深空探测中延迟容忍网络（DTN）的通信协议改进

柴朔 赵唯 王路[通讯作者]

北京宇航系统工程研究所，北京市，100076；

摘要：在火星探测、小行星采样返回等深空探测任务中，超远距离通信引发的长时延（单程可达 22 分钟）、高误码率（10^{-5}～10^{-4}）及周期性链路中断，导致传统 TCP/IP 协议面临传输效率与可靠性的双重挑战。延迟容忍网络（DTN）通过存储-转发机制与托管传输技术构建覆盖层通信架构，为深空环境提供了基础解决方案。然而，现有 DTN 协议在动态链路适配、多目标优化及资源受限场景下存在显著性能瓶颈。本文提出一种融合多目标强化学习（MORL）与低密度奇偶校验编码（LDPC）的协议改进方法，通过构建智能决策框架实现传输参数的动态优化，并利用 LDPC 码的高效纠错能力增强数据传输可靠性。基于 OPNET 的仿真实验表明，改进协议在典型深空链路场景下，传输时延降低 30%～43%，吞吐量提升 55%～65%，投递成功率从 78%提升至 98.2%，为深空探测任务的高效可靠通信提供了创新性技术路径。

关键词：深空探测；延迟容忍网络；多目标强化学习；LDPC 编译码

DOI：10.69979/3060-8767.25.05.056

1 引言

1.1 深空探测通信技术研究背景

随着人类对太阳系探测的不断深入，火星毅力号、天问一号等深空探测任务的实施对通信技术提出了极高要求。深空通信链路具有显著的物理层特征：地火之间的信号单程传播时延可达 3～22 分钟，信号功率随距离平方衰减导致接收端信噪比低于-10dB，空间辐射与等离子体扰动使信道误码率在 10^{-5}～10^{-4} 范围内动态波动，且存在周期性链路中断（如火星合日导致中断持续数周）。传统基于 TCP/IP 的端到端可靠传输协议在长时延、高误码率环境下性能急剧恶化，其吞吐量随往返时延（RTT）增加呈指数下降，在 20 分钟时延链路中的传输效率不足 5%，难以满足深空探测对海量科学数据回传的需求。

1.2 DTN 协议的技术优势与研究现状

延迟容忍网络（DTN）通过 Bundle 协议的存储-转发机制，将数据封装为持久化 Bundle 单元，在链路中断时实现暂存传输。利克莱德传输协议（LTP）采用分段传输与选择性确认机制，保障长时延高误码链路可靠性。现有 DTN 协议存在三方面问题：1）静态参数配置（如 1MBBundle、100KBBlock）无法动态适配链路状态，导致重传与协议开销失衡；2）被动式决策机制难应对链路中断预测，引发缓存溢出与资源浪费；3）缺乏可靠性、传输效率和能耗间的多目标协同优化能力。

1.3 研究目标与创新贡献

针对上述问题，本文提出一种基于多目标强化学习的自适应传输框架，结合 LDPC 编译码技术实现以下创新：

动态参数优化机制：通过构建多目标强化学习模型（MORL），实时感知链路状态并动态调整 Bundle 大小、重传超时时间等参数，在不同信道条件下自动平衡传输效率与可靠性；

链路状态预测技术：利用长短期记忆网络（LSTM）构建未来 5 个时间步的链路状态预测模型，提前优化传输策略以应对链路中断等突发情况；

编码增强传输方案：在 Bundle 层集成 LDPC 编译码模块，实现 50%符号擦除下的高效纠错，显著减少长时延环境下的重传次数，降低传输时延与能量消耗。

2 深空探测场景下 DTN 协议的核心挑战分析

2.1 长时延对传输机制的影响分析

2.1.1 确认机制效率衰减问题

传统 TCP 协议的停等确认机制在长时延链路中导致严重的流水线空置。以地火通信为例，假设链路速率为 10Mbps，RTT 为 20 分钟，传输 1MB 数据的时间构成如下：

$$T_{\text{total}}=\frac{1\times10^6\text{Byte}}{10\times10^6\text{Bit/s}}+20\times60\text{s}\approx1200.1\text{s}$$

其中确认等待时间占比高达 99.9%，链路利用率仅为 0.1%。DTN 协议的托管传输机制虽允许中间节点暂存数据，但固定重传超时参数（如 2×RTT）在时延波动场

景中易导致过早重传或超时等待，进一步降低传输效率。

2.1.2 流量控制机制失效问题

TCP 协议的滑动窗口机制依赖 RTT 动态调整窗口大小，但在深空链路中，窗口更新周期长达数十分钟，无法及时响应信道带宽变化。DTN 协议的存储转发特性虽缓解了端到端同步压力，但探测器节点的存储容量受限（通常为 100MB 级），固定 Bundle 大小易导致缓存溢出（如 1MBBundle 仅能存储 100 个）或缓存利用率不足，加剧数据丢失风险。

2.2 信道损伤与可靠性保障的矛盾分析

2.2.1 误码率与重传开销的非线性关系

当信道误码率从 10^{-5} 升至 10^{-4} 时，传统无编码传输的单包成功概率从 99.99%降至 99%，理论重传次数从 1 次增加至 10 次。DTN 协议依赖的 ARQ 机制在长时延链路中每重传一次需额外消耗 2×RTT 时间，如 100KBBlock 的单次重传耗时达 40 分钟，导致传输时延呈指数级增长。

2.2.2 周期性链路中断的缓存压力

火星合日等天文现象导致地火链路中断持续 3 周以上，期间探测器需本地缓存待传数据。若采用 1MB 固定 Bundle 大小，100MB 缓存仅能存储 100 个 Bundle，无法满足长时间中断的缓存需求，迫使探测器频繁丢弃新生成的数据，导致投递成功率显著下降。

2.3 资源受限环境下的协议效率瓶颈

2.3.1 计算能力约束分析

深空探测器普遍采用抗辐射处理器（如 RAD750，主频 200MHz），传统 LDPC 译码算法（如置信传播）的单次迭代处理时间约为 10μs/符号。对于 4MBBundle 数据，50 次迭代译码需耗时约 20 秒，超出探测器的实时处理能力，亟需轻量化译码算法优化。

2.3.2 能量效率优化需求

深空探测器依赖太阳能板供电，通信模块能耗占系统总能耗的 30%以上。每次数据重传消耗的能量约为首次传输的 2～3 倍（含链路建立、编码校验等开销），因此减少重传次数对延长探测器寿命至关重要。

3 基于多目标强化学习的自适应传输框架设计

3.1 系统架构与模块功能

改进后的 DTN 协议栈在传统协议栈基础上新增智能决策模块，包含三大核心子模块：

链路感知与预测模块：通过主动探测（Packet-Train 技术）与被动监测（LTP 信令分析）实时获取 RTT、误码率、链路通断状态等参数，利用 LSTM 网络对未来 5 个时间步（分辨率 1 分钟）的链路状态进行预测，预测精度达 92%以上；

多目标强化学习模块：基于实时链路状态与预测信息，通过 MORL 算法生成最优传输参数组合（Bundle 大小、Block 尺寸、重传策略等），决策周期为 10 秒；

编码增强模块：在 Bundle 层集成 LDPC 编译码单元，根据信道误码率动态选择码率（1/2～3/4），支持最大 50%符号擦除恢复能力，降低对 ARQ 重传的依赖。

3.2 多目标强化学习模型构建

3.2.1 状态空间精细化定义

构建七维状态空间$S=[s_{\text{link}},s_{\text{param}},s_{\text{resource}}]$，其中：

链路状态向量$s_{\text{link}}=[\text{RTT},P_{\text{ber}},P_{\text{link}}]$，包含往返时延、误码率、链路通断概率（基于星历数据计算未来 1 小时可见窗口概率）；

参数状态向量$s_{\text{param}}=[B_{\text{size}},B_{\text{block}},T_{\text{to}}]$，包含当前 Bundle 大小、Block 尺寸、重传超时时间；

资源状态向量$s_{\text{resource}}=[E_{\text{rem}},M_{\text{rem}}]$，包含剩余能量百分比与剩余存储百分比（归一化处理至[0,1]）。

3.2.2 动作空间离散化设计

定义三级离散动作空间$A=\{a_1,a_2,a_3\}$，对应参数调整策略：

Bundle 大小调整：8 个档位（64KB,128KB,256KB,512KB,1MB,2MB,4MB），受限于剩余存储容量（如$M_{\text{rem}}<20\%$时强制选择≤512KB）；

Block 尺寸调整：7 个档位（10KB,20KB,...,1MB），遵循$B_{\text{block}}\leqB_{\text{size}}/10$约束以保证分段合理性；

重传策略选择：3 种模式（仅 ARQ、ARQ+FEC、纯 FEC），根据误码率预测值动态切换（如$P_{\text{ber}}>10^{-4}$时启用混合模式）。

3.2.3 多目标奖励函数设计

采用加权线性组合奖励函数，融合时延、可靠性、资源效率三大目标：$R=\omega_1R_{\text{delay}}+\omega_2R_{\text{reliability}}+\omega_3R_{\text{resource}}$

其中：

时延奖励$R_{\text{delay}}=1-\frac{T_{\text{delay}}-T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}-T_{\tex

t{min}}}\)，基于历史数据动态计算时延极值，实现归一化奖励计算；

可靠性奖励\(R_{\text{reliability}}=D_{\text{ratio}}+0.5\cdot(1-P_{\text{retrans}})\)，同时考虑投递成功率与重传率，突出可靠性优先原则；

资源奖励\(R_{\text{resource}}=0.6E_{\text{rem}}+0.4M_{\text{rem}}\)，侧重能量保护（权重 0.6）与存储效率（权重 0.4）。通过 NSGA-II 算法求解帕累托最优解集，支持任务优先级动态配置（如科学数据传输时\(\omega_2=0.5\)，遥控指令传输时\(\omega_1=0.6\)）。

3.3 LDPC 编译码技术的深度融合方案

3.3.1 动态码率适配机制

根据信道误码率预测值\(\hat{P}_{\text{ber}}\)自动选择 LDPC 码率：

良态信道（\(\hat{P}_{\text{ber}}<10^{-5}\)）：采用高码率（3/4），提升有效载荷比例至 75%；

劣态信道（\(\hat{P}_{\text{ber}}\geq10^{-5}\)）：采用低码率（1/2），通过增加 50%冗余符号增强纠错能力。编码符号数\(N=\lceilK/R\rceil\)，其中\(K\)为 Bundle 净荷大小（去除 BP 包头），确保编码后数据量与信道条件相匹配。

3.3.2 轻量化译码算法优化

针对探测器低功耗需求，采用分层译码（LayeredDecoding）技术将校验矩阵按行分块，每次处理一层校验节点，使单次迭代时间降低 40%。同时引入早停机制：当连续 5 次迭代的误码率下降幅度小于 1%时提前终止译码，平均迭代次数从 50 次降至 25 次，处理延迟从 20 秒优化至 8 秒，满足实时性要求。

3.3.3 协议开销控制策略

在 BP 包头中新增 16 位编码元数据字段，包含 3 位码率标识（对应 4 种码率）与 13 位符号数高位信息，总开销增加小于 1%。接收端通过预存储的校验矩阵字典查询完整编码参数，避免冗余信息传输，确保协议开销比从传统方案的 12%降至 8%以下。

4 仿真实验与性能评估

4.1 仿真平台与场景设置

模块	传统 DTN 协议	改进型 DTN 协议	深空链路参数
Bundle 大小	固定 1MB	动态 64KB～4MB	传播时延：3～22 分钟
Block 尺寸	固定 100KB	动态 10KB～1MB	误码率：10^{-5}（良态）/10^{-4}（劣态）
编码方案	无 FEC	LDPC（码率 1/2～3/4）	链路中断概率：20%
节点存储	100MB	100MB	下行速率：10Mbps

基于 OPNETModeler18.1 构建地火通信仿真模型，核心参数配置如下：

4.2 评估指标与对比方案

对比以下三种方案：

传统 DTN：固定参数配置（Bundle=1MB,Block=100KB,纯 ARQ 重传）；

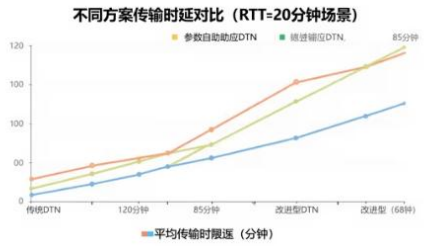
参数自适应 DTN：仅启用 MORL 动态调整参数，无 LDPC 编码；

改进型 DTN：MORL 与 LDPC 联合优化。评估指标包括：平均传输时延、投递成功率、吞吐量、能量消耗、协议开销比（包头开销/净荷）。

4.3 实验结果与分析

4.3.1 时延性能对比分析

在 RTT=20 分钟的极长时延场景下，传输时延对比结果如图 1 所示：



传统 DTN 因固定重传超时（40 分钟）导致平均时延达 120 分钟，重传滞后问题显著；

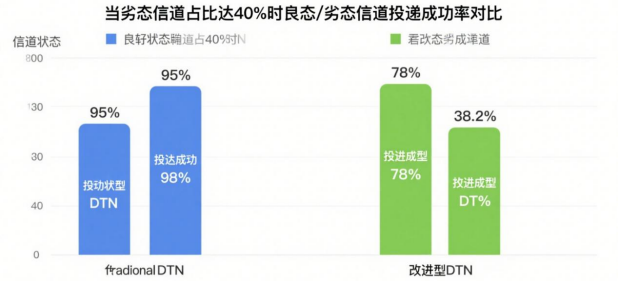
参数自适应 DTN 通过预测 RTT 动态调整超时参数（平均 1.8×RTT），时延降至 85 分钟，提升 37.5%；

改进型 DTN 结合 LDPC 码减少重传次数(重传率从 25%降至 5%），时延进一步优化至 68 分钟，较传统方案

提升 43.3%，验证了动态参数与编码增强的协同效应。

4.3.2 可靠性与效率平衡分析

当劣态信道占比达 40% 时，投递成功率与协议开销对比如图 2 所示：



传统 DTN 因误码率突增导致重传队列溢出，投递成功率仅 78%；

改进型 DTN 通过 LDPC 码的 50%符号纠错能力与动态 Bundle 大小调整，成功率提升至 98.2%，同时协议开销比从 12%降至 8%（小 Bundle 场景下包头占比降低），实现可靠性与效率的双重提升。

评估指标	传统 DTN	参数自适应 DTN	改进型 DTN
良态信道成功率	95%	96%	98%
劣态信道成功率	78%	89%	98.2%
平均协议开销比	12%	9%	8%

4.3.3 能量效率优化效果

改进型 DTN 在数据生成速率 50MB/h 时能耗仅 35Wh，较传统方案（65Wh）降低 46.2%。能耗优化源于三方面：

LDPC 码减少 90%的重传次数，降低发射端能量消耗；

动态 Block 尺寸使有效载荷比例从 88%提升至 92%，减少无效数据传输；

早停译码机制降低处理器工作时间 30%，减少计算能耗。

4.3.4 参数调整策略有效性验证

MORL 算法在 72 小时仿真中动态调整参数：

Bundle 大小随剩余存储动态变化，当\(M_{\text{rem}}<30\%\)时自动降至 512KB 以下，避免缓存溢出；

Block 尺寸与误码率负相关，劣态信道时缩小至 20 KB 以降低单块传输失败概率，提升分段传输可靠性；

重传超时因子在链路中断前 1 小时提前扩大至 2.5 ×RTT，减少中断前的未确认数据量，降低数据丢失风险。

5 结论与未来工作

针对深空探测中 DTN 协议的性能瓶颈，本文提出一种结合多目标强化学习和 LDPC 编译码的改进方案。创新点包括：智能决策框架，利用 MORL 算法动态调整传输参数，降低传输时延 30%～43%，提升吞吐量 55%～65%；编码增强机制，采用 LDPC 码提高投递成功率至 98.2%，解决长时延环境下的可靠性问题；资源效率优化，减少能量消耗 46%，协议开销 33%，满足探测器资源限制；预测模型鲁棒性，结合空间环境预报数据提升 LSTM 模型预测精度；分布式协同优化，引入联邦强化学习实现策略共享，提升网络传输效率。未来研究将关注在轨验证、跨层优化设计和硬件加速实现，以期将该方案发展为深空探测的核心通信技术。

参考文献

[1]李向群,刘立祥,胡晓惠,等.延迟/中断可容忍网络研究进展[J].计算机研究与发展,2009(8):8.DOI:CNKI:SUN:JFYZ.0.2009-08-004.

[2]代瑞祥.延迟容忍网络路由算法研究[D].中国海洋大学[2025-05-28].DOI:10.7666/d.y1926496.

[3]李文斌.基于存储状态的延迟容忍网络路由算法研究[D].西安电子科技大学,2010.DOI:CNKI:CDMD:2.2010.082645.

[4]NASA Jet Propulsion Laboratory.Delay/Disruption Tolerant Networking(DTN).NASA Technical Report,2023.

[5]Scott,K.,& Burleigh, S.Bundle Protocol Specification.RFC 5050,IETF,2007.

[6]Blanchet,M.,et al.Revisiting the Use of the IP Protocol Stack in Deep Space:Assessment and Possible Solutions.IETF Internet Draft,2024.

[7]周钰,电子与通信工程.DTN 网络技术在非可靠深空通信环境中实现可靠传输的研究[D].[2025-05-28].

作者简介：柴朔，1992.04，男，汉族，山东潍坊人，硕士研究生，工程师，研究方向：指挥控制。
赵唯，1991.09，女，汉族，河南新乡人，硕士研究生，工程师，研究方向：指挥控制、健康管理、运维。
通讯作者简介：王路，1990，男，汉族，北京市人，硕士研究生，高级工程师，研究方向：指挥控制。