 ACM 无 VL-SNR+DSSS、有 ACM 和 VL-SNR+DSSS 等 3 种场景进行讨论。

### 3.3.1 无 ACM 无 VL-SNR+DSSS

针对无 ACM 无 VL-SNR+DSSS 的场景,计算不同程度雨衰下终端前向和反向的通信性能,计算结果如表 5 所示。

表5 无 ACM 无 VL-SNR+DSSS 场景不同雨衰下的通信性能

雨衰/dB	前向全链路信噪比/dB	前向 MODCOD	前向通信速率/(Mbit·s <sup>-1</sup> )	反向全链路信噪比/dB	反向 MODCOD	反向通信速率/(Mbit·s <sup>-1</sup> )
0.0	9.99	16APSK-2/3	266.93	11.77	8PSK-5/6	16.40
0.5	9.61	16APSK-2/3	266.93	11.28	8PSK-5/6	16.40
1.0	9.22		0.00	10.79	8PSK-5/6	16.40
1.5	8.82		0.00	10.30		0.00
2.0	8.41		0.00	9.80		0.00
2.5	7.99		0.00	9.31		0.00

随着用户链路雨衰的增大,前向和反向链路信噪比逐渐降低,由于此场景下,MODCOD 不会随链路质量进行自适应调整,当接收端信噪比低于所用 MODCOD 的解调门限时,通信中断。由表 5 可知,此场景下,前向链路可抵抗的最大雨衰约为 0.5 dB,反

向链路可抵抗的最大雨衰约为 1.0 dB。

### 3.3.2 有 ACM 无 VL-SNR+DSSS

针对有 ACM 无 VL-SNR+DSSS 的场景,计算不同程度的雨衰下终端前向和反向的通信性能,计算结果如表 6 所示。

表6 有 ACM 无 VL-SNR+DSSS 场景不同雨衰下的通信性能

雨衰/dB	前向全链路信噪比/dB	前向 MODCOD	前向通信速率/(Mbit·s <sup>-1</sup> )	反向全链路信噪比/dB	反向 MODCOD	反向通信速率/(Mbit·s <sup>-1</sup> )
0	9.99	16APSK-2/3	266.93	11.77	8PSK-5/6	16.40
2	8.41	8PSK-3/4	225.22	9.80	8PSK-3/4	14.58
4	6.70	8PSK-3/5	180.18	7.82	8PSK-2/3	12.80
6	4.89	QPSK-4/5	158.40	5.83	QPSK-3/4	10.80
8	3.01	QPSK-3/5	118.80	3.84	QPSK-2/3	9.49
10	1.09	QPSK-2/5	78.32	1.85	QPSK-1/2	6.48
12	-0.85		0.00	-0.15	QPSK-1/3	4.21
14	-2.82		0.00	-2.15		0.00

随着用户链路雨衰的增大,前向和反向链路信噪比逐渐降低,由于在场景下 MODCOD 会随链路质量进行自适应调整,当接收端信噪比低于所用 MODCOD

的解调门限时,将进行 MODCOD 的切换,理论上可支持在较大雨衰的情况下进行通信。由表 6 可知:此场景下,前向链路可抵抗的最大雨衰约为 10 dB,此时信

噪比约为 1.09 dB, 使用的 MODCOD 为 QPSK-2/5, 通信速率约为 78.32 Mbit/s; 反向链路可抵抗的最大雨衰约为 12 dB, 此时信噪比约为 -0.15 dB, 使用的 MODCOD 为 QPSK-1/3, 通信速率约为 4.21 Mbit/s。

### 3.3.3 有 ACM 和 VL-SNR+DSSS

针对有 ACM 和 VL-SNR+DSSS 的场景, 计算不同程度的雨衰下终端前向和反向的通信性能, 计算结果如表 7 所示。

表 7 有 ACM 和 VL-SNR+DSSS 场景不同雨衰下的通信性能

雨衰/dB	前向全链路信噪比/dB	前向MODCOD	前向通信速率/(Mbit·s <sup>-1</sup> )	反向全链路信噪比/dB	反向MODCOD	反向通信速率/(Mbit·s <sup>-1</sup> )
0	9.99	16APSK-2/3	266.93	11.77	8PSK-5/6	16.40
2	8.41	8PSK-3/4	225.22	9.80	8PSK-3/4	14.58
4	6.70	8PSK-3/5	180.18	7.82	8PSK-2/3	12.80
6	4.89	QPSK-4/5	158.40	5.83	QPSK-3/4	10.80
8	3.01	QPSK-3/5	118.80	3.84	QPSK-2/3	9.49
10	1.09	QPSK-2/5	78.32	1.85	QPSK-1/2	6.48
12	-0.85	normal QPSK 2/9	46.95	-0.15	QPSK-1/3	4.21
14	-2.82	normal QPSK 2/9	46.95	-2.15	QPSK 1/2 SF 8	0.84
16	-4.80	short $\pi/2$ BPSK 4/15	27.37	-4.15	QPSK 1/3 SF 8	0.50
18	-6.79	medium $\pi/2$ BPSK 1/5	18.70	-6.15	QPSK 1/2 SF 16	0.42
20	-8.78	short $\pi/2$ BPSK 1/5 SF 2	8.30	-8.15	QPSK 1/2 SF 32	0.21
22	-10.77		0.00	-10.15	QPSK 1/3 SF 32	0.12
24	-12.77		0.00	-12.15		0.00

随着用户链路雨衰的增大, 前向和反向链路信噪比逐渐降低。在此场景下, 由于 MODCOD 会随链路质量进行自适应调整, 当接收端信噪比低于所用 MODCOD 的解调门限时, 将进行 MODCOD 的切换; 又因采用了 VL-SNR 模式, 波形解调门限更低, 理论上可支持在更大雨衰的情况下进行通信。由表 7 可知: 前向链路可抵抗的最大雨衰约为 20.0 dB, 此时信噪比约为 -8.78 dB, 使用的 MODCOD 为 BPSK 1/5 SF 2, 通信速率约为 8.30 Mbit/s; 反向链路可抵抗的最大雨衰约为 22 dB, 此时信噪比约为 -10.15 dB, 使用的 MODCOD 为 QPSK 1/3 SF 32, 通信速率约为 0.12 Mbit/s。

#### 3.3.4 结果分析

由以上各场景计算出的前向链路和反向链路通信速率随雨衰的变化曲线如图 4 所示。可以看出: 在通信初始状态下, 无 ACM 无 VL-SNR+DSSS 场景的抗雨衰能力为 0.5 dB, 降雨后通信很快中断; 有 ACM 无 VL-SNR+DSSS 场景的抗雨衰能力为 10.0 dB, 可在雨强 10 mm/h 的场景中保持通信不中断; 有 ACM 和 VL-SNR+DSSS 场景的抗雨衰能

力为 20.0 dB, 可在雨强 25 mm/h 的场景中保持通信不中断。Ka 高通量卫星通信系统应用 ACM 技术与 VL-SNR 通信技术后, 可大幅提升双向通信的抗雨衰能力, 能够为水利应用提供更加稳定的通信保障。

#### 3.4 应用效果

2024 年 6 月, Ka 高通量卫星通信系统在河北省潘家口水库布署并开展试点应用, 在汛期使用 0.98 m 卫星固定站实现了基于卫星通信的工程监测视频数据传输备份和互联网接入。卫星固定站互联网接入前向速率达到 83.5 Mbit/s, 反向速率达到 9.66 Mbit/s, 工程监测视频数据传输效果清晰无卡顿。应用效果表明, Ka 高通量卫星通信系统具备保障数字孪生流域要求的大数据通信能力, 可显著提高水利卫星通信网络韧性, 弥补水利卫星通信网络高速通信能力弱的不足。

## 4 结语

Ka 高通量卫星通信应用是助力水利高质量发展的重要途径之一, 已经在水文测站、重大灾害现场、前



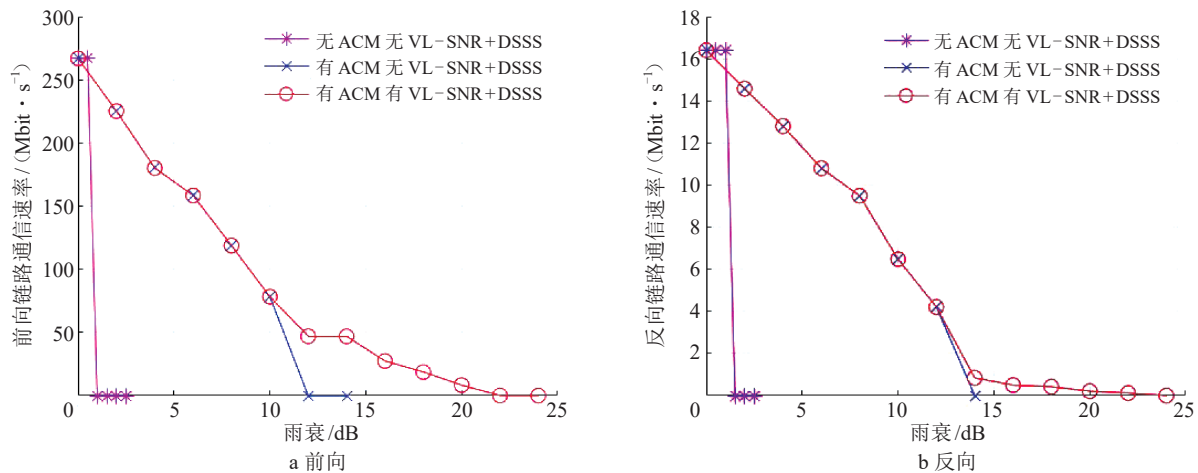


图4 各场景中前向和反向链路通信速率随雨衰的变化

沿技术试点等领域成功完成通信保障任务,应用效果良好。本研究对 Ka 高通量卫星的水利应用前景、关键技术、应用性能进行分析,主要结论如下:

1) 降雨衰减是 Ka 高通量卫星通信水利应用面临的巨大挑战, Ka 高通量卫星通信系统引入 ACM, VL-SNR+DSSS 等抗雨衰技术提升基带设备在大雨衰和强干扰环境下的通信能力。

2) 根据仿真计算和试点应用结果可知,在引入 ACM, VL-SNR+DSSS 等抗雨衰技术后, Ka 高通量卫星通信系统在华北地区的水利应用效果良好,具备向其他区域推广的潜力。

3) 随着 ACM, VL-SNR+DSSS 等抗雨衰技术研究的不断深入, Ka 高通量卫星通信系统的 MODCOD 范围将持续扩大,最低解调门限将持续降低,系统的抗雨衰能力将进一步得到提高。

未来可在适当时机选用 Ka 高通量卫星网络加强新一代水利卫星通信系统建设,构建平时固定监测+战时应急通信的全时空保障能力,支撑雨水情防线高质量建设,提升应急救援快速响应能力,提高水利工程安全监控水平。

## 参考文献:

- [1] 张建刚,高广利.新一代水利卫星通信应用系统建设[J].水利信息化,2012(1):47-51.
- [2] 蔡阳,钱峰.2022年度全国水利网信发展报告[EB/OL].[2024-04-26].<http://xxzx.mwr.gov.cn/zzsc/tjgb/slwxzfzbg/2022/index.html>.
- [3] 刘悦.国外高通量卫星系统与技术发展[J].国际太空,2017(11):42-47.
- [4] 张颖,熊蔚明,王竹刚.近地卫星 Ka 频段数传链路抗雨衰自适应模式设计[J].国防科技大学学报,2019,41(6):

149-155.

- [5] VASAVADA Y, GOPAL R, RAVISHANKAR C, et al. Architectures for next generation high throughput satellite systems[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2016, 34 (4): 523-546.
- [6] European Telecommunications Standards Institute. Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part II (DVB-S2X): ETSI EN 302 307-2 (V1.3.1) [S]. Nice: ETSI, 2021: 16-53.
- [7] 刘洪微.极低信噪比下基于连续相位调制的载波同步算法研究与实现[D].西安:西安电子科技大学通信工程学院,2017:7-64.
- [8] 杨杰,李广侠,朱宏鹏,等.低信噪比高动态下基于卡尔曼滤波的码辅助载波同步算法[J].通信技术,2017,50(10):2167-2171.
- [9] 段瑞枫,刘荣科,周游,等.一种低复杂度的极低信噪比高动态信号载波粗捕获算法[J].航空学报,2013,34(3):662-669.
- [10] European Telecommunications Standards Institute. Second generation DVB. Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 2: Lower Layers for Satellite standard: ETSI EN 301 545-2 (V1.3.1) [S]. Nice: ETSI, 2020: 12-13.
- [11] International Telecommunication Union. Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods: ITU-R P.838-3 [S]. Geneva: ITU, 2005: 1-3.
- [12] 中华人民共和国工业和信息化部.地球静止轨道卫星固定业务的链路计算方法: YD/T 2721-2014 [S].北京:人民邮电出版社,2014:12-15.

(下转第70页)