重新审视无线标准中纠错与擦除纠错之间的界面

Vipindev Adat Vasudevan†、Homa Esfahanizadeh‡、Benjamin D. Kim⁺、
Laura Landon†、Alejandro Cohen*和 Muriel Médard†
†麻省理工学院（MIT），美国剑桥，电子邮箱：{vipindev, llandon9, medard}@mit.edu
‡诺基亚贝尔实验室，美国新泽西州默里山，电子邮箱：homa.esfahanizadeh@nokia-bell-labs.com⁺伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校（UIUC），美国伊利诺伊州尚佩恩，电子邮箱：bdkim4@illinois.edu
*以色列理工学院，以色列海法，电子邮箱：alecohen@technion.ac.il

arXiv:2601.01645v1 [cs.NI] 4 Jan 2026

摘要——现代5G通信系统将纠错与基于反馈的擦除纠错（混合自动重传请求/自动重传请求）结合起来作为可靠性机制，这可能导致显著的时延和资源利用低效。我们提出采用网络编码进行前向擦除纠错，作为一种时延更低的替代方案。我们对现有可靠性机制和网络编码的网络时延进行了数学特性分析。通过在网络切片环境中进行仿真，我们证明，网络编码不仅能够改善使用该切片的应用的按序交付时延和有效吞吐量，还能通过降低编码切片的资源利用率，使网络中的其他共享应用受益。我们的分析和特性分析提出了一些值得在第六代移动通信标准化进程中关注的思路。这些发现凸显了协议栈设计需要提高模块化程度，以便在未来的无线网络中集成新技术。

索引词—网络编码、前向擦除纠错、第六代移动通信标准化、超可靠低时延通信

I. 引言

第五代（第五代移动通信）无线网络标志着通信系统设计发生了根本性转变。以往各代网络主要致力于逐步提高数据速率，对底层基础设施几乎不作改动；而第五代移动通信则带来了变革性的架构升级，支持多种用例，包括海量机器类通信（海量机器类通信）[3]，超可靠低时延通信（超可靠低时延通信）[4]，以及增强型移动宽带（增强型移动宽带）[5]。然而，随着需求持续增长、新技术不断涌现，下一代无线网络预计将在第五代移动通信奠定的基础上继续发展，同时克服其局限并应对新的挑战。第六代网络（第六代移动通信）中的新兴应用，例如扩展现实（扩展现实）和虚拟现实（虚拟现实），将需要超低时延和极高可靠性 [6]–[8]。人工智能（人工智能）领域的发展将发挥核心作用，助力优化网络运行、提升效率并实现智能资源管理。此外，第六代移动通信还设想纳入非地面网络、通感一体化，以及服务提供商之间开放、协作的网络环境。向第六代移动通信演进，体现了更广泛的转变趋势：网络正变得更加智能、自适应，能够满足日益多样且动态变化的通信需求，推动多个领域的创新，并确保未来无线网络能够跟上用户和行业不断增长的需求。

IMT 2030年未来趋势与框架文件 [9]–[11] 概述了第六代移动通信的愿景和目标，强调其在满足无线通信不断演变的需求方面的作用。第六代移动通信的一个关键目标是实现超可靠低时延通信（HRLLC），为具有严格性能要求的关键应用确保无缝连接。实现这一目标需要更高效地利用共享资源，并广泛采用能够支持异构服务的虚拟网络架构。为使用相同网络基础设施满足不同用例所预期的服务质量，将分配专用虚拟网络。这种网络切片 理念在第六代移动通信时代将更加重要。然而，仅为通信提供专用虚拟路径，并不足以满足具有极低时延预算的可靠通信要求。

当前无线网络主要依赖基于反馈的可靠性机制（例如自动重传请求（ARQ）和混合自动重传请求（HARQ））来纠正分组丢失。ARQ在收到否定确认后重传整个丢失的帧，以执行擦除纠正；而HARQ则通过重传额外的冗余比特，将ARQ与纠错相结合，从而恢复错误。然而，这些机制通常难以在可靠性与服务时间之间取得平衡，尤其是在严格的时延约束下。在第五代移动通信系统中，HARQ在媒体访问控制（MAC）层运行，采用基于低密度奇偶校验（LDPC）码的增量冗余（IR）方案，并结合自适应调制编码方案（MCS）选择。通常，选择MCS以使初始传输达到10%的目标块错误率（BLER） [12]，[13]。当解码失败时，将重传额外的校验位。如果HARQ重传不足，则无线链路控制（RLC）层的上层ARQ负责通过

本文基于并扩展了我们先前工作中介绍的初步概念 [1]，[2]。本文已被*IEEE*通信领域精选期刊（*JSAC*）接收发表。© IEEE。允许个人使用此材料。其他任何用途均须获得 IEEE 的许可。

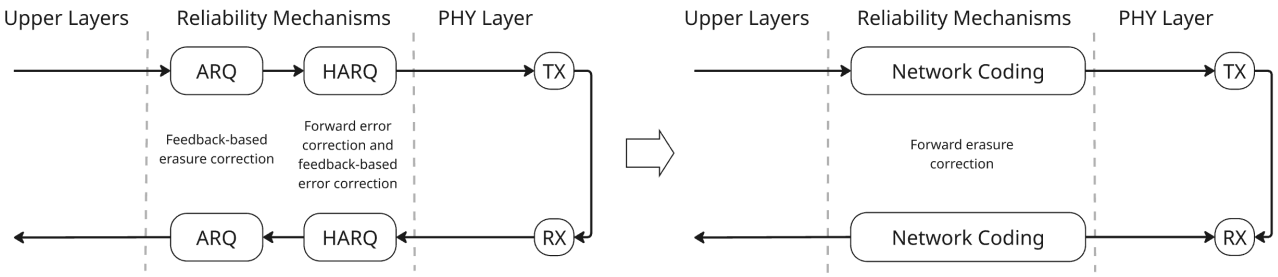

图1. 当前第五代移动通信协议栈中，MAC层的混合自动重传请求和RLC层的自动重传请求基于反馈进行纠错。采用前向擦除纠错（FEC）方案（例如网络编码）可以降低时延。用FEC方案取代多层、基于反馈的纠错机制，可以显著降低未来无线系统中的时延。

重传整个数据包。尽管HARQ引入了有限的前向纠错，仍有约10%的数据包需要重传，从而引入往返时延（RTT），降低时延性能。此外，当规定次数的HARQ传输均失败时，上层ARQ传输将启动，并直接丢弃整个传输块。因此，当前基于反馈和纠错的多层可靠性机制不仅引入了冗余，还带来了反馈引起的时延。除首次HARQ传输中正确接收且提供前向纠错的数据包外，每个传输块都会产生一次RTT时延，从而损害超可靠低时延通信（URLLC）用例的时延和可靠性目标。图1 凸显了这一低效性，并促使我们提出一种前向擦除纠错（FEC）方案：该方案无需依赖反馈驱动的重传即可减少时延并简化可靠性机制。具体而言，我们采用随机线性网络编码（RLNC），这是一种属于更广泛擦除纠正技术范畴的方法，通过预先传输额外的编码数据包来补偿丢失。这使协议能够主动应对丢失，而不是采用当前的被动响应机制。此外，RLNC方案无需逐数据包反馈，并支持块确认。在预先配置的FEC数据包不足以补偿丢失的极端情况下，该新方案还允许根据块确认传输额外的编码数据包。

前向纠错编码方案，例如基于网络编码的方法 [14]–[18]，，正被探索为解决第六代移动通信及后续技术中可靠性、时延与吞吐量之间权衡的有前景方案。随着第六代移动通信技术标准化工作的推进，采用前几代标准中未涵盖的先进前向纠错技术也被视为一种选择 [19], [20]。特别是，5G-Advanced 和第六代移动通信网络为非标准增强方案打开了大门，尤其是在专网部署中，因为其中的性能优化可以更加灵活地进行定制。近期与网络编码相关的研究表明，利用毫米波通信实现超可靠低时延通信具有巨大潜力 [21]，并且相较于基于自动重传请求的修复机制，能够实现显著的性能提升 [1], [22]。在网络切片环境中，网络编码能够支持定制化的可靠性策略，使其与应用特定需求高度契合。同样，文献 [2]，讨论了编码方案的潜在标准化机会以及将其集成到5G协议栈中的方式，进一步支持了这些方案对于下一代网络设计的重要性。

我们在 [1], [2] 的工作基础上进行了扩展，以应对预期的第六代移动通信用例，并展示了基于网络编码的擦除纠正机制优于当前标准所定义的多层可靠性机制。具体而言，我们展示了在协议栈较高层实现网络编码如何降低服务时间，并有助于满足高可靠低时延通信的严格要求；与之相对的是第五代移动通信中使用的、基于反馈的混合自动重传请求和自动重传请求机制。我们详细阐述了所提方法及当前标准的理论特性分析，并在仿真环境中对其进行了评估。我们展示了网络编码实现在实际网络中的各种影响，证明其能够在共享基础设施上以高可靠性和低时延支持多种应用。特别是，我们表明，在地面网络的实际场景中，数据包的按序交付时延可减半，同时保持相当的吞吐量。我们还将分析扩展到往返时间更长、误差概率更高的场景，这些场景具有非地面网络的代表性。在这些场景中，网络编码仍能在降低时延和提升吞吐量方面带来性能增益。这些发现也有力地说明，应将网络编码等先进技术纳入未来的6G标准。更广泛而言，我们的结果凸显了制定标准时纳入非标准化技术的灵活性的重要性，从而能够适应多样化的应用需求。具体而言，本研究的主要贡献如下。

- 我们提议在第五代移动通信协议栈的 RLC 和 MAC 层之上引入网络编码层，以处理擦除。
- 我们提议绕过 ARQ 和 HARQ 错误纠正，采用网络编码作为可靠性保障机制。
- 我们对 ARQ/HARQ 跨层可靠性机制进行特征分析，并将其与我们提出的基于网络编码的方法进行比较。
- 我们将 [1] 中的研究扩展为包含跨层可靠性机制，并增加更加真实的网络

环境，例如变化的往返时延、低往返时延和高往返时延，以代表不同的应用场景。

- 我们通过仿真研究，直接比较第五代移动通信基线与我们提出的方法，并展示网络编码相较于现有可靠性机制的优势。
- 我们专门探讨6G标准化工作应如何以及为何考虑采用网络编码的擦除纠正机制，以满足国际移动通信提出的要求。

本文其余部分安排如下。第III节介绍协议栈，并描述所提出的系统、协议和关键参数。第IV 节重点分析我们提出的网络编码实现和第五代移动通信基线系统的特性。随后，我们通过第V节中的仿真验证这些理论特性。我们还将在第VI 节进一步阐述这些结果，并说明它们可能对未来网络和6G标准化工作的影响，最后在第VII节总结全文。

II. 文献综述

网络协议栈的各层都已研究过可靠性机制。 [23] 和 [24]等研究分析了在 TCP 下方使用链路层前向纠错/自动重传请求时产生的权衡，发现修复信号与拥塞信号相互分离，往往会导致信道条件信息丢失。在第五代移动通信及后续系统中，研究者探索了跨层可靠性机制，以实现在无线 [25], [26]上的超可靠低时延通信，并将其应用于工业4.0和物联网应用场景 [27], [28]。其他研究则探索通过将擦除纠正引入传输层来协调这两个过程。QUIC-FEC 将前向纠错方案（异或、里德-所罗门和卷积随机线性码）与谷歌的传输协议 QUIC 集成在一起 [29]。 [22]进一步将其扩展为使用网络编码。

网络编码（NC）也被提出用于平滑突发丢包，并通过 TCP/NC [30] 等实现避免传输层的队头阻塞。TCP/NC 在 TCP 下方引入编码子层，传递自由度而非原始数据包，从而在不改变拥塞控制应用程序接口的情况下提升有损路径上的吞吐量。编码 TCP（CTCP）更进一步，会根据编码丢包和无线条件调整拥塞响应 [12]。这些系统表明，在传输层附近进行编码可以减少重传延迟和交付时延方差；然而，它们通常在传输层运行，不考虑低层的配置。我们的工作对这项研究进行了补充，考察关闭链路层可靠性机制时网络编码的影响。

在工业第五代移动通信5G新空口环境中， [31]在多个gNodeB基站（gNB基站）之间实现网络编码（NC），使用户设备（UE）无需逐链路反馈即可从擦除中恢复，具体方式是由每个gNB基站在分组数据汇聚协议（PDCP）层发送协议数据单元（PDU）的副本。在异构多跳回传场景中，自适应因果随机线性网络编码（AC-RLNC）被用作网络服务，表明由控制器驱动的编码/解码部署功能可以跨网格拓扑和业务类别进行泛化 [18]。对于增强型移动宽带（eMBB）视频， [32]讨论了在3GPP层之上或层内使用随机线性网络编码（RLNC），以在冗余与减少卡顿和加快按序交付之间进行权衡。此外，多年来在3GPP 无线接入网会议中，多次讨论将网络编码作为一种潜在方法，用于在扩展现实应用、集成接入与回传（IAB）以及作为MAC层外编码方案中实现更优性能 [33]–[35]。尽管其主要着眼于架构，但对网络编码（NC）不同插入点的探索预示了我们对MAC层网络编码（NC）的研究。

综观这些研究方向，可以发现一些共同的不足：基于反馈的混合自动重传请求／自动重传请求会带来与往返时延同量级的服务时间惩罚，在实际 BLER 下无法满足高可靠低时延通信的要求；现有网络编码集成方案也未能明确绕过蜂窝混合自动重传请求／自动重传请求，以量化切片部署中的端到端服务时间影响。我们的工作直接针对这些不足：（1）通过分析刻画自动重传请求／混合自动重传请求与网络编码的时延差异；（2）在切片仿真器中验证网络编码能够降低按序交付时延，同时减少共存切片的网络资源使用量。

III. 系统模型

我们考虑一个异构无线网络环境，该环境通过共享基础设施为多种应用提供服务。在此环境中，可以在切片网络内定义多条虚拟路径，每条路径通过不同的物理链路连接源节点和目的节点。这些路径可能具有不同的信道特性，包括物理层的往返时延（RTT）和帧错误概率。在异构第六代移动通信环境中，这些路径可能采用不同的无线接入技术，包括蜂窝网络、Wi-Fi、毫米波或卫星通信。目前的第五代移动通信协议栈标准采用跨层可靠性机制，即在MAC层使用混合自动重传请求，在RLC层使用自动重传请求，以确保可靠传输。相比之下，我们提出的架构在RLC层之上引入网络编码实现，并停用这些标准重传流程。图2展示了在分组数据汇聚协议层与RLC层之间引入虚拟网络编码层。编码分组通过具备编码感知能力的虚拟路径传输，而未编码分组则可以跳过虚拟编码层，像传统的5G系统一样通过RLC传输。这种部署方式使编码能够在端到端流上运行，而不受低层重传的干扰。该附加层无需对分组数据汇聚协议层或RLC层进行任何更改，因为它接收北向的分组数据汇聚协议服务数据单元（服务数据单元）（这些单元作为无线链路控制层下行服务数据单元传递），并在将相同结构的服务数据单元传递给RLC层之前执行网络编码。事实上，这些网络编码操作也可以视为RLC层的子层操作。RLC层或分组数据汇聚协议层均无需移除任何标准化流程，即可引入基于网络编码的可靠性机制。

对于MAC层，我们将HARQ传输次数限制为1，并在RLC层采用未确认模式（UM），以避免基于反馈的自动重传请求重传。此设置

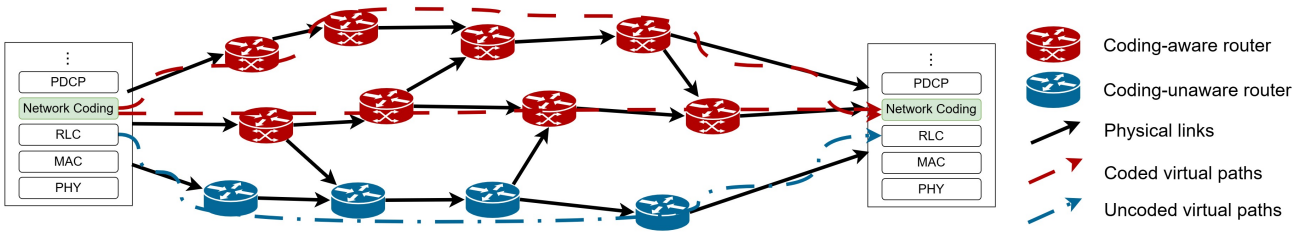

图 2. 在第五代移动通信协议栈中引入新的虚拟网络编码层。该虚拟网络编码拦截可在 RLC 层之上执行，以提供前向擦除纠错能力。经过此网络编码层的数据包将通过支持网络编码的虚拟路径发送。未编码的数据包可跳过此虚拟网络编码层，直接通过 RLC 层传输。

允许将低层帧无显著延迟地传递至虚拟网络编码层，并使用网络编码作为可靠性机制。这些架构变更需要在通信系统的两端执行。在无线接入回传场景中，具备完整协议栈能力的中间节点也可以执行网络编码（为简洁起见，本文尽量不讨论中间节点执行编码，而是重点关注端到端编码）。以往研究已探索在不同层中进行网络编码，包括WiMAX系统中的IP层 [36],毫米波测试床中的传输层 [21], 以及第五代移动通信系统中的MAC层或高层 [2]。我们的工作建立在这些研究成果之上，旨在支持切片化第六代移动通信环境中的动态且应用感知的可靠性。所提出的方法将网络编码作为可靠性机制，在对现有5G协议栈进行最小改动的情况下实现集成。

在共享网络基础设施中，不同应用有着不同的性能要求，尤其是在可靠性和时延方面。为满足这些要求，我们比较了两种可靠性机制的性能：基于自动重传请求和混合自动重传请求的最先进协议，以及我们提出的感知网络编码的协议；后者以数据包的编码组合取代重传。在当前的第五代移动通信标准中，混合自动重传请求和自动重传请求均用于应对分组丢失。混合自动重传请求在 MAC 层实现，作用于码块或码块组，并使用最多四种预定义的冗余版本及 LDPC码。根据 3GPP规范，如果数据包经过四次混合自动重传请求传输后仍未成功解码，则由 RLC层的自动重传请求机制负责恢复，并重传整个数据包。如果在混合自动重传请求层和自动重传请求层总共进行 $maxRetxThreshold$ 次传输尝试后仍未收到确认，则判定发生链路故障。

在我们提出的方法中，我们用 RLNC分组编码方案替代5G 协议中的自动重传请求和混合自动重传请求重传。在该方案中，系统会主动生成额外的修复分组（或帧），并将其与原始数据包一同传输，以补偿可能发生的擦除。共同编码为一个分组的原始数据包称为一代，原始数据包的数量称为生成大小， k_j。编码操作在伽罗瓦域中执行（对于大多数实际情况， $GF(2^8)$ 已足够），编码数据包的大小将与该代中最大数据包的大小相同。MAC或RLC层中出现错误的帧将被视为擦除，并通过基于网络编码的修复分组进行恢复，无需基于反馈的重传。为了实现这一功能，我们在协议栈中引入一个虚拟NC层，位置就在RLC层之上。无需修改高层即可将其添加到RLC层之上，高层对编码保持无感知。此前针对WiMAX协议栈的实验已成功验证了类似架构 [36]，其中插入了网络编码以增强可靠性。这一设计原则同样可以扩展到5G协议栈。

我们刻画给定切片下这些协议的性能，并分析不同的切片配置如何满足应用特定需求。切片由分配给特定应用的虚拟路径数量定义。我们首先定义获取第 j 个切片的应用的关键性能指标 $j \in \{1, \ldots, J\}$。性能指标取决于分配给该应用的资源，即 $\mathcal{P}_j$，以及该应用采用的通信方案，例如 RLNC 或 ARQ 和 HARQ。

- **（按序）交付时延：**将一个信息分组按序交付到目的地所需的时隙数，分别记为 $D(\mathcal{P}_j)$ 和 $I(\mathcal{P}_j)$。
- **有效吞吐量：**每个时隙交付的信息分组数量，记为 $G(\mathcal{P}_j)$。

为满足每个应用的不同需求，网络必须以一种使资源分配与性能目标相匹配的方式进行切片。具体而言，我们旨在确保 $E[G(\mathcal{P}_j)] \geq \boldsymbol{G}_j$ 且 $E[D(\mathcal{P}_j)] \leq \boldsymbol{D}_j$，其中 $\boldsymbol{G}_j$ 表示所需的最低有效吞吐量，而 $\boldsymbol{D}_j$表示可接受的最大交付时延，适用于 j个切片。这可确保应用的服务质量（QoS）不受影响。在第IV节中，我们提出了一个理论框架，用于评估应用在传统可靠性方法和所提出的可靠性方法下的性能。

IV. 特性分析

本节将形式化描述通信协议在特定切片条件下运行时的性能特征，包括带宽、RTT 和分组误差概率。我们提出的解决方案基于 RLNC [14], [15],[37]–[41] ，并将其与第五代移动通信协议栈中定义的 ARQ 和 HARQ 组合方案进行比较。我们考虑一个采用时隙机制的通信系统。为便于概念阐述，假设往返时间（RTT）固定，并将第 j 个切片的平均分组擦除概率记为 $\mathcal{P}_j$ 。 —

该误差概率反映了由于解码失败或底层物理信道中的传输错误而导致分组丢失的可能性。

A. 基于RLNC的通信协议

该通信方案是一种自适应RLNC方案。考虑在分配的切片上运行的 j第$\mathcal{P}_j$个 $j \in \{1,\ldots,J\}$应用。本研究采用自适应分组随机线性网络编码方法 [1], [14]。在该方法中，代定义为一系列使用随机生成的系数进行联合编码的原始数据包；代大小记为 $k_j \gg |\mathcal{P}_j|$。根据RLNC的原理，每代编码后包含 $k_j\gamma_j^1$ 个编码数据包。初始编码参数 γ_j^1 称为前向纠错速率，可通过优化网络性能来确定。一个合理的选择是使其与 $1/(1-\mathcal{P}_j)$成正比，以平衡资源使用和擦除纠错能力。较大的γ_j^1 会提高擦除纠正的可能性，但可能需要使用更多资源。发送端按顺序传输编码后的各代，从第一代开始。对于每一代，它通过 $k_j\gamma_j^1$中的链路传输$\mathcal{P}_j$个编码数据包。收到某代最后发送的编码数据包的反馈后，发送端可以确认接收端是否还需要额外的编码数据包，即缺少的自由度（记为 m_j），以解码该代。随后，发送端在下一个时隙传输 $\gamma_j^2 m_j$ 个编码数据包。编码参数 γ_j^2 称为基于反馈的速率，设置该参数时应确保接收端在第二轮传输后无法解码该代的概率几乎为零。只有在初始前向纠错数据包不足以纠正擦除时，才需要进行这些基于反馈的传输。通过选择合适的 γ_j^1，发送端可以权衡时延与有效吞吐量。

我们首先刻画随机变量 m_j。 $m_j = 0$ 的概率等于在一代的第一次试验中，失败传输次数小于或等于 $\lceil(\gamma_j^1-1)k_j\rceil$ 的概率。同样地， $m_j = m$、 $0 < m \le k_j$的概率等于在第一次试验中发生$\lceil(\gamma_j^1-1)k_j\rceil + m$ 次失败传输的概率。

引理1。 随机变量 m_j 的分布近似如下：

$$P[m_j = m] \approx \begin{cases} \sum_{f=0}^{\lceil(\gamma_j^1-1)k_j\rceil} \frac{\lambda^f e^{-\lambda}}{f!} & m = 0, \\ \frac{\lambda^{\lceil(\gamma_j^1-1)k_j\rceil+m} e^{-\lambda}}{(\lceil(\gamma_j^1-1)k_j\rceil+m)!} & m \in \{1,\ldots,k_j\}, \\ 0 & \textit{otherwise}, \end{cases} \tag{1}$$

其中

$$\lambda = k_j\gamma_j^1\overline{\mathcal{P}_j}.$$

证明。 一次试验中的失败次数可以建模为相互独立且不完全相同的伯努利随机变量之和。当擦除概率（伯努利参数）接近零时，该分布可以近似为泊松分布，其参数为伯努利随机变量参数之和 [42], ，即，

$$\lambda = \frac{k_j\gamma_j^1}{|\mathcal{P}_j|}\sum_{p_i\in\mathcal{P}_j} p_i = k_j\gamma_j^1\overline{\mathcal{P}_j}.$$

□

推论1。 *RLNC*的平均交付时延为：

$$\begin{aligned} E[D_R(\mathcal{P}_j)] \approx & \left(\frac{RTT}{2} + \left\lceil\frac{k_j\gamma_j^1}{|\mathcal{P}_j|}\right\rceil\right) P[m_j = 0] \\ & + \left(\frac{3RTT}{2} + \left\lceil\frac{k_j\gamma_j^1}{|\mathcal{P}_j|}\right\rceil + \left\lceil\frac{m_j\gamma_j^2}{|\mathcal{P}_j|}\right\rceil\right)(1 - P[m_j = 0]). \end{aligned} \tag{2}$$

证明。 数据包的交付时延取决于该数据包所属的一代需要经过多少次试验才能在接收端完成解码。因此，所提出的RLNC方案的交付时延分布为：

$$D_R(\mathcal{P}_j) \approx \begin{cases} \frac{RTT}{2} + \left\lceil\frac{k_j\gamma_j^1}{|\mathcal{P}_j|}\right\rceil, & m_j = 0, \\ \frac{3RTT}{2} + \left\lceil\frac{k_j\gamma_j^1}{|\mathcal{P}_j|}\right\rceil + \left\lceil\frac{m_j\gamma_j^2}{|\mathcal{P}_j|}\right\rceil, & m_j > 0. \end{cases}$$

因此，RLNC的平均交付时延可由式（2）[1]得到。

□

推论2。 *RLNC* 的平均有效吞吐量为：

$$\begin{aligned} E[G_R(\mathcal{P}_j)] = E\left[\frac{k_j}{k_j\gamma_j^1 + m_j\gamma_j^2}|\mathcal{P}_j|\right] = \\ \sum_{m=0}^{k_j}\frac{k_j}{k_j\gamma_j^1 + m\gamma_j^2}P[m_j = m]|\mathcal{P}_j|. \end{aligned} \tag{3}$$

B. 第五代移动通信系统中的 *ARQ/HARQ*机制

在此设置下，我们刻画当前 5G新空口系统所采用的可靠性机制，并将其作为我们的基准协议。在现行标准中，第五代移动通信中的可靠性机制基于 MAC层中的混合自动重传请求和 RLC层中的自动重传请求。在 MAC层，混合自动重传请求用于尝试恢复帧级解码失败，即传输块在物理层解调后无法被正确解码的情况。为纠正此类错误，混合自动重传请求结合 LDPC码使用增量冗余。混合自动重传请求的初始传输包含一些校验位，这些校验位能够纠正数量有限的比特错误。然而，如果校验位无法恢复原始传输块，则会在后续迭代中发送额外的低密度奇偶校验码字。在由 $maxHARQTx$ 定义的特定迭代次数之后，如果错误仍未得到纠正，则 RLC层开始重传。这将启动 MAC层中新一轮的自动重传请求重传。如果尝试总次数超过预定义的阈值 $maxRetxThreshold$，系统将声明传输失败。典型的混合自动重传请求和自动重传请求传输次数上限分别为 4 次和 8 次 [43], [44]。

[1]同样，可以确定交付时延的二阶矩和方差；为简洁起见，本文不对此进行介绍。

1) 交付时延： 为了刻画这一场景并推导理论性能分析结果，我们分别对自动重传请求和混合自动重传请求进行特性分析。随后，我们将二者结合起来表示5G系统。对于自动重传请求，其方法很简单：每当有数据包丢失被报告给RLC层（即经过 $maxHARQTx$ HARQ传输后），该数据包就会被完整且独立地重新传输。假设信道条件在重传前后保持不变，则重传成功的概率也相同。根据定义，交付时延对于第 j个应用 $D_A(\mathcal{P}_j)$的数据包而言，是指该数据包首次通过其分配的切片进行传输的时间与其成功接收的时间之差。我们假设数据包的传输时间（包括首次传输和可能的重传）相较于RTT可以忽略不计，并且在以下推导中不考虑该时间。因此，

$$D_A(\mathcal{P}_j) \in \left\{ \frac{RTT}{2}, \frac{RTT}{2} + RTT, \frac{RTT}{2} + 2RTT \dots \right\}.$$

引理 2. *ARQ* 的交付时延分布为：

$$P\left[D_A(\mathcal{P}_j) = \frac{RTT}{2} + kRTT\right] = \overline{\mathcal{P}_j}^k \left(1 - \overline{\mathcal{P}_j}\right), \quad (4)$$

当 $k \in \{0, 1, \dots\}$ 时；$\mathcal{P}_j$ 为切片的平均擦除概率。这里，$\left(\sum_{p_i \in \mathcal{P}_j} p_i\right)/|\mathcal{P}_j|$ 否则为零。

证明。 每个数据包从发送端传输到接收端都需要初始时延 $\frac{RTT}{2}$。每次额外重传都会增加一个往返时延。数据包交付时延为 $\frac{RTT}{2} + kRTT$ 的概率，等于发生 k 次失败传输（概率由 $\mathcal{P}_j^k$ 给出）且成功传输一次（概率由 $1 - \mathcal{P}_j$ 给出）的概率之积。 □

HARQ 是 SR-ARQ 的增强版本，它将重传机制与前向纠错相结合。系统会保存并合并先前的传输内容，以便在必要时从多个不完整片段中完整解码，从而提高每次重传后的接收概率。

第 j 个应用 $D_H(\mathcal{P}_j)$ 的数据包交付时延的定义及可能取值与 SR-ARQ 中的相同，

$$D_H(\mathcal{P}_j) \in \left\{ \frac{RTT}{2}, \frac{RTT}{2} + RTT, \frac{RTT}{2} + 2RTT \dots \right\}.$$

然而，概率分布必须考虑到 HARQ 机制带来的影响：每次额外重传都会降低错误概率。因此，在定义交付时延的概率分布之前，我们先对重传的有效信噪比（SNR）进行近似。采用 HARQ 传输的消息 N 次时，其有效 SNR 约为N 该消息仅传输一次时的 SNR 的倍数；给定消息的错误概率是其有效 SNR 的函数，详见 [2]。

假设单条消息的各次重传期间信噪比近似相同，我们可以利用这一近似来定义混合自动重传请求的交付时延分布。

引理 3. 对于混合自动重传请求，其交付时延分布为，其中 σ 表示线性单位下的信噪比，

$$P\left[D_H(\mathcal{P}_j) = \frac{RTT}{2} + kRTT\right] = \begin{cases} 1 - \overline{\mathcal{P}_j}(\sigma) & when\ k = 0 \\ \left(1 - \overline{\mathcal{P}_j}((k+1)\sigma)\right) \prod_{i=1}^{k} \overline{\mathcal{P}_j}(i\sigma) & when\ k > 0 \end{cases} \quad (5)$$

或者可以表示为：

$$P\left[D_H(\mathcal{P}_j) = \frac{RTT}{2} + k \cdot RTT\right] = \left(1 - \overline{\mathcal{P}_j}((k+1)\sigma)\right) \cdot \prod_{i=1}^{k} \overline{\mathcal{P}_j}(i\sigma)].$$

我们将空积定义为 $\prod_{i=1}^{0}(\cdot) = 1$，以简化 $k = 0$ 的表达式。

证明。与引理 2中一样，潜在交付时延是若干个$(k + 1/2)$往返时延的倍数。然而，由于 HARQ 中采用了 LDPC纠错，成功传输概率取决于信噪比，并随信噪比与 k 的乘积而增加，如 [2]所述。 □

现在，将混合自动重传请求和自动重传请求两种方案结合起来，我们的基线5G系统可描述如下。对于首次 $maxHARQTx$ 传输，我们严格遵循引理 3中为混合自动重传请求场景定义的分布。达到最大传输次数后，自动重传请求重传机制便会启动，并开始新一轮混合自动重传请求传输。不过，这一次信噪比会再次从 σ 开始递增。该场景可表示为：

$$P\left[D_{AH}(\mathcal{P}_j) = \frac{RTT}{2} + kRTT\right] = \left(1 - \overline{\mathcal{P}_j}((k_r+1)\sigma)\right) \cdot P(H_e)^r \cdot \prod_{i=1}^{k_r} \overline{\mathcal{P}_j}(i\sigma), \quad (6)$$

其中， $P(H_e)$表示一轮完整的混合自动重传请求传输未能成功的概率，

$$P(H_e) = \prod_{i=1}^{maxHARQTx} \overline{\mathcal{P}_j}(i\sigma),$$

r 表示在本轮之前已完成的混合自动重传请求轮次，

$$r = \lfloor k \div maxHARQTx \rfloor,$$

而 k_r 表示该轮中的混合自动重传请求传输次数，

$$k_r = k \mod maxHARQTx.$$

当 r 超过允许的 ARQ 传输最大次数（$maxRetxThreshold$）时，即定义为连接失败，在这种情况下，成功接收的概率为 0。

2) 有效吞吐量：我们将有效吞吐量定义为每个时隙传送的信息分组数量，并记为 $G_{AH}(\mathcal{P}_j)$。因此，任一时隙的有效吞吐量等于该时隙内成功传输的数据链路数量。考虑一个切片 j，其中有 $|P_j|$ 条独立链路，且每条链路的错误概率为 p_i。然而，在采用 HARQ-ARQ 组合可靠性机制时，错误概率是 σ 的函数。具体而言，我们必须区分首次 HARQ传输及其后续重传。因此，对于包含 $|P_j|$ 条独立链路、且每条链路的错误概率为 p_i 的切片 j，任一特定时隙的期望有效吞吐量可定义为：

$$E[G_{AH}(\mathcal{P}_j)] = \sum_{p_i \in \mathcal{P}_j} (1 - p_i(k_r\sigma)),$$

其中 $k_r \in [1, maxHARQTx]$。

需要注意的是，任何特定传输中的成功概率取决于 HARQ 传输/重传的次数。成功概率会随着 k_r 增加，但确切概率需要通过实验确定。鉴于基线第五代移动通信标准系统设置的复杂性，我们的目标并非求出平均交付时延或有效吞吐量的闭式解。因此，在比较中，尽管基于RLNC的方法能够为性能指标提供闭式解，我们仍依靠实时系统仿真。同样，本文按序交付时延的结果也通过仿真获得。

V. 仿真与结果

A. 仿真设置

本节将进一步阐述我们对混合切片网络的理论刻画。我们通过仿真实时网络对结果进行实证验证，同时进一步研究性能准则和切片策略。具体而言，我们通过SimPy（一种离散事件仿真器）探索了网络编码感知协议和最先进的5G协议（作为基线）的实现 [45]。SimPy擅长仿真实际网络场景，能够灵活处理异步事件、时间相关行为和自定义事件调度。通过采用基于进程的范式，SimPy使我们能够有效地仿真网络中的数据流，并复现所需的客户端-服务器事务。

为模拟非编码场景，我们采用标准的第五代移动通信协议栈，并将自动重传请求和混合自动重传请求作为可靠性机制。对于编码场景，我们考虑在RLC层之上应用网络编码，并绕过任何自动重传请求／混合自动重传请求类型的重传。我们通过实证展示了使用混合自动重传请求重传进行纠错的效果。在我们的特性分析中，我们展示了如何将混合自动重传请求数据包重传时的成功概率近似为噪声水平减半时的成功概率。

为复现 HARQ 在后续重传中擦除概率降低的效果，我们运行了 MATLAB 5G工具箱仿真。工具箱复现了通过 LDPC 码使用增量冗余的 5G HARQ 进程的纠错能力 [46]。我们进行了使用该工具箱对 HARQ 性能进行的实证分析，初始块错误率为 5% 至 20%，与目标用例的实际信道条件相符。针对固定 MCS（MCS 7 和 MCS 14），并以首次传输后达到 10% BLER 为目标的实证分析表明，每次重传都会将擦除概率减半，这与第 IV-B 节所述的理论分析相符。事实上，MCS 7 的分析表明，重传后的擦除概率高于初始概率的一半。不过，为简化 SimPy 仿真，我们假设每次重传都会将擦除概率减半。基于这一分析，我们对第五代移动通信协议栈的性能建模如下：对于给定的信道误差概率 p_i，每次 HARQ传输都会将误差概率减半。如果传输块未能成功接收，则将其作为新数据包重传（自动重传请求），并再进行四轮混合自动重传请求传输，且从 p_i 作为首次传输的误差概率重新开始。按照标准流程，最多可进行 8 轮此类 HARQ-自动重传请求重传，即最多传输 32 次，以发送特定传输块，之后确认传输失败。这种方法最贴近现有的第五代移动通信协议：MAC 层和 RLC 层通过自动重传请求和混合自动重传请求提供可靠性。我们将其与基于网络编码的方法进行比较。

对于网络编码场景，我们禁用混合自动重传请求和自动重传请求重传，但在每个数据块中加入额外的编码数据包，以补偿擦除。在我们的方法中，前向纠错码率设为 $\gamma_j^1 = \lceil 1/\mathcal{P}_j \rceil$。但是，如果初次传输所有数据包后，仍有任何数据块未能成功接收，则会通过基于反馈的重传额外发送 $2\lceil 1/\mathcal{P}_j \rceil \times m_j$ 个数据包。假设信道条件没有显著变化，这样便可确保无需进一步重传。在极端情况下，如果经过这次部分数据块重传后仍有数据包未能接收，则会报告链路故障。

在我们的实验中，我们考虑一个总共包含 $n = 20$ 条链路的网络，以及尝试为两个不同应用提供服务的两个切片（$J = 2$）。第一个切片专用于第一个应用，并从全部可用链路 $i \in \{1, \ldots, 20\}$中分配 i 条链路。第二个切片使用剩余资源为第二个应用提供服务。切片索引定义为分配给第一个切片的链路数量。为简洁起见，我们在每种场景中仅考虑一种无线接入技术，因此还假设每条链路具有相同的容量。这不会损害我们的系统模型的一般性，因为在我们的模型中，具有更大带宽的路径可以用多条路径表示。这使得分配了更多链路的切片具有更大的吞吐量。每条链路的误差概率和往返时间在各个实验中分别定义。在实际场景中，一个切片不必只为一个应用提供服务，而是可以在相同的QoS需求下为多个应用提供服务。QoS 流标识符表示流量对应于URLLC或增强型移动宽带切片。根据每个应用的QoS需求，可以使用编码切片或未编码切片。分组头可以包含诸如码率和生成大小等附加信息，以

便于执行适当的编码过程。关于系统设计视角的更多细节将在小节VI-B中介绍。

在所有实验中，每个应用发送 10,000 个数据包，结果为实验迭代 100 次的平均值。我们考虑多种场景，并将 RLNC 和 HARQ 都用作可靠性机制，以构建一个高可靠性系统，目标是成功传送 99.99% 的数据包。第一组实验复现了一个与 5G新空口场景相似的网络。对于地面网络，3GPP 标准将用户设备在 MAC层可处理的并行HARQ进程数限制为 16。因此，任何遵循当前标准的用户设备，在 MAC层的最大往返时延都可能达到 16 帧。考虑到往返时延在 16 个时隙左右，且擦除概率为 0.1，第一组实验将 HARQ 的性能与一种直接在 MAC层用网络编码取代 HARQ 的方案进行比较。本组实验将生成大小（k_j）设为 5。我们既比较往返时延和错误概率固定的情况，也考察实践中更为现实的设置：往返时延和擦除率可能并不准确。在这一现实设置中，我们对每个信道的往返时延从高斯分布中采样，并从均匀分布中采样擦除概率，采用前述固定值作为均值。

B. 结果与分析

图3 展示了基线系统和网络编码系统的平均交付时延。显然，网络编码能够显著降低按序交付时延（IOD）。此外，与基线相比，平均每数据包传输时延（PPD）也更低。可以看出，我们的方法的平均 PPD 更接近于 $RTT/2$，因为大多数数据包在首次分组传输时就已交付。这体现了我们前向纠错方案的效率。更值得注意的是，随着切片增大，网络编码的平均交付时延持续降低，而基线系统似乎无法从分配更多资源中获益。此外，图3（a）还给出了两种场景下 IOD 的标准差。显然，网络编码能够确保 IOD 更稳定，从而为性能提供更强的保障。

图4 展示了第二组实验的交付时延，其中 RTT 和擦除率均从高斯分布中抽样。在这种情况下，按序交付时延仍显著更低，但网络编码和第五代移动通信基线的平均每数据包交付时延相当，且网络编码有时会产生更高的时延。这是因为分组网络编码会对一个分组中的数据包进行整体解码；在 RTT 较低且误码率灵活变化的情况下，解码整个分组所固有的时延使其每数据包平均时延与传统编码方案相当。不过，可以通过部署支持即时解码的滑动窗口编码方案来解决这一问题。

图 5展示了这两组实验的平均有效吞吐量，其中往返时延和误码率保持不变或分别取平均值 16 个时隙和 10%。需要注意的是，两种情况下的有效吞吐量遵循相同的模式且数值相同，这与我们的理论特性分析一致；该分析表明，当链路容量相近时，有效吞吐量仅取决于平均误差概率。分组随机线性网络编码的有效吞吐量略低于基线方法，按每个时隙交付的原始数据包数量计算。不过，还应考虑到，基线系统存在额外的编码开销，这是由于用于混合自动重传请求的 LDPC 编码需要为每个原始数据包传输更多比特。如果将 LDPC 码率考虑在内，并将有效吞吐量换算为比特每秒，那么网络编码的有效吞吐量可能高于基线系统。

在第三组示例中，我们重点考察非地面网络或 Wi-Fi 连接网络等其他场景，在这些场景中，往返时延和误差概率可能更高。我们将其建模为 500 个时隙的高端到端时延以及 20% 的平均块错误率。我们再次将 RLNC 方法与当前第五代移动通信协议栈进行比较，后者分别基于自动重传请求和混合自动重传请求，采用 RLC 和 MAC 层纠错机制。在我们提出的方法中，这些较低层的纠错机制被关闭，由网络编码层完全负责纠错。图 6显示，在这些更高的往返时延下，网络编码在交付时延方面的优势仍如预期般显现；图 7 显示，与基线系统相比，网络编码方法在完成时间和有效吞吐量方面同样表现更佳。此处生成大小（k_j）为 50。尤其是完成时间结果颇为有趣，因为它展示了网络编码的前向擦除能力，确保在往返时延和擦除率更高时，在非地面网络或 Wi-Fi 等系统中，网络编码会成为纠错的自然选择。

VI. 讨论

本节详细阐述了我们的结果所揭示的关键发现，重点强调网络编码在无线网络中的优势，以及其对未来无线标准化工作的潜在影响。

A. 结果要点

下面介绍我们结果中的一些关键观察，这些观察凸显了网络编码的优势。

要点 1： 编码切片显著降低了（按序）交付时延，并确保高效的资源利用，从而提升性能。

我们的仿真表明，与未编码切片相比，网络编码方法能够降低平均 PPD 和 IOD。此外，我们的时延特征分析和仿真结果表明，在未编码场景中，应用的交付时延仅取决于可用资源的平均误差概率。因此，即使为需要超低时延的切片分配额外资源，只要平均误差概率保持不变，交付时延就不会改变。然而，采用网络编码后，交付时延

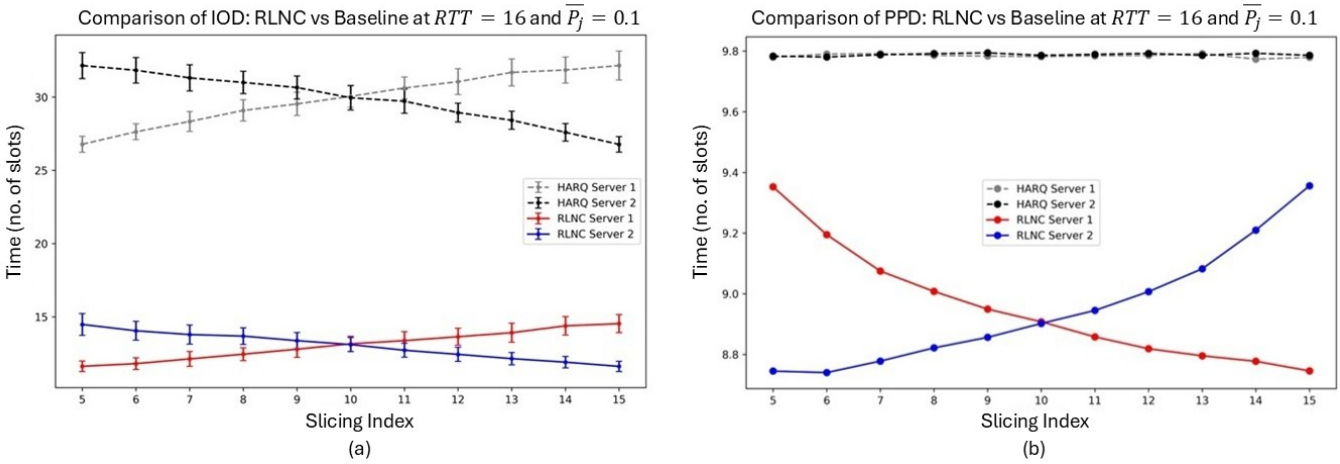

图 3. 固定参数下网络编码与第五代移动通信基线的按序交付时延（IOD）和单包交付时延（PPD）对比。

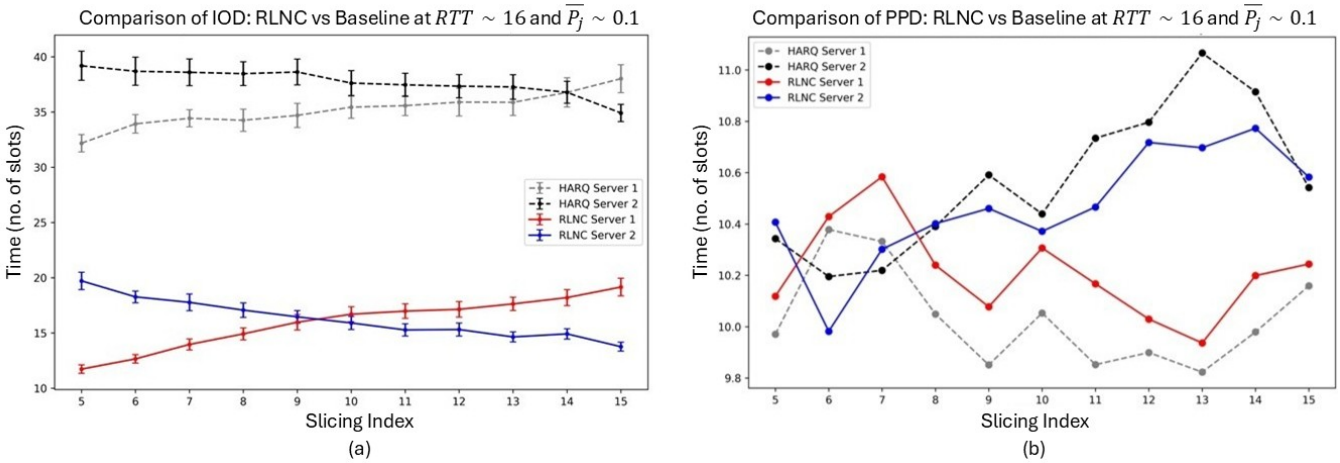

图 4. RTT 和错误概率变化时网络编码与第五代移动通信基线的 IOD 和 PPD 对比 ty.

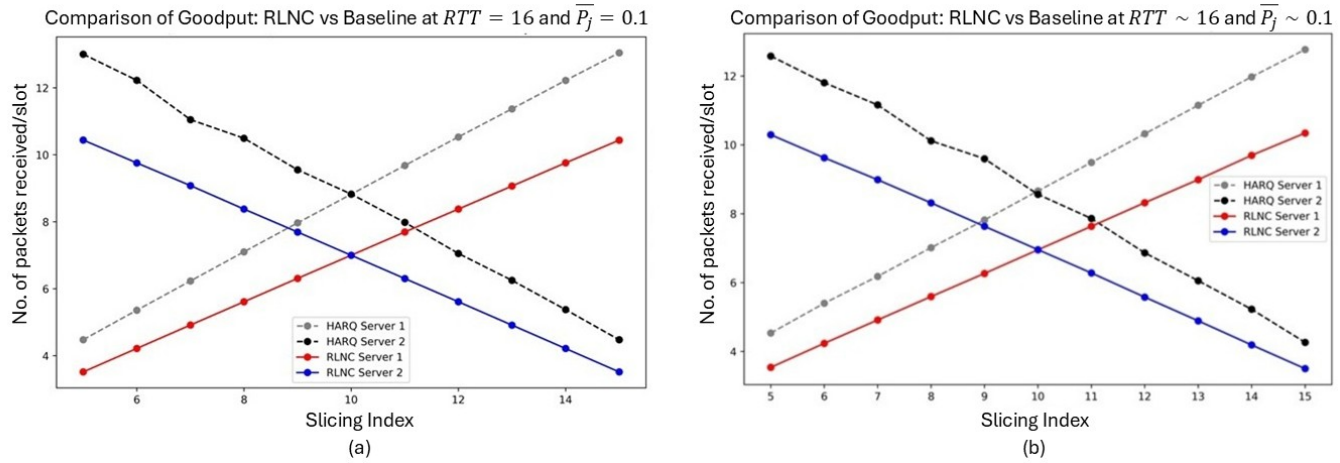

图 5. 低往返时延场景下网络编码与第五代移动通信基线的有效吞吐量评估。

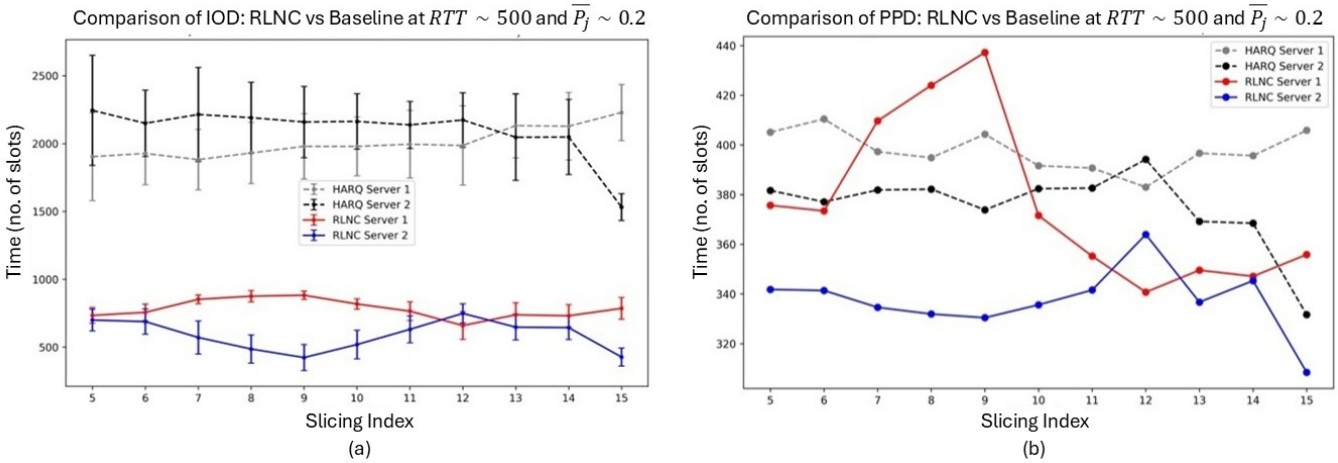

图 6. 在往返时延更长、误差概率更高的情况下，网络编码与第五代移动通信基线的 IOD 和 PPD 对比。

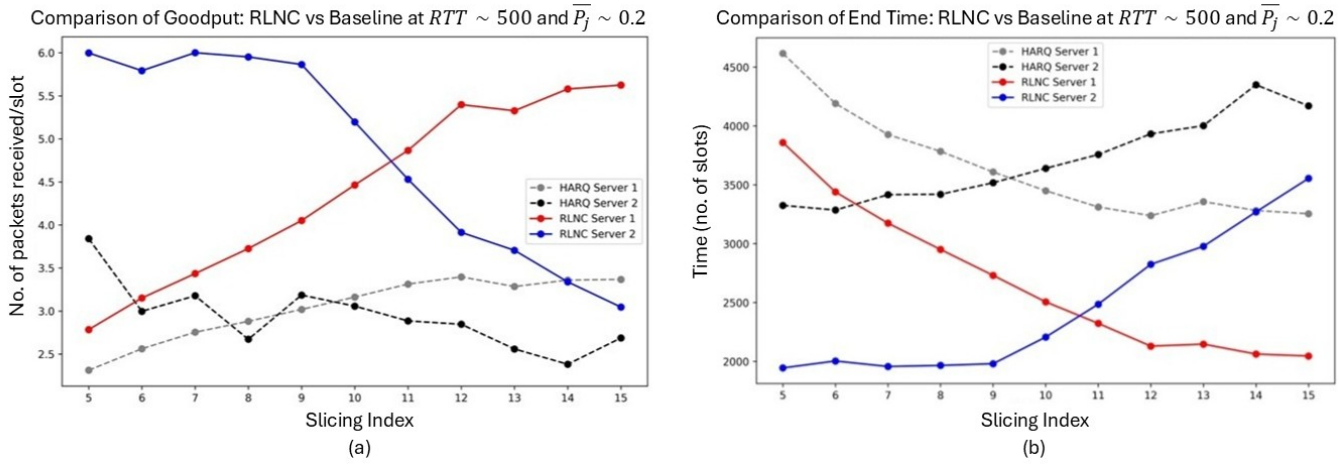

图 7. 大往返时延场景下的有效吞吐量和完成时间评估。

受可用资源影响，提供更多资源可改善时延性能。值得注意的是，性能提升并非源于资源增加或切片本身。使用相同资源时，编码切片的时延低于未编码切片，这表明性能改善来自网络编码，即使网络仅运行单个切片，这种改善仍然存在。因此，要在切片网络中实现低时延性能，使用编码切片是更有效的方法。此外，我们还提供了 IOD 的标准差，以突出编码切片的 IOD 波动显著更低，因此更适合提供性能保证。事实上，通过更精细地调整编码参数，可以从理论上计算 IOD 及其标准差，从而比传统设置更准确地提供服务级别协议。

重点 2： 编码切片能够以更少的网络资源满足超高可靠低时延要求，而未编码设置无法做到这一点。因此，在切片场景中，最好为高可靠低时延通信切片启用编码资源，并为增强型移动宽带切片分配未编码资源。

我们的分析表明，与未编码方案相比，编码切片能够以更少的网络资源满足高可靠低时延通信要求。在未编码的情况下，即使分配额外资源，交付时延仍受可用信道平均误差概率的限制。然而，网络编码能够补偿错误的影响，在满足严格的时延和可靠性要求的同时，更高效地利用资源。因此，在切片场景中，将支持编码的资源分配给高可靠低时延通信切片，有利于优化性能。与此同时，增强型移动宽带（eMBB）切片优先考虑吞吐量而非超低时延，因此能够有效利用未编码资源，从而确保不同网络服务之间的资源分配策略均衡且高效。这也意味着，在同时存在支持编码设备和不支持编码设备的网络环境中，最好将支持网络编码的设备分配给高可靠低时延通信切片，而将不支持编码的设备分配给其他应用。

重点 3： 对于往返时延较高和/或误差概率较大的网络，网络编码带来的益处更为显著；在此类场景中，完成时间和有效吞吐量也会有所改善。

在比较 16 个时隙的往返时延场景下的完成时间和有效吞吐量指标时，网络编码并未带来显著提升。这是因为在不采用编码的情况下，可以在往返时延窗口内通过重传实现可靠性，从而高效恢复丢失数据包，无需增加额外的编码开销。相比之下，网络编码会引入一定程度的冗余，在较短的往返时延场景中，这并不总能转化为性能提升（不过，可以使用例如 [16] 这样的自适应网络编码机制来解决这一问题；但本文的分析基于分组编码方法）。然而，在往返时延较长的场景中，等待反馈后再重传丢失数据包所造成的低效会更加明显。每次往返时延都会显著增加时延，拖慢完成时间并降低有效吞吐量。在这种情况下，网络编码通过主动对数据包进行编码，降低对基于反馈的重传的依赖，从而缓解这种低效。这能够缩短完成时间并提高有效吞吐量，使网络编码在高时延环境中尤具优势。

B. 系统设计视角与未来工作 *rks*

作为一种可靠性机制，基于网络编码的前向纠错方案不仅在时延和可靠性方面表现出卓越性能，而且计算开销和通信开销也很低。本小节进一步讨论了高效实现所提方法的一些实际考量，以及可能的改进方向。

从通信角度来看，网络编码数据包需要额外几个字节，用于传递生成编码系数的种子及其他信息。在我们的一个实现中，该头部为 3 字节。这种开销的影响会随平均数据包大小而变化，而平均数据包大小取决于网络编码的实现层。MAC层的传输块最大可达百万比特，而IP层的帧通常最大传输大小为 1500 字节。虽然我们不假设所有传输块大小相同，但预计网络编码头部的开销平均只占数据块大小的百分之几，因此考虑以字节计的有效吞吐量时，数据包级有效吞吐量带来的收益不会显著降低。此外，若要通过信令通知终端用户网络编码的实现情况，则需要在分组头中设置标志，或在连接建立阶段通过控制信号进行系统级指示。同样，我们预计用户设备和gNB基站会配备内存缓冲区，用于存储一代数据，直至其成功收到确认或被丢弃；在我们的案例中，该缓冲区小于 1 MB。该缓冲区取决于生成大小和往返时间，其需求与基于HARQ的可靠性机制相当。关于网络编码实现的工程方面（包括排队分析和内存限制）的详细讨论见 [47]。

与HARQ复杂的解码过程相比，网络编码操作的计算复杂度很低。编码和解码过程涉及生成大小的二阶和三阶矩阵乘法，复杂度会随生成大小增加[48]。我们的仿真中，生成大小为 50，即将 50 个数据包编码在一起，以生成额外的编码分组。关于生成大小在时延与吞吐量权衡方面的详细讨论见 [49]。每个切片都可以选择适合其目标参数的码率和生成大小。该过程还可以进一步细化到每个PDU会话，并根据QoS流指示符设定码率和生成大小。此外，编解码算法不会因码率或生成大小而改变，因此很容易适应不同的QoS需求。建议将生成大小保持在较小数值，以减少时延和抖动。另一种减少抖动的方法是采用滑动窗口网络编码。这种方法可以进一步提升性能，而基于滑动窗口的先进自适应方案 [16] 则能够改善时延和吞吐量表现。我们未来的工作将探索滑动窗口网络编码的实现。

拓展本研究的另一项重要方向，是将我们提出的方法与自适应 MCS 方案进行比较。目前，我们将所提方法与第五代移动通信系统中的固定 MCS 场景进行比较。然而，许多实际应用采用自适应 MCS 方法：当较高 MCS 值下出现数据包丢失时，便会降低 MCS 值。根据信道质量指标调整码率的自适应网络编码方法，与自适应 MCS 方案等效；我们计划将这种比较作为近期的后续工作。同样，研究者也考虑在传输层实现网络编码，以提升毫米波场景的性能，从而在毫米波应用中实现超可靠低时延通信 [21]，并提供自适应且灵活的 QUIC 实现[22]。我们的方法与这些研究互为补充，可通过比较来分析在较低层实现编码所带来的性能提升。

C. 第六代移动通信标准化提案

第六代移动通信的标准化工作刚刚启动，国际电信联盟（ITU）发布了《IMT-2030及未来框架》 [9] 和《未来技术趋势》文件 [10]。电信行业也在3GPP论坛上展开讨论，包括于2025年3月举行的首届第六代移动通信研讨会，以及在2025年6月全体会议上启动的6G无线研究项目 [50]。对于超可靠低时延通信、沉浸式扩展现实/虚拟现实应用等使用场景，ITU-R-2160强调需要采用先进技术，在提供高吞吐量的同时不损害时延或可靠性。此外，支持高效利用频谱、设备到设备通信以及海量设备连接的技术，对于构建第六代移动通信环境至关重要。网络编码在此类

场景中的应用已在文献中得到探讨 [1], [51][52]，并可能成为第六代移动通信标准化工作的重要组成部分。本节将重点介绍3GPP近期纳入网络编码概念的部分工作，以及ITU-R-2516中强调的潜在用例和应用，在这些场景中，网络编码可能发挥作用。

过去，标准化机构（如 3GPP）曾讨论过网络编码，但频率不高。最近，2023年， [35]提出了一种用于可靠单 TTI 通信的 MAC 层外编码方案。英特尔一直在牵头推动将网络编码用于集成接入与回传 [34], ，而中兴通讯则指出，网络编码有望实现扩展现实应用 [33]所需的性能要求。同样，网络编码也被讨论为一种应对毫米波系统 [53], [54]突发丢包场景的潜在技术。本文表明，与现有第五代移动通信系统相比，网络编码能够以相同甚至更少的资源满足高可靠低时延通信要求。此外，我们还表明，网络编码能够降低按序交付时延，并在不降低性能的前提下确保高效的资源利用率。当反馈不可靠或存在延迟时，网络编码的优势会更加显著，因此它非常适用于非地面网络（NTN）中的应用，而这也是第六代移动通信标准化的另一项重要考量。尽管本文未直接强调这一点，但我们的结果同样适用于采用设备到设备通信的多跳网络；在更复杂的网络中，这些优势也依然成立。标准化机构若考虑以下事项，将有助于第六代移动通信系统在部分用例中充分发挥网络编码的优势。

1) 网络编码集成的协议考量：我们的分析清楚地表明，与当前第五代移动通信的可靠性机制相比，网络编码可显著降低时延，尤其是按序交付时延。这是扩展现实/虚拟现实应用的一项关键要求，而网络编码再次证明，它是此类用例中的变革性技术。文献中的早期研究 [21], [36] 已展示了网络编码在高层中的优势，而本文则展示了它与低层可靠性机制相结合时的优势。对于网络编码的实现，我们建议在分组数据汇聚协议与无线链路控制层的交界处增设虚拟网络编码层，并通过分组头中的编码标志将其激活。如第III节所述，网络编码层可视为无线链路控制层的一个子层，并对无线链路控制层接收的服务数据单元进行处理。激活网络编码层后，MAC层中的HARQ传输减少为一次，并在无线链路控制层中采用未确认模式，以限制自动重传请求重传。采用这种方法，我们确保绕过这些层时不会产生显著时延，同时遵循现有标准。我们预计，6G标准化工作将继续纳入类似选项，以绕过低层重传。

3GPP 标准可通过按承载特性激活实现向后兼容。支持网络编码可靠性处理的用户设备可在其用户设备能力信息中声明此能力。gNB 将识别此能力，并为每个具备此能力并新加入小区的用户设备建立一个网络编码实例。不具备此能力的用户设备将使用标准混合自动重传请求/自动重传请求机制，从而使网络编码能够与同一网络中的其他可靠性机制共存。拟议的增强功能包括能力信令、编码参数选择，以及用于携带系数向量和代元数据的少量 RLC/MAC 报头扩展。这种集成可原生支持第18/19版所针对的不断演进的扩展现实、非地面网络和集成接入与回传/无线接入回传用例。

2）标准中的操作模块化：虽然我们的方法本质上是用更高层的编码取代传统可靠性机制，但MAC层帧仍会在首次HARQ传输中采用LDPC编码。此外，在当前的第五代移动通信协议栈实现中，PHY层操作（如交织）与MAC层操作也紧密耦合。这种耦合限制了在MAC层替换HARQ协议的尝试。

随着行业变得更加灵活和开放，让各层更加独立并提升操作灵活性，可以显著加快新技术的采用。事实上，标准化机构可以引领构建一种更加API驱动的电信架构，使专有编码方案能够与现有基础设施和硬件无缝协作。

3）进程并行化与在途帧数量：我们的分析还揭示了另一个重要现象，即并行进程或在途帧的数量。从第四代移动通信向第五代移动通信过渡期间，对并行HARQ进程的限制，以及由此对在途帧数量的限制，变得更加严格。第五代移动通信系统将并行HARQ进程数量限制为16，这是基于地面网络中gNB与演进型NodeB之间的通信可在16次传输内完成这一考虑。然而，这对反馈可以等待或可启用阻塞确认的场景施加了不必要的限制，例如基于网络编码的可靠性机制。网络编码的效益会随着在途帧数量的增加而扩大。另一方面，如果按发送的数据包或帧数计算的往返时间（RTT）较长，传统系统就会面临更大的按序交付延迟和完成时间。网络编码通过前向擦除纠错能力解决了这一问题，因此非常适合非地面网络应用，因为这类应用中地面设备与非地面设备之间的时延预计更大。此外，这类应用的误码率更高，因此仅依赖反馈进行纠错并不理想。

然而，5G系统并行运行的HARQ进程数上限为16，这将在途帧的数量限制为16。3GPP会议曾讨论过增加这一数量，尤其是针对NTN的情况。我们的分析表明，增加并行进程数不仅有利于应对更高的往返时延，还能最大限度地发挥网络编码等技术的优势。此外， [2] 介绍了使用网络编码时增加在途帧数量的其他技术。

4) 网络编码在特定用例中的应用：如本节前文所述，网络编码在5G新空口中的一项主要应用是在集成接入与回传（IAB）场景下讨论的，

或者更广泛地说，是在多跳通信中。在中间节点进行再编码的可能性，使网络编码成为此类场景的自然选择。文献 [55], [56]对集成接入与回传中的网络编码进行了详细研究。随着标准化机构的讨论扩展到无线接入回传（WAB）——其中一个中间节点可以凭借完整的协议栈同时充当接收端和发送端——与传统的存储转发方案相比，网络编码能够带来显著优势。这使得在这些中间节点上基于网络编码进行再编码成为可能。正如 [30] 所述，这可以在高层实现；也可以按照本文提出的方法在低层实现。

此外，在双工条件下，编码也能带来益处：中间节点可以将上行链路和下行信号一起编码，从而提高效率。因此，WAB 或多跳设备到设备通信等应用能够从网络编码实现中受益。XR 等需要双向高流量的应用将能从这一能力中显著受益。尽管为提高上行链路吞吐量而考虑采用子带全双工，网络编码也为此类用例提供了一种替代方案，可提升每个用户设备至基站的吞吐量。标准化机构若能考虑此类场景，并推动中间节点具备更强的处理与存储能力，将是理想的做法。

在扩展现实/虚拟现实用例中，网络编码方法还能发挥更大的作用。3GPP TS 23.501（第 5.37.5.2 条）[57]和 TS 38.415（第 6.5.3.9 条） [58] 定义了一个新框架，针对此类应用采用基于协议数据单元集的框架，其中一组协议数据单元会被分配一个优先级，并在服务质量处理时作为整体进行考虑。以协议数据单元集为重点的用户面协议可从网络编码中受益：可以将高优先级协议数据单元集一起编码，以确保可靠传输。不同优先级的协议数据单元集可以采用不同编码速率，以确保最佳比特率，并可使用相同的编码/解码架构进行处理。这种方法与 3GPP SA2 当前围绕扩展现实应用开展的讨论相契合。

VII. 结论

在本文中，我们在网络切片环境下对网络编码与现有第五代移动通信可靠性机制进行了比较研究。我们对自动重传请求和网络编码擦除纠错方案的有效吞吐量及交付时延进行了分析性特性分析。通过理论特性分析和基于仿真的评估，我们证明，在往返时延较高的场景中，网络编码能够显著改善按序交付时延和资源利用率，并缩短完成时间、提升有效吞吐量。我们的研究结果表明，将网络编码集成到未来的无线架构中，可以以更少的资源和更低的时延实现超可靠低时延通信（HRLLC），从而支持扩展现实、虚拟现实和非地面网络等新兴用例。

鉴于网络编码的性能优势，在正在进行的第六代移动通信标准化工作中应予以重点考虑。具体而言，我们主张采用更加模块化的协议栈，使得对一个模块的更改不会影响其他模块，从而让网络编码能够补充或取代混合自动重传请求/自动重传请求机制，尤其适用于对低时延和高可靠性有要求的切片。未来的工作可以包括在物理测试平台上进行实验验证、探索滑动窗口编码方案以进一步降低时延，以及探究第六代移动通信网络未来变化可能带来的影响。

参考文献

[1] H. Esfahanizadeh、V. A. Vasudevan、B. D. Kim、S. Siva、J. Kim、A. Cohen 和 M. Médard，“网络切片中采用编码的优势”，载于2024年IEEE国际通信会议研讨会（ICC研讨会），2024年，第1505–1510页。

[2] L. Landon、V. A. Vasudevan、J. Kim、J. Sung、J. T. Masters 和 M. Mé- dard，“提升第五代移动通信性能：缩短服务时间及研究方向”，arXiv 预印本 arXiv: 6 02788，2024年2409 G。

[3] 3GPP-TS.22.861，“海量物联网新服务和市场技术使能器可行性研究；阶段1”，第三代合作伙伴计划（3GPP），技术规范（TS）22.861，09 2016，版本14.1.0。[在-线]。可访问：https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3013

[4] 3 22 862, GPP-TS.。“关键通信新服务和市场技术使能器可行性研究；阶段1”，第三代合作伙伴计划（3GPP），技术规范（TS）22.862，10 2016，版本14.1.0。[在-线]。可访问：https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3014

[5] 3 22 863, GPP-TS.。“增强型移动宽带新服务和市场技术使能器可行性研究；阶段1”，第三代合作伙伴计划（3GPP），技术规范（TS）22.863，09 2016，版本14.1.0。[在-线]。可访问：https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3015

[6] A. Pourkabirian、M. S. Kordafshari、A. Jindal 和 M. H. Anisi，“6G超高可靠低时延通信展望：物理层技术与使能器”，IEEE通信标准杂志，第8卷，第2期，第20–27页，2024年。

[7] A. Masaracchia、D. van Huynh、T. Q. Duong、O. A. Dobre、A. Nal- lanathan 和 B. Canberk，“数字孪生在基于6G的超高可靠低时延通信中的作用：当前贡献、研究挑战与未来方向”，IEEE通信学会开放期刊，第6卷，第1202–1215页，2025年。

[8] A. A. Shamsabadi、A. Yadav、Y. Gadallah 和 H. Yanikomeroglu，“探索第六代移动通信的潜力：沉浸式、超高可靠与低时延通信”，IEEE车辆技术杂志，第20卷，第1期，第74–82页，2025年。

[9] ITU-R，“面向2030年及未来的地面国际移动通信系统未来技术趋势”，报告M.2516，2022年。

[10] ——，“面向2030年及未来的国际移动通信未来发展的框架与总体目标”，报告M.2160，2023年。

[11] R. Singh、A. Kaushik、W. Shin、M. Di Renzo、V. Sciancalepore、D. Lee、H. Sasaki、A. Shojaeifard 和 O. A. Dobre，“迈向6G演进：三项增强、三项创新与三大挑战”，IEEE网络，2025年。

[12] M. Kim、J. Cloud、A. ParandehGheibi、L. Urbina、K. Fouli、D. Leith 和 M. Médard，“网络编码TCP（CTCP）”，arXiv预印本 arXiv:1212.2291，2012年。

[13] 3GPP-TS.38.214，“数据物理层过程”，第三代合作伙伴计划（3GPP），技术规范（TS）38.214，09 2020，版本16.3.0。

[14] T. Ho、M. Médard、R. Koetter、D. R. Karger、M. Effros、J. Shi 和 B. Leong，“一种用于组播的随机线性网络编码方法”，IEEE信息论汇刊，第52卷，第10期，第4413–4430页，2006年。

[15] J. Cloud、D. Leith 和 M. Médard，“选择重传自动重传请求的编码推广”，载于2015年IEEE计算机通信会议（INFOCOM），IEEE，2015年，第2155–2163页。

[16] A. Cohen、D. Malak、V. B. Bracha 和 M. Médard，“带反馈的自适应因果网络编码”，IEEE通信汇刊，第68卷，第7期，第4325–4341页，2020年。

[17] A. Cohen、G. Thiran、V. B. Bracha 和 M. Médard，“带反馈的自适应因果网络编码用于多路径多跳通信”，IEEE通信汇刊，第69卷，785，2020年，第2期，第766页。[18] A. Cohen、H. Esfahanizadeh、B. Sousa、J. P. Vilela、M. Luis、D. Raposo、F. Michel、S. Sargento 和 M. Medard，“将网络编码引入软件定义网络：网状异构通信的架构研究”，IEEE通信杂志，第59卷，第4期，第37–43页，2021年。[19] P. Adjakple、A. Ijaz、J. Cray、A. Almradi、J. Huang 和 D. Castor，“面向6G的用户面设计方法”，IEEE无线通信，第32卷，第3期，第8–11页，2025年。[20] M. Geiselhart、F. Krieg、J. Clausius、D. Tandler 和 S. Ten Brink，“6G：统一信道编码的良机？”IEEE BITS信息论杂志，第3卷，第1期，第67–80页，2023年。[21] E. Dias、D. Raposo、H. Esfahanizadeh、A. Cohen、T. Ferreira、M. Luís、S. Sargento 和 M. Médard，“滑动窗口网络编码赋能下一代超可靠低时延通信毫米波网络”，IEEE网络通信快报，2023年。[22] F. Michel、A. Cohen、D. Malak、Q. De Coninck、M. Médard 和 O. Bonaventure，“FlEC：通过应用定制可靠性机制增强QUIC”，IEEE/ACM网络汇刊，2022年。[23] C. Barakat 和 E. Altman，“TCP与链路层前向纠错之间的带宽权衡”，计算机网络，第39卷，第2期，第133–150页，2002年。[24] A. Chockalingam、M. Zorzi 和 V. Tralli，“采用链路层前向纠错/自动重传请求的无线TCP性能”，载于1999年IEEE国际通信会议（目录号99CH36311），第2卷，IEEE，1999年，第1212–1216页。[25] A. M. Ibrahim、R. Nordin、Y. S. M. Khamayseh、A. Amphawan 和 M. B. Jasser，“面向工业5.0的6G超可靠低时延通信：架构、跨层技术与时间关键型应用分类”，2025 [ ] 2510 08080 在线。可访问：[26] https://arxiv.org/abs/。A. Karnam、J. John、K. C. Joshi、G. Exarchakos、S. H. De Groot 和 I. Niemegeers，“利用有效容量对超越5G的关键任务网络进行可靠性建模”，载于2025年IEEE无线通信与网络会议（WCNC），IEEE，2025年，第1–6页。[27] A. M. Ramly、N. F. Abdullah 和 R. Nordin，“基于5G移动网络的超可靠未来工厂跨层设计与性能分析”，IEEE Access，第9卷，第68161–68175页，2021年。[28] M. Martalò、G. Pettorru 和 L. Atzori，“下一代物联网安全与低时延通信的跨层综述”，IEEE网络与服务管理汇刊，第21卷，第4期，第4669–4685页，2024年。[29] F. Michel、Q. De Coninck 和 O. Bonaventure，“QUIC-FEC：将前向擦除纠错的优势引入QUIC”，载于2019年IFIP网络会议（IFIP网络会议），IEEE，2019年，第1–9页。[30] J. K. Sundararajan、D. Shah、M. Médard、S. Jakubczak、M. Mitzen- macher 和 J. Barros，“网络编码与TCP相遇：理论与实现”，IEEE论文集，第99卷，第3期，第490–512页，2011年。[31] S. Paris、P. Kela、D. Laselva 和 Q. Zhao，“采用网络编码满足5G新空口工业应用的可靠性需求”，载于2020年IEEE第91届车辆技术会议（VTC2020-Spring），IEEE，2020年，第1–6页。[32] D. Vukobratovic、A. Tassi、S. Delic 和 C. Khirallah，“用于5G移动视频传输的随机线性网络编码”，Information，第9卷，第4期，第72页，2018年。[33] 中兴通讯和芯百特，“关于5G Advanced网络编码的讨论（RP-212396）”，https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/TSG_RAN/ TSGR_93e/Docs/RP-212396.zip，2025年，3GPP无线接入网技术规范组第93次会议。[34] 英特尔公司、AT&T、德国电信、苹果和Saankhya Labs，“新空口网络编码研究（RP-193220）”，https://www.3gpp. org/ftp/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_86/Docs/RP-193220.zip，2019年，3GPP无线接入网技术规范组第86次会议。[35] 印度科学研究所，“用于可靠单时隙传输时间通信的简单、感知物理层的MAC层外编码方案（RP-232425）”，https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_101/Docs/RP-232425.zip，2023年，3GPP无线接入网技术规范组第101次全体会议。[36] S. Teerapittayanon、K. Fouli、M. Médard、M.-J. Montpetit、X. Shi、I. Seskar 和 A. Gosain，“网络编码作为WiMAX链路可靠性机制”，载于《多址通信》，B. Bellalta、A. Vinel、M. Jonsson、J. Barcelo、R. Maslennikov、P. Chatzimisios 和 D. Malone 编，柏林、海德堡：施普林格柏林海德堡，2012年，第1–12页。[37] M. Toemoeskoezi、F. H. Fitzek、D. E. Lucani、M. V. Pedersen 和 P. Seeling，“具备即时编码能力的随机线性网络编码点对点链路时延特性”，载于《欧洲无线通信会议2014；第20届欧洲无线通信会议》，德国电气工程师协会，2014年，第1–6页。[38] A. Schneuwly、D. Malak 和 M. Médard，“离散注水多路径数据包调度”，载于《2020年IEEE国际信息论研讨会（ISIT）》，2020年，第1658–1663页。[39] S. L. Fong、A. Khisti、B. Li、W.-T. Tan、X. Zhu 和 J. Apostolopoulos，“面向具有不同译码时延的流式消息的最优复用擦除码”，《IEEE信息论汇刊》，第66卷，第7期，第4007–4018页，2020年。[40] E. Domanovitz、A. Khisti、W.-T. Tan、X. Zhu 和 J. Apostolopoulos，“多跳中继网络上的流式擦除码”，载于《2020年IEEE国际信息论研讨会（ISIT）》。IEEE，2020年，第497–502页。[41] A. Waxman、S. Ginzach、A. Glam 和 A. Cohen，“空白空间：面向多跳网络流式通信的自适应因果编码”，载于《2025年IEEE国际信息论研讨会（ISIT）》。arXiv预印本 arXiv:2502.11984。[42] J. L. H. Jr. 和 L. L. Cam，“泊松二项分布的泊松近似”，《数学统计年刊》，第31卷，第3期，第737–740页，1960年。 [在线]。可访问：https://doi.org/10 1214 1177705799 。/aoms/ W. Ding 和 M. Shikh-Bahaei，[43] “不可靠反馈下速率自适应混合自动重传请求的优化非对称反馈检测”，载于《2021年IEEE无线通信与网络会议（WCNC）》。IEEE，2021年，第1–6页。[44] V. N. Moothedath、S. Seo、N. Petreska、B. Kloiber 和 J. Gross，“存在译码和反馈时延时5G混合自动重传请求的时延分析”，arXiv预印本 arXiv:2502.08789，2025年。[45] SimPy，“SimPy：面向Python的离散事件仿真”，技术报告。9, 2017， 2017 [ ] 技术报告，。在线。可访问：https://simpy.readthedocs.io/en/latest[46]The MathWorks, Inc.，“使用HARQ对5G新空口传输信道建模”，https://www.mathworks.com/help/5g/gs/model-5g-nr-transport-channels-with-harq.html，最后访问日期：2025-10-27。[47] M. Médard、V. A. Vasudevan、M. V. Pedersen 和 K. R. Duffy，《面向工程师的网络编码》。约翰·威立父子出版公司，2025年。[48] J. Heide、M. V. Pedersen、F. H. Fitzek 和 T. Larsen，“对网络编码的审慎看法——从理论到实践”，《通信与网络杂志》，第10卷，第4期，第403–411页，2008年。[49] D. C. Adams、J. Du、M. Médard 和 C. C. Yu，“网络编码无线系统中时延约束下的吞吐量-可靠性权衡”，载于《2014年IEEE全球通信大会》。IEEE，2014年，第1590–1595页。[50] 3rd Generation Partnership Project（3GPP），“新SID：6G无线电研究——工作项目（RP-251881）”，https://www.3gpp.org/ftp/Meetings_3GPP_Sync/RAN/Inbox/RP- 251881 .zip，2025，3GPP工作项目，第20版。[51] P. Pahlevani、M. Hundebøll、M. V. Pedersen、D. Lucani、H. Charaf、F. H. Fitzek、H. Bagheri 和 M. Katz，“ 使用网络编码的设备到设备通信新概念 ”，《 IEEE 通信杂志》，第 52 卷，第4期，第32–39页，2014年。[52] Y. Keshtkarjahromi、H. Seferoglu、R. Ansari 和 A. Khokhar，“设备到设备网络通过网络编码接入蜂窝网络”，《IEEE/ACM网络汇刊》，第26卷，第1期，第370–383页，2018年。[53] Next G联盟报告，“6G无线电技术第一部分：基础无线电技术”，https://nextgalliance.org/white_papers/6g-radio-technology-part-i-basic-radio-technologies/，2023年。[54] Y. A. Biyikoglu、V. A. Vasudevan 和 M. Médard，“突发信道上网络编码协议的建模”，载于《2025年第59届信息科学与系统年度会议（CISS）》。IEEE，2025年，第1–6页。[55] W. Mao、M. Narasimha、M. Simsek、H. Nikopour、S. Palat、N. Naderializadeh 等，“集成接入与回传（IAB）节点技术”，2024年12月31日，美国专利 12,185,163。[56] H. Nikopour 和 W. Mao，“利用线性分组网络编码提升具有拓扑冗余的下一代无线网络的可靠性和韧性”，《IEEE物联网杂志》，第6卷，第3期，第26–31页，2023年。[57] 3GPP-TS.23.501，“5G系统（5GS）的系统架构”，第三代合作伙伴计划（3GPP），技术规范（TS）23.501，2024年03月，版本18.5.0。 [在线]。可访问：https: //www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.501/23501-i50.zip [58] 3GPP-TS.38.415，“PDU会话用户面协议”，第三代合作伙伴计划（ 3 38 415，03 2024， 18 1 0 [ ] 3 GPP），技术规范（TS）。版本。。在线。可访问：https://www. gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.415/38415-i10.zip