

基于“鹊桥”通导遥星座系统的地月中继协作传输方案

吴耀南¹, 顾术实^{1,2}, 张钦宇^{1,2}, 何熊文³, 陈朝基³

(1. 哈尔滨工业大学(深圳), 深圳 518055; 2. 广东省空天通信与网络技术重点实验室, 深圳 518055;
3. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 针对地月超远距离通信环境下信道高动态、路径损耗大等因素导致的数据传输不可靠问题, 利用“鹊桥”通导遥星座系统的在轨信息处理与多源数据融合能力, 通过引入符号级转发策略和多源冗余共享机制, 设计了异构数据融合分布式RaptorQ (Distributed RaptorQ, DRQ) 编码传输机制, 以提升图像数据传输的可靠性; 采用分块循环解码算法, 在保障强纠错性能的同时, 与标准高斯消元解码算法相比降低了40%的计算复杂度。仿真结果表明, 在典型地月空间通信场景下, 与传统RS (Reed-Solomon) 编码相比, 所提的分布式RaptorQ方案在同等编码冗余可带来2 dB的编码增益; 与传统中继存储转发方案相比, 该方案可提升20%的解码成功率, 进而可提高5 dB以上的图像峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR), 实现了地月空间多源图像数据的高可靠传输。

关键词: “鹊桥”通导遥星座系统; 地月中继通信; RaptorQ编码; 图像传输; 峰值信噪比

中图分类号: TN925.+

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2025)04-0336-11

DOI: 10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250115

引用格式: 吴耀南, 顾术实, 张钦宇, 等. 基于“鹊桥”通导遥星座系统的地月中继协作传输方案[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(4): 336-346.

Reference format: WU Y N, GU S S, ZHANG Q Y, et al. Cislunar relay-coordinated transmission scheme based on the Queqiao communication, navigation, and remote sensing constellation system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(4): 336-346.

引言

自人类首次月球探测以来, 月球已成为深空探测的前沿和焦点。中国探月工程自2004年启动, 历经“绕”“落”“回”三个阶段, 到2020年“嫦娥五号”成功实现月球采样返回, 标志着无人月球探测阶段圆满收官^[1]。2024年, “嫦娥六号”任务成功实现了月球背面采样并返回地球, 再次彰显了中国在月球探测领域的技术实力与工程能力^[2]。随着国际月球科研站建设、载人登月计划的推进, 以及多探测器协同勘探任务的深入开展, 月球探测正朝着长期化、智能化、多任务协同演进^[3]。

为支撑未来复杂月球探测任务, 中国正在稳步构建“鹊桥”通导遥星座(以下简称“鹊桥”星座)系统。该系统并非从零起步, 而是基于已有深空探测基础设施逐步发展。2018年, “鹊桥一号”中继星成

功部署于地月L2点Halo轨道, 为“嫦娥四号”月球背面探测任务提供了可靠的中继通信, 突破了月球背面不可见的通信瓶颈^[4]。2024年, “鹊桥二号”中继星成功发射, 进一步增强了地月空间卫星的通信能力, 扩展了应用频段与数据传输速率^[5]。同年, “天都一号”“天都二号”通导技术试验星成功入轨, 开展了环月轨道高精度定轨与地月空间高速测控技术试验, 为“鹊桥”通导遥星座的精密定轨、星间测量与多频段融合通信奠定了关键技术基础^[6]。同时, 国际首个基于远距离逆行轨道(Distant Retrograde Orbit, DRO)的地月空间三星座已完成构建, 首次实现了地月空间卫星跟踪卫星定轨导航能力的在轨验证^[7], 为“鹊桥”通导遥星座的精密定轨与自主导航奠定了技术基础。此外, 已建成的“北斗”导航系统、“高分”遥感卫星体系及“天链”中继卫星系统, 为“鹊桥”通导遥星座提供了系统架构与运营经

收稿日期: 2025-04-01 修回日期: 2025-07-30

基金项目: 民用航天技术预先研究项目(D040102); 国家自然科学基金(62271165, 62027802); 广东省基础与应用基础研究基金(2023A1515030297)

验。未来分三步构建该星座系统: 2030年前后建成先导型星座, 支撑探月工程四期和国际月球科研站等任务; 2040年前后建成基本型, 实现区域导航, 服务载人月球探测与火星、金星探测等; 2050年前后建成拓展型, 实现火星、金星通信导航覆盖, 服务巨行星探测和太阳系边际探测等。

“鹊桥”星座旨在融合通信、导航与遥感三大功能, 构建覆盖地月空间并逐步延伸至行星际的一体化天基信息网络。在通信方面, 系统拟通过多层轨道卫星与中转站, 提供高速、可靠的数据中继; 在导航方面, 将为月面及环月航天器提供实时定位与授时服务; 在遥感方面, 可协同实现对月球及深空环境的多模态感知与数据获取。

地月空间通信仍面临信道环境复杂、传输时延长、链路不稳定、多类数据服务质量要求各异等诸多挑战^[8]。特别是随着探测任务的深入发展, 高分辨率遥感影像、视频流与多光谱数据量的急剧增加, 对传输速率与可靠性提出了更高的要求。传统以“单点对单点”为核心的中继存储转发通信模式, 已难以满足未来大规模、多用户、高实时需求的月球探测任务^[9]。未来通信需求的演进正驱动传输模式向多点协同中继架构转变。具体体现在两个层面: 首先, 在多目标组网通信层面, 随着月球科研站的建立与多巡视器的协同工作, 月面多个固定探测器与移动巡视器需同时与轨道中继星建立连接, 这要求月轨卫星具备动态调度链路资源、为避免冲突需根据不同业务分配优先级的智能协作能力; 其次, 在多源信息融合处理层面, 针对月球多设备探测场景, 由光学相机、光谱仪等采集的异构数据, 亟需在轨进行智能融合与统一封装, 以提升下行链路的传输效率。

网络编码与喷泉码的融合技术, 作为提升网络吞吐量与传输可靠性的有效途径, 在构建多点协同中继架构中展现出广阔的应用前景。现有分布式喷泉码方案多基于传统 Raptor 码或 LT (Luby Transform) 码构建^[10-11], 其假设节点能力近似、通信对称, 适用于地面同构网络环境, 但在由轨道中继卫星、月面着陆器、移动巡视器等构成的异构地月通信网络适用性有限。尽管已有研究尝试将性能更优异的分布式 RaptorQ (Distributed RaptorQ, DRQ) 编码应用于分布式场景^[12-13], 但这些方案往往仅针对分层视频流数据进行优化, 其设计严重依赖于视频数据的帧级与数据包级依赖关系, 难以适应月球探测过程中产生的单层高分辨率图像、光谱数据、遥测指令等多源异构数据的统一传输需求。因此, 目前尚缺乏一种通用、从最

基础符号融合机制入手的分布式 RaptorQ 编码框架。其需能超越特定数据类型的限制, 实现对多种类、多优先级数据的统一封装与自适应不等错误保护, 以满足地月空间复杂探测任务对数据传输的苛刻要求。

“鹊桥”星座以其多节点、多频段、智能协同的架构联合分布式 RaptorQ 编码方案, 为应对上述挑战提供了新的契机。该方案并非简单的编码优化, 而是紧密契合上述协同中继架构, 通过中继节点的符号级网络编码与多源冗余共享, 实现对多信源异构数据的在轨融合与联合容错传输, 从而为构建高效、可靠的地月空间信息网络提供关键技术支撑。本文的主要贡献为提出了面向“鹊桥”通导遥星座的地月空间通信网络架构与传输模式。首先梳理并构建了一个多层的通信网络架构, 明晰了各层节点的功能与链路特性。在此基础上, 定义了一种支持异构数据统一调度与冗余共享的通信传输模式。针对图像等数据传输的可靠性问题, 提出了分布式 RaptorQ 编码方案, 该方案通过中继节点的符号级网络编码与多源冗余共享机制, 提升了系统在动态丢包地月链路的传输鲁棒性。同时, 为降低星上处理开销, 设计了一种分块循环 RaptorQ 解码算法, 在保障强纠错性能的同时, 有效地降低了计算复杂度。并通过系统仿真验证了所提方案的有效性与优越性。在典型地月空间通信场景下, 对所提方案进行了全面的验证。

1 基于“鹊桥”通导遥星座的地月空间通信网络架构与功能特性

随着月球探测任务由单点、短期探测向多节点、长期驻留等模式转变, 地月空间通信网络已成为支撑未来复杂月球探测任务的关键基础设施, 其发展呈现规模化、实时性及高可靠性的特点。月球南极永久阴影区水冰探测、月球科研站建设与运行、多巡视器协同勘测及载人登月等任务, 对地月通信网络提出了连续覆盖、高可靠通信的严格要求, 不仅要支持科学数据与遥操作指令的实时传输, 还需实现高分辨率遥感数据的高效回传^[14]。基于“鹊桥”星座的多层中继通信网架构, 如图1所示。

在地球同步轨道 (Geosynchronous Earth Orbit, GEO) 部署“行星际中转站”, 作为骨干中继节点; 同时, 在 L1 和 L2 点分别部署专用中继卫星, 服务于月球正面与背面的任务, 并计划在环火、环金轨道部署同类中继卫星, 服务于行星表面任务。月面终端可通过月轨网中继至 GEO 中转站, 或经由 L1/L2 点中继卫星, 最终接入地面网络。

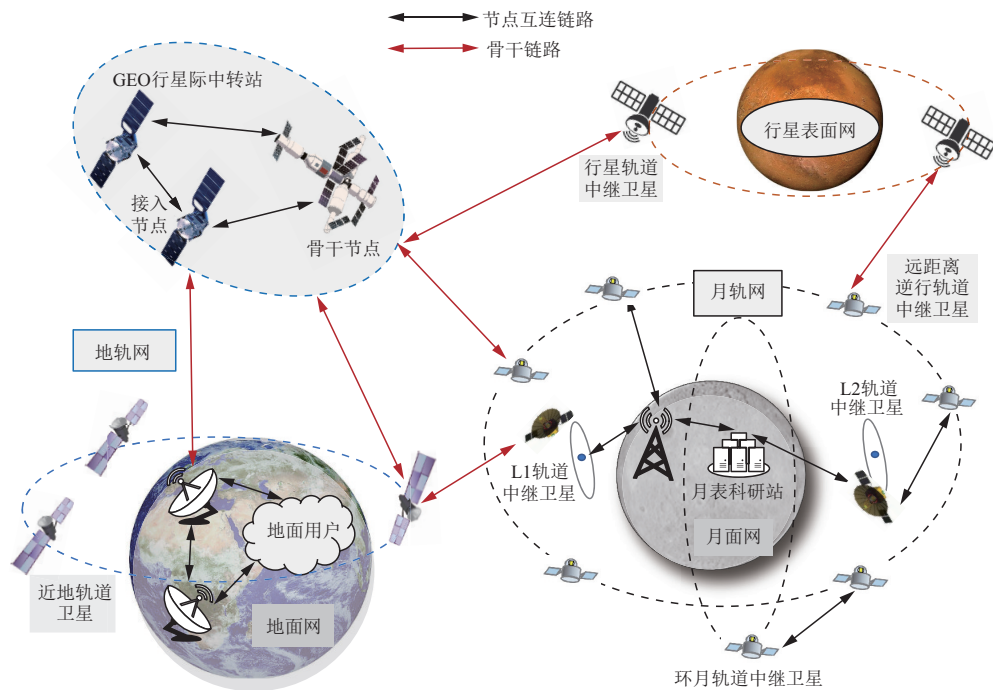


图1 基于“鹊桥”通导遥星座系统的地月多层中继通信网络

Fig.1 Multi-layer cislunar relay communication network based on Queqiao navigation, communication, and remote sensing satellite constellation system

在环月轨道部署通导遥多功能卫星,为月球南极科研站、正面载人探测等任务提供中继通信、导航与遥感服务,任务终端主要使用S、X与Ka等多频段接入。此外,火星、金星等深空探测器借助相应的行星轨道中继卫星,通过X、Ka、S及激光等多频段星间链路实现与地球的可靠通信。

针对月面通信,参考国际空间数据系统咨询委员会(Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS)深空任务标准,月面上行链路以S频段为主,用于传输前向指令与关键遥测^[15];特高频(Ultra High Frequency, UHF)主要用于月面器间的短距离通信,如着陆器与巡视器之间,其强绕射能力可有效缓解月面地形遮挡的问题^[16];对下行链路中,S频段兼容中国现有深空测控网,适用于关键参数与低速率数据^[17];Ka频段则支持高速数据回传,用于高分辨率遥感影像与光谱数据^[15]。

上述地月通信网络中,各类通信节点需处理来自不同信源节点的异构数据流,包括单帧可达百兆级的高分辨率光学影像、需保真传输的红外光谱数据和微波雷达点云等^[18-19]。随着这些激增数据在采样率、误差敏感度和QoS需求等方面的多样化和差异化趋势,传统的中继存储转发模式逐渐难以兼顾传输效率与可靠性的要求。作为系统的核心枢纽,“鹊桥”星座集成了星上智能处理、分布式协作传输与多源数据融合

等核心能力,构建起高效、可靠的地月及深空数据传输体系。星上智能处理能力依托高性能在轨计算单元,可实现对月面多源遥感数据的实时处理,包括高分辨率图像的智能分析、特征提取与优先级划分,并完成自适应压缩与优化编码;分布式协作传输能力通过多节点协同架构,在中断发生时能自动启用邻近卫星建立冗余链路,增强了系统在复杂月面环境的通信连续性与韧性^[20];多源数据融合能力则支持对光学影像、红外光谱与微波点云等异构探测数据进行统一封装、智能聚合与传输调度。

“鹊桥”星座通过分布于地球轨道、月球轨道及行星际空间的骨干与接入节点,有效整合微波激光等多频段链路资源,构建起覆盖广、容量大、响应快的多层传输网络。这些能力共同提升了海量异构数据的实时回传与调度效率,为多任务协同、大规模探测活动提供了关键通信支撑。

2 基于“鹊桥”通导遥星座系统的分布式编码传输方案

2.1 地月空间传输特性分析

地月空间独特的信道环境传输特性主要由巨大的空间损耗及地球大气效应共同决定,构成了高延迟、高误码的弱信号通信场景。基于空间链路的基本模

型, 信号传输质量主要由接收端的信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 决定, 可表示为

$$SNR = P_t + G_t + G_r - L_{fs} - L_{atm} - L_{other} - P_n \quad (1)$$

其中: P_t 为发射功率; G_t 和 G_r 分别为发射和接收天线增益; L_{fs} 为自由空间损耗; L_{atm} 为大气损耗; L_{other} 为其它损耗, 设定为 1 dB; P_n 为噪声功率。

自由空间损耗 L_{fs} 为

$$L_{fs} = 20 \lg d + 20 \lg f + 20 \lg \frac{4\pi}{c} \quad (2)$$

其中: d 为收发两端距离; f 为通信频段; c 为光速。

噪声功率 P_n 为

$$P_n = 10 \lg(kT_{sys}B) \quad (3)$$

其中: k 为玻尔兹曼常数; T_{sys} 为系统噪声温度; B 为信号带宽。

地月通信链路呈现出以下特征: 极高的自由空间损耗: 地月距离约 38 万 km 是地球同步轨道距离约 3.6 万 km 的 10 倍以上, 根据式 (2), 其自由空间损耗仅因距离项就高出约 20 dB。此外, 损耗与频率成正比, 这使得 Ka 频段 (~26 GHz) 的路径损耗比 S 频段 (~2.2 GHz) 高出约 21.5 dB。巨大的路径损耗是地月链路接收信噪比低下的根本原因。复杂的大气与雨衰效应: 地球站与中继卫星之间的下行链路需穿越大气层。S 频段信号受大气吸收和降雨的影响较小, 具有较高的可用性和可靠性^[21]。而 Ka 频段信号波长较短, 受水蒸气吸收和降雨衰减的影响极为显著, 在恶劣的天气条件下, 额外衰减可超过 20 dB, 导致链路中断, 因此常需与 S 频段构成互补备份。深度衰落的信道环境: 受到相对运动、天线指向抖动及月球表面多径反射的影响, 链路信号会经历不同程度的衰落, 进一步加剧了接收信号的波动, 要求物理层调制编码与上层重传协议具备较强的抗衰落能力。

为定量评估传输特性, 选取“鹊桥”星座卫星在地月最大通信距离进行链路预算, 区分以下两类典型链路场景: 地月空间远距离链路指连接位于月球空间的航天器 (如部署于地月 L2 点 Halo 轨道的“鹊桥”中继卫星) 与地球地面站之间的无线链路, 其核心特征是传输距离极远, 且信号需穿越地球大气层。具体而言, 星地距离主要是由 3 部分构成: 地月平均距离约 38.4 万 km、月球至 L2 点距离约 6.4 万 km 及轨道振幅约 1.3 万 km^[22]。在考虑地球自转后, 最大星地距离可达约 48 万 km^[23]。因此, 自由空间损耗和大气衰减共同成为影响该链路性能的主导因素。月面近程通信

链路: 指连接月面探测器 (着陆器、巡视器) 与环月轨道中继卫星 (如“鹊桥”星座) 之间的无线链路。其传输距离相对较近, 且信号在月球空间的真空中传输, 无大气衰减的问题。该链路距离随中继卫星轨道位置而动态变化, 近月点约 111 km, 远月点最远可达 8 万 km^[23]。其主要是挑战受到月面终端的严格受限 (发射功率低、天线增益小) 及可能的月面地形遮挡, 而非大气效应。

以地面接收设备 VAST (Very Advanced Satellite Terminal) 为例, 其天线增益 39.7 dBi, 噪声温度 150 K^[24]。月面终端如“玉兔号”采用 UHF 频段 (415 MHz, 5 dBi 天线) 进行月面器间短距离通信, X 频段 (8.4 GHz, 25 dBi 天线, 最大发射功率 2 W) 用于建立与环月轨道中继卫星的上行链路。在极端远距离条件下, 设星地链路带宽 30 MHz, 对于 S/X/Ka 频段, 中继卫星处于较远的 L2 轨道时最小信噪比 SNR 分别约为 16.92 dB、4.46 dB 和 -4.93 dB, 结果如图 2 所示。

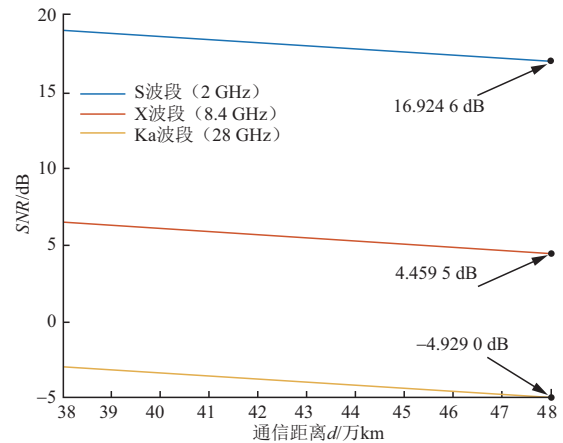


图2 星地链路不同频段下通信距离对 SNR 的影响

Fig.2 Impact of communication distance on SNR under different frequency bands of satellite-ground links

目前地月空间的卫星, “鹊桥”最高可采用正交相位调制 (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) 调制方式, 而“鹊桥二号”中继卫星最高可采用到相位调制 (8Phase Shift Keying, 8PSK) (Ka 频段)。对 M-PSK 调制 ($M \geq 4$), 误比特率 P_e 与信噪比的关系为

$$P_e = \frac{2Q}{\log_2 M} \sqrt{2 \times SNR \times \sin^2 \frac{\pi}{M}} \quad (4)$$

其中: $Q(x)$ 为 Q 函数; M 为调制阶数。

考虑数据包丢失主要是源于远距离低信噪比引起

的高比特错误率, 进而造成译码失败或帧同步丢失。在此条件下, 若未采用纠错机制, 长度为 T bit 的数据包发生任意比特错误即导致该包丢弃, 则系统丢包率 (Packet Loss Rate, PLR) 可建模为

$$PLR = 1 - (1 - P_e)^T \quad (5)$$

数据包长度 $T = 8$ bits 时, 信噪比 SNR 对 PLR 的影响如图 3 所示。不同频段在特定 SNR 条件下呈现出差异化的传输特性: S 频段 ($SNR \geq 16.92$ dB) 凭借优异的信道条件, 采用多种调制均可实现丢包率低于 0.01%, 可承担关键指令和遥测数据等高可靠性业务传输, 恶劣情况下的应急通信链路; X 频段 ($SNR \geq 4.46$ dB) 选择合适的调制方式, 在适度丢包率下支持中等速率的数据回传任务; 而 Ka 频段传播损耗较大, 但最高可采用 8PSK 调制以提升频谱效率, 适用于信道良好非实时性大数据量传输场景。

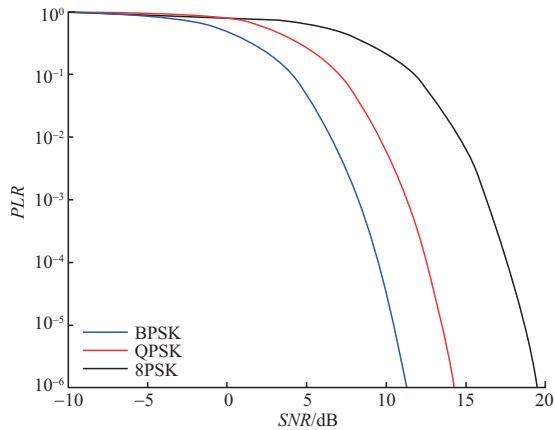


图 3 不同调制方式下 SNR 与 PLR 的关系

Fig.3 Relationship between SNR and PLR under different modulation modes

2.2 分布式 RaptorQ 编码方案

分布式 RaptorQ 编码方案主要针对中继节点 R 至信宿节点 E 这一链路的传输优化问题。基于“鹊桥”星座的地月空间多中继协同 Y 型网络如图 4 所示, 该方案采用 3 层递进式编码架构: 首先, 各信源节点 (S_1 、 S_2 等) 基于标准 RaptorQ 协议独立生成编码符号; 其次, 中继节点 R 对接收到的多源编码符号进行符号级网络编码处理, 通过符号融合实现冗余共享; 最后, 信宿节点 E 通过重构联合解码矩阵, 实现对异构数据流的统一解码。这种分层架构设计不仅继承了 RaptorQ 编码在应用层的灵活性和高效性, 通过中继节点的符号级处理, 提升了系统中继节点 R 至信宿节点 E 链路的解码鲁棒性。

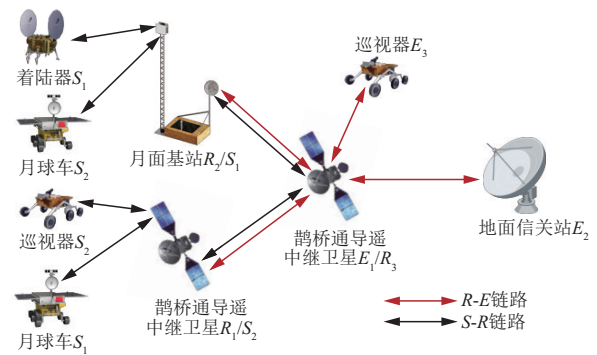


图 4 地月空间多中继协同 Y 型网络

Fig. 4 Multi-relay cooperative Y-shaped network in cislunar space

RaptorQ 是一类先进的系统喷泉码, 其优异性能源于预编码与 LT 编码相结合的二级编码架构。预编码阶段并非直接对 K 个原始数据符号传输, 而是首先将其通过一个由低密度奇偶校验 (Low-Density Parity-Check, LDPC) 码与高密度奇偶校验 (High-Density Parity-Check, HDPC) 码串联构成的复合编码器, 生成数量 L 个中间符号 ($L > K$)。LDPC 码部分提供了稀疏的线性约束, 高效地消除了符号间的局部相关性; 而 HDPC 码则增加了全局的、高密度的线性约束, 极大提升了整个编码矩阵的满秩概率。这种设计解决了 LT 码在解码初期, 当接收符号数刚达到 K 时, 生成矩阵可能因存在线性相关性而无法启动高斯消元过程, 确了解码过程能够以极高概率迅速、可靠地开始。

在生成了具备良好线性相关特性的中间符号集合后, 第二阶段 LT 编码赋予其无速率特性。该过程通过一个优化度分布函数 (如理想孤子分布或其鲁棒变体) 指导编码。对于每一个要生成的编码符号, 编码器首先根据该度分布随机选择一个度值 d , 即参与编码的中间符号数量, 然后再随机选取 d 个中间符号进行异或 (模二加) 或有限域的线性组合。这种受控随机性机制实现了近乎无限的扩展能力和强大的弹性恢复能力: 发送端可持续生成线性无关的编码符号, 接收端只需收集略多于 K 个编码符号, 即可高概率通过高斯消元恢复出全部中间符号, 进而通过预编码的逆过程还原原始数据。解码失败概率^[25]为

$$P_f(n, k) = \begin{cases} 1, & n < k \\ 0.01 \times 0.01^{n-k}, & n \geq k \end{cases} \quad (6)$$

其中: $P_f(n, k)$ 为当接收到 n 个编码包时, 源符号数为 k 的 RaptorQ 编码块的解码失败概率。

RaptorQ 码作为 Raptor 码的增强版本, 其性能有显著提升。传统 Raptor 码当 $n \geq k$ 时, Raptor 码解码失

败概率 $0.85 \times 0.567^{n-k}$, 在解码时需接收略多于原始数据量的符号才能以高概率成功解码, 存在一定的接收开销^[25]且其预编码结构相对简单, 但可能导致在极端恶劣信道下出现“误码平层”。而 RaptorQ 码通过引入更强大的预编码(串联 LDPC 和 HDPC 码)和系统化的编码构造, 实现了近乎理想的喷泉码性能, 这使其特别适合地月空间这种长时延、高丢包的通信环境, 具备更强的抗突发丢包和连续错误能力。

本节提出的分布式 RaptorQ 编码技术, 作为新型系统喷泉码的演进方案, 具备自适应不平等保护特性, 可基于数据优先级实现差异化保护机制。其核心创新体现在网络编码与喷泉码的深度协同, 具体架构如图 5 所示。

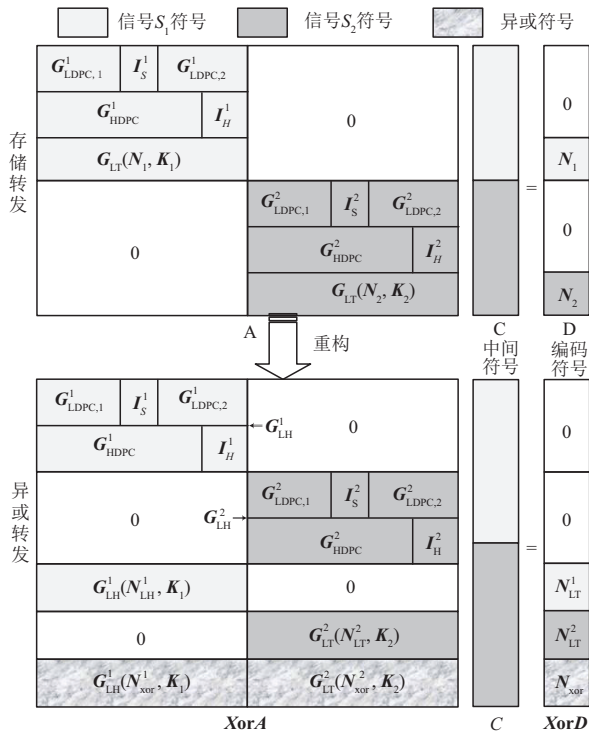


图5 分布式 RaptorQ 编解码方案

Fig.5 Distributed RaptorQ encoding and decoding scheme

在分布式网络编码流程中, 系统支持两种工作模式。在中继节点执行存储转发 (Store-and-Forward, SF) 基本模式下, 中继节点直接转发信源 S_1 和 S_2 的编码符号, 两信源独立执行 RaptorQ 编码, 其联合编码矩阵 A 呈块对角形式, 即

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & A_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中: 矩阵 A_1 为信源节点 S_1 独立的 RaptorQ 编码矩阵, 定义了从信源 S_1 的 K_1 个原始符号生成的其编

码符号的全部线性约束关系; 同理, 矩阵 A_2 为信源节点 S_2 独立编码矩阵。块对角的 $\mathbf{0}$ 矩阵则代表着两个信源的数据流在中继节点处没有任何交织与混合, 中继仅仅将数据透明转发。因此, 在接收端解码器可也必须对 A_1 和 A_2 分别进行独立的逆运算来恢复原始数据, 两者之间不存在任何冗余共享或协同增益。

在网络编码 (Network Coding, NC) 模式下, 中继节点 R 对编码符号进行符号级融合, 生成 3 类混合符号: 只包含信源 S_1 信息的 N_{LT}^1 , 只包含信源 S_2 信息的 N_{LT}^2 , 以及同时包含信源 S_1 和 S_2 信息的 N_{xor} 。接收端据此重构联合解码矩阵, 该矩阵保留了两信源预编码结构的信息, 并纳入 3 类混合符号的解码关系, 此时解码矩阵转换为

$$XorA = \begin{bmatrix} G_{LH}^1(K_1) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & G_{LH}^2(K_2) \\ G_{LT}^1(N_{LT}^1, K_1) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & G_{LT}^2(N_{LT}^2, K_2) \\ G_{LT}^1(N_{xor}^1, K_1) & G_{LT}^2(N_{xor}^2, K_2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中: $XorA$ 矩阵从上至下可分为 3 个部分, 首先是预编码约束部分, $G_{LH}^1(K_1)$ 和 $G_{LH}^2(K_2)$ 分别为信源 S_1 和 S_2 的预编码矩阵 (包含 LDPC 和 HDPC), 各自信源的原始数据添加了冗余和线性约束。第 2 部分是纯信源编码符号 $G_{LT}^1(N_{LT}^1, K_1)$ 和 $G_{LT}^2(N_{LT}^2, K_2)$ 为 LT 编码生成矩阵, 它们分别对应于中继节点接收并直接转发的、仅包含 S_1 或 S_2 信息的 N_{LT}^1 和 N_{LT}^2 个编码符号。 $G_{LT}^1(N_{xor}^1, K_1)$ 和 $G_{LT}^2(N_{xor}^2, K_2)$ 共同描述了中继节点生成的 N_{xor} 个混合符号。中继将来自 S_1 中间符号的一个随机线性组合与来自 S_2 中间符号的一个随机线性组合进行异或 (Xor) 操作, 生成了一个同时包含两信源信息的混合编码符号。

通过动态调整 3 类混合符号的比例, 即动态分配 N_{LT}^1 、 N_{LT}^2 、 N_{xor} 的数量, 可实现基于优先级的不等错误保护: 高优先级数据分配更多冗余符号, 低优先级数据可共享混合符号中的冗余信息。

通过对联合约束矩阵 $XorA$ 求逆, 并将其作用于信宿实际接收到的编码符号向量 $XorD$, 其元素值依次对应于联合矩阵 $XorA$ 每一行所代表的编码符号的值, 可求解信源中间符号, 即

$$C = (XorA)^{-1} \cdot XorD \quad (9)$$

其中: C 为一个由信源 S_1 和 S_2 的对应中间符号向量级联而成的复合向量 $[C_1, C_2]^T$ 。当接收到的编码符号数

量足够, 使得 **XorA** 满秩时, 该逆矩阵存在, 解码即可成功。因此, 原本两个独立的解码问题可转化为一个统一的线性方程组求解, 使得任一信源的缺失信息都有可能从另一个信源的冗余或混合符号中得以恢复, 从而可提升解码成功率, 尤其在信道条件恶劣、部分符号丢失的场景下优势更为明显。进一步, 通过信源 S_1 和 S_2 对应的 LT 编码矩阵还原原始符号, 最终成功解码。

该架构在 Y 型网络的优势: 支持信宿端对多源数据统一解码, 简化处理流程; 构建多源冗余共享机制, 提升数据恢复概率^[13]; 引入动态权重分配算法, 可对关键图像数据实施定向强化保护^[26]。

2.3 分块循环 RaptorQ 解码算法分析

为提高解码效率并适应动态接收条件, 设计了一种基于分块循环结构的改进解码算法 (Blockwise Cyclic RaptorQ Decoding, BCRD)。

算法核心在于将解码过程系统分为 3 个主要阶段: 上三角化、高斯消元和回代求解。算法首先基于 RFC6330 标准, 分别构造信源 S_1 和 S_2 的原始编码矩阵 A_1 和 A_2 , 进而构建融合两源编码规则及异或符号约束的联合矩阵 **XorA**。该矩阵呈现块状结构: 位于左上角的静态预编码块 (由 LDPC 和 HDPC 构成, 结构固定), 以及位于下方的动态 LT 编码块 (其行数随接收符号的数量而动态增长)。算法首先对静态块执行并行预消元处理, 将其转化为近似上三角形式, 该结果可被缓存并复用, 从而避免重复计算。在完成预消元后, 算法进入动态符号的循环消元阶段。该阶段采用“尝试-跳过-接收-回溯”策略: 若因丢包导致当前符号无法立即参与消元, 则暂存该符号并继续处理后续新到符号; 当新符号引入的约束条件打破原有线性相关时, 算法循环回溯至暂存符号重新尝试消元。当联合矩阵经消元转化为满秩或可解的上三角形式后, 算法执行回代求解, 恢复出信源 S_1 和 S_2 的联合中间符号向量, 进而可通过 LT 的编码矩阵还原原始数据符号。其算法如图 6 所示。

该算法通过分块处理可提升解码效率: 一方面将静态约束与动态接收符号进行分离, 以减少冗余计算; 另一方面采用网络编码 **Xor** 融合, 通过增广矩阵显式建模异或关系, 增强了联合解码的能力。循环迭代机制的引入进一步提高了算法在非理想接收条件下的鲁棒性, 使其能够有效应对部分符号丢失的情况。

算法 1 分块循环 RaptorQ 解码算法 (BCRD)

输入: 接收到的符号 $N_{LT}^1, N_{LT}^2, N_{xor}$

- 1) 基于 RFC6330 标准, 分别构造信源 S_1 和 S_2 的原始编码矩阵 A_1, A_2 ;
- 2) 整合 A_1 和 A_2 并引入中继异或符号的约束关系, 构建联合解码矩阵 **XorA**;
- 3) 识别并分离出联合矩阵 **XorA** 中的静态预编码子块 G_{LH}^1 和 G_{LH}^2 ;
- 4) 若预编码矩阵维度与结构相同 $G_{LH}^1 = G_{LH}^2$, 则可共享同一预消元结果; 否则需分别为 G_{LH}^1 和 G_{LH}^2 执行预消元;
- 5) 将预消元后的结果矩阵替换回 **XorA** 矩阵的对应区块;
- 6) 持续接收符号, 暂存消元结果直至对 **XorA** 执行完全的高斯消元。此过程将求解出如式 (9) 所定义的联合中间符号向量 **C**;
- 7) 根据 LT 编码矩阵, 从中间符号 **C** 中还原出两个信源的解码后的符号 **D**;
- 8) 从 **D** 中区分出信源 S_1 和 S_2 对应的原始符号。

图 6 RaptorQ 解码算法

Fig.6 Decoding algorithm for RaptorQ

3 仿真分析

3.1 仿真设置

为验证所提出的分布式 RaptorQ 编码传输方案在“鹊桥”通导遥星座系统的性能, 本研究选取 3 类典型中继-信宿传输链路进行建模 (见表 1), 涵盖“鹊桥”星座-月面 (X 频段)、“鹊桥”星座-地面 (S 频段) 及“鹊桥”星座-地面 (Ka 频段)。地月空间远距离链路, 即“鹊桥”星座与地面终端的链路, 需重点克服超远距离与大气衰耗的联合影响; 月面近程通信链路, 即月面终端与“鹊桥”星座之间的链路, 则需解决终端受限环境下可靠连接的问题。“鹊桥”星座卫星配置参考“鹊桥二号”中继星, S 频段采用 43 W 发射功率, Ka 频段采用 55 W 发射功率, 二者采用天线的直径 0.6 m, X 频段采用口径 4.2 m 的高增益伞状抛物面天线, 增益 45 dBi, 采用 20 W 发射功率^[5,18]。抛物面天线的增益计算为

$$G_{\text{dBi}} = 10 \lg \left[\eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (10)$$

其中: η 为天线效率设为 0.7; D 为天线的直径或口径; $\lambda = c/f$ 为波长, 则“鹊桥”星座 S 频段天线增益可计算得 22.6 dBi, Ka 频段 43.9 dBi。链路最高采用 8PSK 调制^[5], 最大采用 2 048 bit 定长数据包^[27], 各设备噪声系数 1.2, 重点考察星-月最大距离 8 万 km 和星-地最大距离 48 万 km 的丢包率特性^[22-23]。

表1 典型链路参数配置

Table 1 Typical link parameter configuration

参数	“鹊桥”	“鹊桥”	“鹊桥”
	星座-月面	星座-地面	星座-地面
频率 f/GHz	X 频段 7.2	S 频段 2.4	Ka 频段 28
带宽 B/MHz	20	20	100
发射功率 P_f/W	20 ^[22,28]	43 ^[5,22,28]	55 ^[5]
发射增益 G_f/dBi	45 ^[18,22]	22.6	43.9
接收增益 G_r/dBi	27	55.1 ^[17]	67.5 ^[17]
大气损耗 L_{atm}/dB	0	3	3
噪声温度 T/K	290	150	150
调制方式	BPSK	BPSK	8PSK
包长/Byte	512	1 024	2 048
最大通信距离/万 km	8	48	48

3.2 仿真结果与分析

1) 链路丢包率分析

地月空间在不同频段链路的 PLR 如图7所示。月面-“鹊桥”星座S频段链路凭借低频抗衰减特性及高增益天线配置, PLR 稳定在0.29%, 验证了其作为指令主通道的可靠性; 高频段链路衰减明显, “鹊桥”星座-月面X频段 PLR 可达28.29%, 需依赖前向纠错机制保障其可靠性; “鹊桥”星座-地面Ka频段带宽提升3倍, 受雨衰与大气衰减联合制约, PLR 高达55.86%, 成为系统的传输瓶颈。

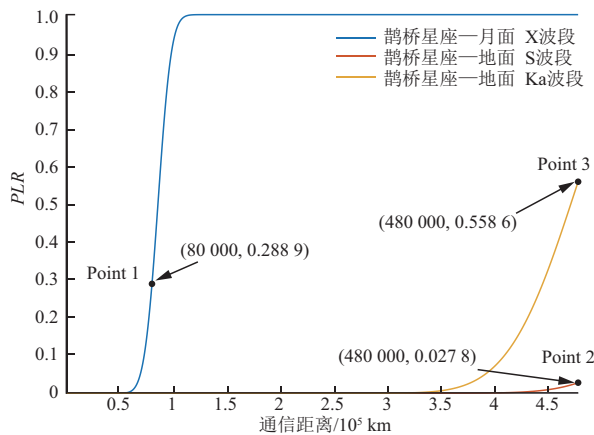


图7 不同场景下通信距离对 PLR 的影响

Fig.7 Impact of communication distance on PLR under different scenarios

基于上述结果, 可构建多频段分层传输架构: S频段优先传输指令与关键遥测数据; X/Ka频段动态用于传输大容量的科学数据, 并结合自适应编码调制如LDPC与喷泉码, 以抑制高频段损耗。

2) RaptorQ 编解码性能

在不同的中继节点丢包概率下, 各传输方案的解码失败率对比结果如图8所示。实验设定异或符号比例为 $\alpha=0.5$, 中继节点采用异或转发策略实现多源冗余共享。具体而言, 异或操作生成的编码符号同时包含信源 S_1 和 S_2 的信息, 这些符号无法通过单一信源的解码矩阵独立解码, 但通过构建联合解码矩阵可实现协同解码。实验结果表明, 基于RaptorQ的编码方案优于Raptor编码的方案。NC方案能将信源 S_1 和 S_2 的整体解码成功率提升约20%。同时本研究引入了不等保护策略, 对信源 S_1 的数据赋予更高的保护优先级。实验数据显示, 信源 S_1 符号的解码成功率显著高于信源 S_2 , 验证了方案在保障关键数据传输可靠性方面的有效性。

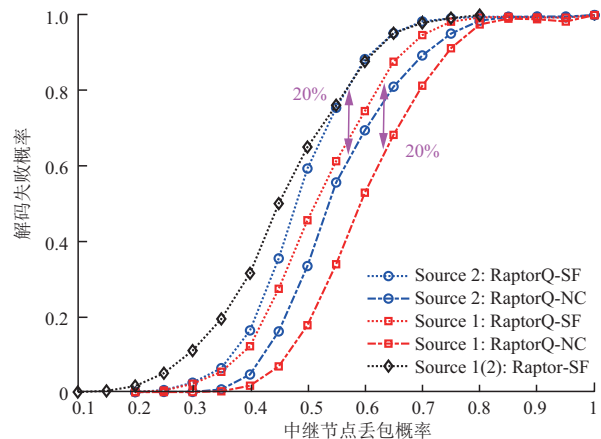


图8 不同传输方案解码失败率对比

Fig.8 Comparison of decoding failure rates for different transmission schemes

RS码具备优异的随机和突发错误纠正能力, 被广泛应用于深空通信系统, 如CCSDS遥测信道编码标准及美国国家航空航天局(National Aeronautics Space and Administration, NASA)、欧洲航天局(European Space Agency, ESA)深空任务的外码方案^[29]。本文以RS(255, 223)码为基准对比方案, RS码的编码冗余约12.55%, 为公平将DRQ的总传输符号数限制在源符号数 K 的255/223倍以内, 以保持冗余水平的一致, 结果如图9所示, RL 为重传次数上限。

仿真结果表明, 当源符号数 $K=257$ 时, 数据包长度与RS的255个符号长度接近, 因RaptorQ数据包长度需补0至离散允许值, DRQ方案在恢复图像的PSNR全面优于RS码, 可带来2 dB的编码增益, 即使RS码可进行1次重传。RaptorQ为无速率编码, 接收端在收到略多于原始符号数量的编码符号后即可实现解码, 在仅支持存储转发的中继环境下仍具优越恢复能力。

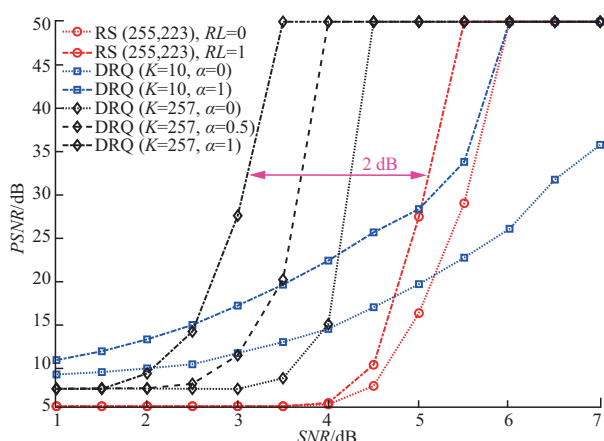


图9 RS(255,223)与DRQ编码方案的PSNR性能对比

Fig.9 PSNR performance comparison between RS(255,223) and DRQ coding schemes

当 $K=10$ 时,图像被划分为更细的源符号块,在低信噪比条件下,DRQ表现出更高的PSNR。小规模源块降低了译码门槛,接收方仅需少量编码符号即可恢复数据,从而在恶劣信道下鲁棒性显著提升。但在高信噪比条件下,数据包丢失较少,小源块编码的PSNR增长趋于平缓,性能优势减弱。

进一步提高异或符号比例 α 可提升DRQ恢复图像的PSNR。中继节点可根据信道状态动态调整 α ,与固定编码结构的RS码相比具有灵活性,这种自适应机制增强了DRQ在复杂深空信道环境的适用性,更符合未来深空任务对通信自主性与适应性的需求。

针对高斯消元(Gaussian Elimination, GE)算法存在较高的计算复杂度的挑战,本研究提出的分块循环RaptorQ解码算法通过矩阵分块与并行计算重构,有效降低了编解码操作数与计算时间,结果如图10所示。当 $K=10$ 时,BCRD解码方案较标准RFC 6330解码方案操作数减少约40%,缓解了因中继节点网络编码操作所带来的额外资源消耗,提升了在星上计算资源受限环境的工程可行性。为验证复杂度优化在实际运行的效果,进一步对比了各方案在 K 取不同值的运行时间,结果如图11所示。实验表明随着 K 值增大,各方案运行时间总体呈上升趋势。在相同数据规模下,BCRD解码方案的运行时间均优于相应的标准解码方案。

在算法复杂度方面,RaptorQ提供了两种解码方式:置信传播(Belief Propagation, BP)解码具有线性复杂度 $O(n)$,速度快但临界条件下可能不收敛;高斯消元解码复杂度为立方级 $O(n^3)$,计算消耗大但保证完全解码。实际常采用BP与GE混合策略,以权衡效率与可靠性。RS码复杂度较低 $O(n^2)$,但固定码率限制其在高丢包动态信道的适应性。

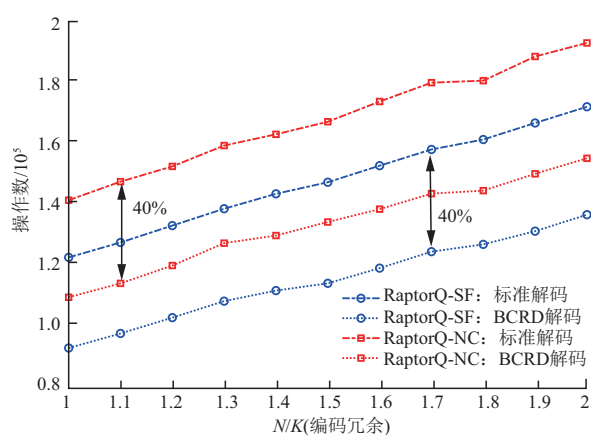
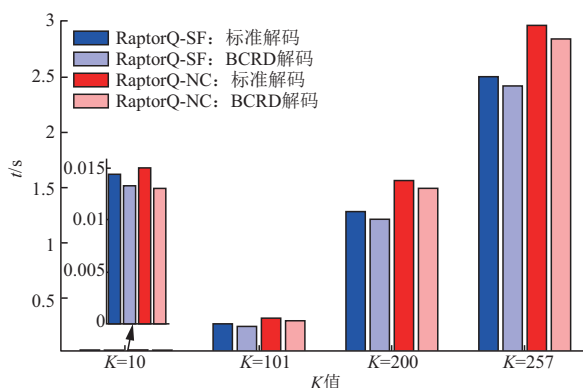
图10 不同解码方案的计算复杂度对比($K=10$)Fig.10 Comparison of computational complexity for different decoding schemes($K=10$)

图11 不同解码方案的运行时间对比

Fig.11 Comparison of running time for different decoding schemes

3) 图像传输性能

在非固定冗余机制下,RaptorQ编码的灵活性优势得到充分体现,DRQ方案也展现出更强的环境适应性,结果如图12所示。在不同信道条件下,分布

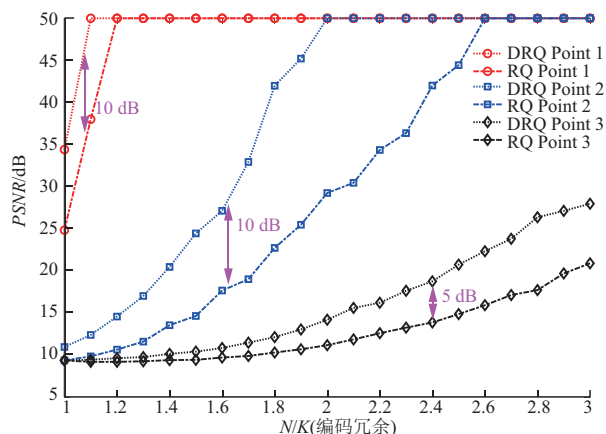


图12 各距离极限值的分布式编码PSNR性能

Fig.12 Distributed coding PSNR performance at various distance extreme points

式 RaptorQ 编码 (DRQ) 与标准 RaptorQ (RQ) 相比,显著提升了图像的传输质量。在点 1 和 2 的场景中,可实现 10 dB 以上的 PSNR 提升,即使在超高丢包点 3 条件下,依旧可带来 5 dB 以上的 PSNR 提升。

4 结 论

本文面向地月空间长距离通信动态丢包环境下,图像数据传输的可靠性问题,基于“鹊桥”星座多节点、多频段与智能协同的架构特性,提出了一种分布式中继协作传输方案。梳理并构想了一种基于“鹊桥”星座的地月多层中继通信网络架构;在此基础上,利用“鹊桥”星座的星上智能处理与多中继协作能力,设计了一种面向图像传输的分布式 RaptorQ 编码方案。该方案通过中继节点符号级网络编码与多源冗余共享,可提升系统在动态丢包地月链路的传输鲁棒性。仿真结果表明:所提分布式 RaptorQ 编码方案相较于传统 RS 编码方案可实现 2 dB 的编码增益,较存储转发策略可提升 20% 解码成功率,提高 5 dB 以上的图像 PSNR;分块循环解码算法,在维持高纠错性能的同时缩短了解码时间,可降低约 40% 计算复杂度,适用于星上处理资源受限环境。

未来研究将重点围绕以下方向展开:一是结合星间激光链路与智能路由策略,进一步提升星座系统在动态拓扑下的传输效率与稳健性;二是面向载人月球科研站任务,研究低时延语义通信与多模态数据融合传输技术;三是探索支持在轨学习与动态冗余分配的智能编码传输机制,为构建高效、自主的地月空间信息网络提供关键技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 于志坚,李海涛.月球与行星探测测控系统建设与发展[J].深空探测学报(中英文),2021,8(6):543-554.
YU Z J, LI H T. Review on development history of TT&C system of China's lunar and planetary exploration projects[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(6): 543-554.
- [2] 胡浩,王琼,黄昊,等.嫦娥六号任务总体设计与实现[J].中国科学:技术科学,2025,55(7):1194-1206.
HU H, WANG Q, HUANG H, et al. Overall design and implementation of Chang'e-6 mission[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2025, 55(7): 1194-1206.
- [3] 任筱强,吴伟仁,王洪雨,等.月球探测发展与关键技术展望[J].深空探测学报(中英文),2025,12(2):99-109.
REN X Q, WU W R, WANG H Y, et al. Prospects of the lunar exploration development and key technologies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(2): 99-109.
- [4] 周文艳,高博宇,董焜珊,等.“鹊桥”二号轨道与嫦娥六号任务匹配性设计和飞行实践[J].中国空间科学技术(中英文),2024,44(6):16-22.
ZHOU W Y, GAO B Y, DONG T S, et al. Matching design of trajectory with Chang'e-6 mission and flighting practice of Queqiao-2satellite[J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(6): 16-22.
- [5] ZHANG L H, XIONG L, SUN J, et al. System design and validation of Queqiao-2 lunar relay communication satellite[J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(5): 23-39.
- [6] 庞之浩.嫦娥六号任务及中国未来探月前景[J].科学,2024,76(4):16-22.
- [7] 黄勇,杨鹏,陈艳玲,等.地月空间探测器星间测距自主定轨[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2023,53(2):132-144.
HUANG Y, YANG P, CHEN Y L, et al. Orbit determination of a cislunar space probe using inter-satellite link data[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2023, 53: 229513.
- [8] 李炯卉,王存杰,白帆,等.月面通信导航基础设施总体架构与关键技术研究[J].中国空间科学技术(中英文),2024,44(3):30-42.
LI J H, WANG Z J, BAI F, et al. System architectures and key technologies of lunar surface communication and navigation infrastructure[J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(3): 30-42.
- [9] 张育林,刘红卫,蒋超,等.地月空间发展的若干工程与技术问题[J].宇航学报,2023,44(4):612-632.
ZHANG Y L, LIU H W, JIANG C, et al. Several engineering and technical issues in the development of cislunar space[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(4): 612-632.
- [10] PUDUCHERI S, KLIEWER J, FUJA T E. The design and performance of distributed LT codes[C]//Proceedings of 2006 IEEE International Symposium on Information Theory. Seattle, WA, USA: IEEE, 2006.
- [11] DING W, SHIKH-BAHAEI M. Partial compress-and-forward strategy for relay-assisted wireless networks using rateless coding[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(1): 1462-1466.
- [12] CHEN H, ZHANG X, XU Y L, et al. Efficient mobile video streaming via context-aware raptorq-based unequal error protection[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2020, 22(2): 459-473.
- [13] HELLGE C, GOMEZ-BARQUERO D, SCHIERL T, et al. Layer-aware forward error correction for mobile broadcast of layered media[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2011, 13(3): 551-562.
- [14] 乔梁,李承昊,王善澎,等.地月云网:跨越融合一体的地月空间网络[J].中国空间科学技术(中英文),2024,44(3):43-50.
QIAO L, LI C H, WANG S P, et al. Cislunar cloud network: the cross-domain integrated cislunar-spatial network[J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(3): 43-50.
- [15] CCSDS. Radio frequency and modulation systems-part 1: Earth stations and spacecraft: CCSDS 401.0-B-32[S]. Washington, D. C.: CCSDS, 2021.
- [16] CCSDS. Proximity-1 space link protocol-data link layer: CCSDS 211.0-B-6[S]. Washington, D. C.: CCSDS, 2020.
- [17] 吴伟仁,李海涛,李赞,等.中国深空测控网现状与展望[J].中国科学:信息科学,2020,50(1):87-108.
WU W R, LI H T, LI Z, et al. Status and prospect of China's deep space TT&C network[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2020, 50(1): 87-108.
- [18] 叶培建,孙泽洲,张熿,等.嫦娥四号探测器系统任务设计[J].中国科学:技术科学,2019,49(2):124-137.
YE P J, SUN Z Z, ZHANG H, et al. Mission design of Chang'e-4 probe system[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2019, 49(2): 124-137.
- [19] LIN Y T, YANG W, ZHANG H, et al. Return to the Moon: new perspectives on Lunar exploration[J]. Science Bulletin, 2024, 69(13): 2136-2148.
- [20] 谢浩然,詹亚锋,王晓伟,等.卫星通导一体化技术及其在探月中的应用[J].深空探测学报(中英文),2021,8(2):154-162.
XIE H R, ZHAN Y F, WANG X W, et al. Communication-navigation integration technology and its application in lunar exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(2): 154-162.
- [21] ITU-R. Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems: ITU-R P.618-14[S].

- Geneva:ITU,2023.
- [22] 张立华,熊亮,孙骥,等.嫦娥四号任务中继星“鹊桥”技术特点[J].中国科学:技术科学,2019,49(2):138-146.
ZHANG L H, XIONG L, SUN J, et al. Technical characteristics of the relay communication satellite “Queqiao” for Chang’e-4 lunar far-side exploration mission[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2019, 49(2): 138-146.
- [23] 孙泽洲,吴学英,刘适,等.地月中继链路系统设计与验证[J].中国科学:技术科学,2019,49(2):147-155.
SUN Z Z, WU X Y, LIU S, et al. Design and verification of relay communication system for lunar farside exploration[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2019, 49(2): 147-155.
- [24] The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (Release 16): Technical Report 38.821[S]. France:3GPP Organizational Partners,2023.
- [25] BOURAS C, KANAKIS N, KOKKINOS V, et al. Evaluating RaptorQ FEC over 3GPP multicast services[C]//Proceedings of International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). Limassol, Cyprus: IEEE, 2012.
- [26] BUI T D, CHAU P, SHIN J. Content-aware RaptorQ[C]//Proceedings of International Conference on Information Networking. Da Nang, Vietnam: IEEE, 2017.
- [27] 孙泽洲,张焯,吴学英,等.嫦娥四号着陆器在轨实践总结与评估[J].中国科学:技术科学,2019,49(12):1397-1407.
SUN Z Z, ZHANG H, WU X Y, et al. Flight results of Chang’e-4 lander summary and evaluation[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2019, 49(12): 1397-1407.
- [28] 徐进,张爱兵,贺一峰,等.“嫦娥4号”中继星中继通信方案研究与分析[J].深空探测学报(中英文),2018,5(6):506-514.
XU J, ZHANG A B, HE Y F, et al. Research and analysis for relay communication system of Chang’e-4 lunar relay satellite[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(6): 506-514.
- [29] 陈少伍,刘敏,王静温,等.基于帧同步的深空极低码速率数据回溯方法[J].深空探测学报(中英文),2021,8(6):608-613.
CHEN S W, LIU M, WANG J W, et al. A backtracking method based on frame synchronization for deep space super low bit rate data[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2021, 8(6): 608-613.

作者简介:

吴耀南(2002-),男,博士研究生,主要研究方向:图像传输,深空通信。

通信地址:哈尔滨工业大学(深圳)信息楼L栋(518000)

E-mail:25b352001@stu.hit.edu.cn

顾术实(1986-),男,教授,博士生导师,主要研究方向:深空通信、分布式传输、在轨计算。本文通信作者。

通信地址:哈尔滨工业大学(深圳)信息楼L栋(518000)

E-mail:gushushi@hit.edu.cn

Cislunar Relay-Coordinated Transmission Scheme Based on Queqiao Communication, Navigation, and Remote Sensing Constellation System

WU Yaonan¹, GU Shushi^{1,2}, ZHANG Qinyu^{1,2}, HE Xiongwen³, CHEN Chaoji³

(1. Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518000, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Aerospace Communication and Networking Technology, Shenzhen 518055, China; 3. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: A cislunar relay cooperative transmission scheme was proposed based on the Queqiao communication, navigation, and remote sensing satellite constellation system. To address unreliable data transmission in ultra-long-distance cislunar communication environments caused by highly dynamic channels and significant path loss, using the in-orbit information processing and multi-source data fusion capabilities of Queqiao communication, navigation and remote sensing satellite constellation system. By introducing a symbol-level forwarding strategy and a multi-source redundancy sharing mechanism, a distributed RaptorQ transmission mechanism for heterogeneous data fusion was designed, enhancing the reliability of image data transmission. By adopting a block-based cyclic decoding algorithm, the computational complexity was reduced by 40% compared to the standard Gaussian elimination decoding algorithm, while still ensuring strong error correction performance. Simulation results demonstrate that in typical cislunar space communication scenarios, compared to traditional RS coding, the proposed distributed RaptorQ scheme achieved a 2 dB coding gain under equivalent coding redundancy. Compared to conventional relay storage-and-forward schemes, this approach increased decoding success rate by 20%, thereby improving image PSNR by over 5 dB, enabling highly reliable transmission of multi-source image data in cislunar space.

Keywords: Queqiao communication, navigation, and remote sensing constellation system; cislunar relay communication; RaptorQ code; image transmission; PSNR

Highlights:

- Distributed RaptorQ coding achieves a 20% improvement in decoding success rate compared to traditional store-and-forward strategies through multi-relay symbol-level fusion and redundant sharing mechanisms. Under identical redundancy levels, it delivers higher image recovery quality than RS(255,223) codes.
- Blockwise cyclic decoding algorithm reduces computational complexity by 40% through optimized matrix partitioning and parallel processing, while maintaining equivalent error correction capability.
- The proposed scheme achieves an improvement of over 5 dB in image PSNR in lunar communication scenarios through adaptive redundancy allocation and priority protection mechanisms.

[责任编辑:杨晓燕,英文审校:宋利辉]