

基于网络编码的稀疏码分多址接入 HARQ 方案

赖恪, 雷菁, 刘伟, 文磊

(国防科技大学电子科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了应对后 5G 以及未来 6G 时代对可靠性、时延以及吞吐量的严苛要求, 针对低密度奇偶校验 (LDPC) 码编码的稀疏码分多址接入 (SCMA) 技术, 提出了一种网络编码 (NC) 辅助的新型 HARQ 方案。该方案在多用户场景下, 将各用户传输过程中处于 2 个不同时间隙的错误包利用 NC 进行异或操作后重传。这样一来, 一方面, 只需要一次重传即可完成 2 个数据包的信息传输; 另一方面, 重传的数据包在接收端将会获得额外的编码增益。同时, 考虑到 LDPC 和 SCMA 译码结构的相似性, 以及 NC 译码器的单校验节点特征, 基于消息传递算法 (MPA), 设计了 SCMA、LDPC 以及 NC 的联合迭代算法。该算法使接收端能够充分利用当下以及先前传输所获取的软信息, 进而发挥 NC 所带来的编码增益。仿真结果表明, 所提方案能够获得比 SCMA 的传统 HARQ 方案更高的吞吐量以及可靠性。

关键词: 稀疏码分多址接入; 混合自动重传请求; 网络编码; 低密度奇偶校验; 吞吐量

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022174

HARQ scheme for sparse code multiple access based on network coding

LAI Ke, LEI Jing, LIU Wei, WEN Lei

College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Abstract: To fulfill the stringent reliability and throughput demand of the beyond-5G and the forthcoming 6G, a novel network coding (NC) based hybrid automatic retransmission request (HARQ) for low-density parity check (LDPC) coded SCMA was proposed. Two incorrectly received packets from different time slots were retransmitted by using NC principle under multi-user scenario. By doing so, the information came from two packets could be conveyed in one retransmission. Moreover, extra coding gain could be attained at the receiver. Furthermore, since the similarity between SCMA detector and LDPC decoder, and the one check node feature of NC decoder, a SCMA, LDPC and NC joint decoder based on message passing algorithm (MPA) was proposed. The proposed scheme could fully utilize the soft messages come from current and previous transmissions, and thus exploiting satisfied coding gain from NC. Simulation results show that the superiority of the proposed novel HARQ scheme for SCMA over the conventional HARQ on both throughput and reliability.

Keywords: sparse code multiple access, hybrid automatic retransmission request, network coding, low-density parity check, throughput

收稿日期: 2022-05-19; 修回日期: 2022-08-16

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (No.2021JJ30777); 国防科技基金资助项目 (No.3101168); 基础加强计划技术领域基金资助项目

Foundation Items: The Natural Science Foundation of Hunan Province (No.2021JJ30777), The National Defense Technology Foundation (No.3101168), Foundation Enhancement Program in Technical

0 引言

未来移动无线通信网络旨在为海量用户提供高可靠、大连接、低时延以及低功耗的通信,以实现包括智慧城市、远程医疗以及智能交通在内的各种新兴应用。因此,无线网络正朝着以海量用户设备为中心的机器类型通信(MTC, machine type communication)逐步演进^[1]。在MTC中,诸如传感器的机器类节点被部署在一定区域内来收集周围的环境数据信息,并将其回传到基站(BS, base station)端进行处理。考虑到节点的电池寿命有限及回传数据的准确性,高可靠且低信号开销的传输方式在MTC中至关重要^[2]。

在MTC中,码域非正交多址接入(CD-NOMA, code domain non-orthogonal multiple access)技术,尤其是稀疏码分多址接入(SCMA, sparse code multiple access)技术以其在过载条件下的高可靠性获得了学术界以及工业界的广泛关注^[3-4]。然而,在面对强用户间干扰以及恶劣的信道状态时,SCMA难以保证用户间的可靠通信。为了在控制传输时延的同时尽可能纠正接收端的错误信息,一种标准的解决方案是与混合自动重传请求(HARQ, hybrid automatic repeat request)相结合^[5]。HARQ通过对错误数据包的重传获得更大的分集增益,进而提升系统性能。一般而言,HARQ根据重传信息的不同生成以及冗余模式,可以大致分为HARQ-CC(HARQ with chase combining)和HARQ-IR(HARQ with incremental redundancy)两类^[6],本文的研究主要着眼于SCMA和HARQ-CC。根据上述讨论,研究SCMA与HARQ的结合对系统传输可靠性的提升具有重要的理论意义和应用前景。

尽管近年来出现了大量以提升SCMA吞吐量及错误率性能为目标的工作^[7-8],然而,在HARQ框架下针对SCMA性能提升的相关研究却十分欠缺。文献[9]针对SCMA提出了一种利用消隐传输的HARQ(HARQ with blanking)方案。该方案对接收到肯定应答信号(ACK, acknowledgement)的用户强制在下一时隙的传输中实施静默,而发生错误的用户进行重传,在获得更高吞吐量与可靠性的同时也降低了频谱效率。文献[10]将消隐传输的HARQ方案应用在功率域NOMA上,并针对吞吐量进行了理论分析。为了提升吞吐量,网络编码(NC, network coding)辅助的HARQ,即NC-HARQ已被证明是一种非常有效的方法。文献[11-12]基于

Turbo码设计了利用NC编码错误包的重传方案,该方案可以应用在HARQ-CC和HARQ-IR中,但在提升吞吐量的同时损失了一定的可靠性。文献[13]研究了在下行信道中网络-Turbo联合编码的HARQ协议,将不同用户的错误数据包在BS端网络编码后再分发到相应用户进行译码,进而提升用户的可靠性。此外,文献[14]提出了一种针对卫星物联网下行广播信道的低功耗HARQ,利用NC对未被目标用户接收到的数据进行编码,从而达到降低重传次数、提高能量效率的效果。文献[15]在点对点传输中,采用多元随机NC对HARQ中多个重复数据包的导频序列进行编码,以期降低导频的碰撞概率,提升网络整体的可靠性以及接入概率。

综上所述,现有文献对SCMA与HARQ相结合的研究较为欠缺,已有的相关文献需要静默成功传输的用户,这将在一定程度上抵消SCMA非正交传输带来的高频谱效率^[9-10]。同时,现有的NC-HARQ研究基本围绕着单用户模型或是下行信道,少有针对上行多用户场景的研究,并且未见其在NOMA中的应用。本文针对LDPC编码的上行SCMA系统,基于HARQ-CC提出了一种NC辅助的SCMA(NC-SCMA, NC aided SCMA)重传方案,并在此基础上设计了NC-SCMA的联合检测算法。仿真结果表明,对比传统的HARQ-CC与SCMA直连的方案(CC-SCMA),所提的NC-SCMA在系统吞吐量和可靠性上均有显著提升。

本文的主要贡献如下。

1) 基于HARQ-CC提出了NC辅助的SCMA重传方案,即NC-SCMA。将一定时延范围内的2个错误数据包进行网络编码,并将经过编码的包作为重传数据进行传输。在降低重传次数的同时,使系统能够获得额外的编码增益。另外,还针对整体的重传规则进行了设计,以保证系统性能。

2) 设计了SCMA-NC-LDPC的联合迭代检测算法。为使LDPC与NC联合编码的NC-SCMA在接收端实现成功译码,结合SCMA与LDPC相似的译码结构以及消息传递规则,提出了针对NC-SCMA的联合检测算法,并详细分析了该算法中相关参数对其性能的影响。

3) 仿真结果表明,本文所提NC-SCMA与相应的检测算法具有较高的实际应用价值,对比CC-SCMA,能够获得更高的吞吐量和可靠性,验证了所提方案的有效性。

1 系统模型

1.1 CC-SCMA 模型

考虑 J 个单天线用户共享 K 个资源块的上行 SCMA 系统，其中 $J > K$ ，其系统过载率可以定义为 $\lambda = \frac{J}{K}$ 。一般而言，SCMA 用户与物理资源间的关系可以用一个稀疏的签名矩阵表示^[3]

$$F_{4 \times 6} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)给出了 6 用户 4 资源的 SCMA 签名矩阵，其中的非零元素表示物理资源分配给各个用户的情况。为了方便起见，下文将用“ $K \times J$ ”的表示方法来区分具有不同签名矩阵的 SCMA。在 SCMA 中，第 j 个用户的码字可以用形如 $X_j = [X_{j,1}, \dots, X_{j,K}]^T$ 的 K 维复向量表示，其中每个码字符号 $X_{j,k} \in \mathbb{C}$, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$, $j \in \{1, 2, \dots, J\}$ ， \mathbb{C} 表示复数域， $[\cdot]^T$ 表示矩阵的转置。码字 X_j 是由预先定义好的码本 \mathcal{X}_j 中选择得到的，码本的大小满足 $|\mathcal{X}_j| = M = 2^b$ ，其中 b bit 映射成为一个 SCMA 码字。如图 1 所示，在 CC-SCMA 中，对于用户 j ，假设其瞬时输入消息为 P_j ， $P_j \in \{0, 1\}^N$ ，包含了 N bit 依次通过 LDPC 编码以及比特级交织的信息。之后，经过 SCMA 的码本映射，每一传输包将有 $L = \left\lceil \frac{N}{b} \right\rceil$ 个 SCMA 码字。需要注意的是，这里的向上取整运算主要是针对码长 N 为奇数时补零的情况。

对于接收端，在任意时刻，BS 将接收到 J 个用户的叠加信号。以一个码字为例，对于 CC-SCMA，

其在任意时刻 t 的接收信号为

$$y = \sum_{j=1}^J \text{diag}(h_j) X_j + n \quad (2)$$

其中， $y = [Y_1, \dots, Y_k]$ 表示接收向量， $h_j = [h_{j,1}, \dots, h_{j,K}]$ 表示信道状态信息， $n \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$ 表示方差为 N_0 的噪声向量。接收机采用消息传递算法 (MPA, message passing algorithm) 对 CC-SCMA 的信号进行检测。得到 SCMA 的解调信息后，进一步经过解交织以及 LDPC 译码，若最终得到的用户 j 的信息比特无法通过循环冗余码校验 (CRC, cyclic redundancy check)，BS 端将向用户发送反馈否定应答信号 (NACK, negative acknowledgement)，用户即开始执行 HARQ 重传，并将 r ($r \in \{1, 2, \dots, R\}$) 次传输的信息按照最大比合并 (MRC, maximum ratio combination) 规则进行软合并。这里需要注意，为了进一步提升系统吞吐量，在 HARQ 中也可采用免 CRC 的方法进行检错。根据文献[5,16]，免 CRC 的方法在一些特定条件下 (如长码长、低码率以及准静态信道下) 能够获得与采用 CRC 的方法相同甚至更好的性能。然而，关于免 CRC 的讨论与说明超出了本文的研究范围，因此本文仅做简单陈述。反之，用户将收到 ACK 反馈，开始执行新一轮的传输。CC-SCMA 在 HARQ 重传时，其接收信号也同样可以表示为式(2)。当达到最大传输次数 R 后，无论 BS 是否能够正确恢复出信息，HARQ 都将被终止，并开始传输新的数据包。

1.2 NC-SCMA 模型

与 CC-SCMA 在每次接收到 NACK 后即进行重传不同，NC-SCMA 采用 NC 准则将两次错误传输的信息进行异或操作后再进行重传以获得编码增益。对于 SCMA 用户 j ，假设其在 2 个传输时隙 $t_{j,\alpha}$

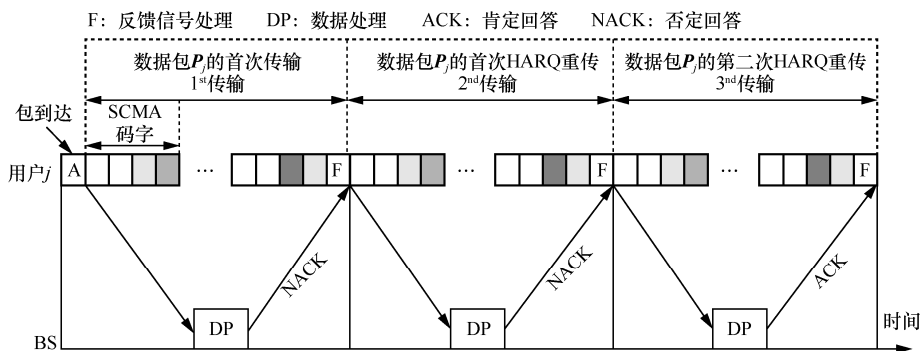


图 1 CC-SCMA 示意

与 $t_{j,\beta}$ 的传输包 $P_{j,\alpha}$ 与 $P_{j,\beta}$ 发生了错误, 那么在下一时刻的重传中, 将传输二者经过异或操作后的信息, 即

$$P_{j,\gamma} = P_{j,\alpha} \oplus P_{j,\beta} \quad (3)$$

其中, \oplus 表示异或运算, $P_{j,\Xi}$ 表示长度为 N 的数据包, 满足 $\{\alpha, \beta, \gamma\} \in \Xi$ 。假设 $P_{j,\hat{\Xi}}$ 原始数据包为 $C_{j,\hat{\Xi}}$, 其中 $\{\alpha, \beta\} \in \hat{\Xi} = \Xi \setminus \gamma$ 。则式(3)可进一步写为

$$P_{j,\gamma} = \pi_{j,\alpha} [\mathcal{L}(C_{j,\alpha})] \oplus \pi_{j,\beta} [\mathcal{L}(C_{j,\beta})] \quad (4)$$

其中, $\pi_{j,\hat{\Xi}}$ 表示比特级的交织器, \mathcal{L} 表示 LDPC 编码器。另外, 考虑到 NC-SCMA 在传输过程中需要等待 2 个错误包的出现, 可能会影响传输的时效性。为此, 本文定义 $t_{j,\alpha}$ 与 $t_{j,\beta}$ 之间的时间间隔为重传等待时间 (RWT, retransmission waiting time), 需满足

$$t_{j,\beta} - t_{j,\alpha} \leq T_{\max} \quad (5)$$

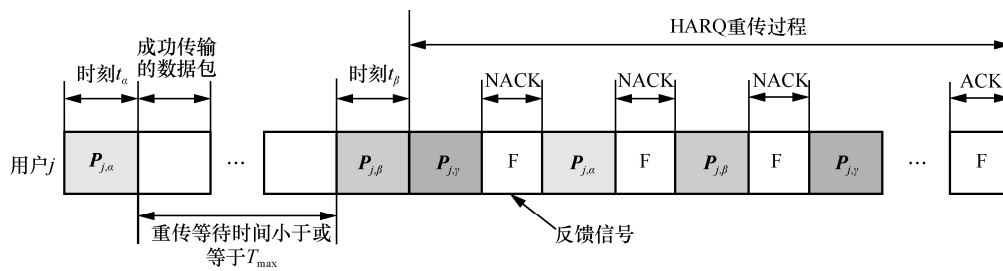
其中, T_{\max} 表示 2 个错误包之间允许的最大时延间隔, 且在 NC-SCMA 中需满足 $T_{\max} > 0$ (需要说明的是, 尽管 RWT 所表示的并非确切的传输时间间隔 (TTI, transmission time interval), 而是 2 个错误包之间的成功传输数据包的数量, 但在获知每个数据包的传输时间间隔后, 就可以通过 RWT 求得确切的时间, 这个时间一般以毫秒计算)。如图 2(a) 所示, 当式(5)满足时, 在接收到第二个错误包 $P_{j,\beta}$ 后, NC-SCMA 将在重传过程中首先传输 $P_{j,\gamma}$ 。之后的 HARQ 传输将根据 BS 接收到的 2 个数据包的反馈信号确定, 具体规则如下。

1) 若 $P_{j,\alpha}$ 的反馈信号为 NACK, $P_{j,\beta}$ 为 ACK, 且 $r < R$, 则在下一轮重传中只需传输 $P_{j,\alpha}$ 。

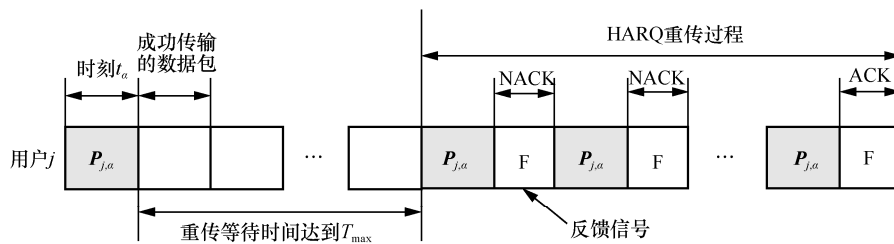
2) 若 $P_{j,\alpha}$ 的反馈信号为 ACK, $P_{j,\beta}$ 为 NACK, 且 $r < R$, 则在下一轮重传中只需传输 $P_{j,\beta}$ 。

3) 若 $P_{j,\alpha}$ 与 $P_{j,\beta}$ 的反馈信号均为 NACK, 且 $r < R$, 则依照图 2(a)所示的循环规则, 依次重传 $P_{j,\alpha}$ 和 $P_{j,\beta}$ 。由于 $P_{j,\alpha}$ 和 $P_{j,\beta}$ 均表示错误传输的数据包, 为简化示意图, 不失一般性, 这里忽略了初始传输阶段用户所接收到的反馈信号。需要注意, 在过程中如果满足情况 1)或 2), 则 NC-SCMA 跳转到 1)或 2), 并按照相应规则进行重传。

此外, 需要注意的是, 在 NC-SCMA 中, 失败用户的重传与成功用户新数据包的传输可以同时进行, 而不需要在重传过程中静默传输成功的用户。同时, 在 NC-SCMA 的重传过程中, 由于包含了 $P_{j,\alpha}$ 与 $P_{j,\beta}$ 这 2 个数据包的信息, 故此时每个数据包等效的重传次数为 $R_{\text{eq}} = \frac{R}{2} - 1$ 。而对于 CC-SCMA 来说, 其重传次数 $R_{\text{eq}} = R - 1$ 。为方便叙述以及对比, 本文后续将统一使用 R_{eq} 来描述 CC-SCMA 以及 NC-SCMA 的最大重传次数。另一方面, 若 RWT 超出最大时延间隔, 为了保证传输的实效性, 此时 NC-SCMA 将退化为如图 2(b)所示的与 CC-SCMA 类似的重传方式。通过上述讨论可以看出, CC-SCMA 是 NC-SCMA 在 $T_{\max} = 0$ 时的特殊情况。具体而言, 当 $T_{\max} = 0$ 时, 若有错误传输的



(a) $RWT \leq T_{\max}$



(b) $RWT > T_{\max}$

图 2 NC-SCMA 示意

数据包，则不需要等待下一个错误包的出现，而是在接收到 NACK 反馈后直接重传，这与 CC-SCMA 的传输规则是一致的。

2 NC-SCMA 的接收机设计

对于 NC-SCMA 的接收机设计，可以采用一般的分立检测策略，也就是进行顺序检测，即先完成 SCMA 的检测，之后对 NC 的数据包进行译码，最后将 NC 译码后的信息传入 LDPC 的译码器进行译码。尽管该策略直观且易实现，然而会在中低信噪比区域造成较大的性能损失（相关结果请参考 3.2 节），无法获得 NC 带来的编码增益。为此，本文提出了一种基于消息传递的联合检测策略，旨在提升 NC-SCMA 的检测性能。

本文分别将 SCMA 和 LDPC 的变量节点表示为 $sv_{l,j}$ 和 $lv_{j,n}$ ，其中 $l \in \{1, 2, \dots, 2L\}$ ， $n \in \{1, 2, \dots, 2N\}$ ；SCMA 的功能节点（FN, function node）和 LDPC 的校验节点（CN, parity check node）分别表示为 $f_{l,k}$ 和 $c_{j,p}$ ，其中 $p \in \{1, 2, \dots, P\}$ ， P 是校验节点的数量。同时，假设一个 NC 校验节点（NCN, NC check node） $nc_{j,\eta}$ 作为虚拟节点。基于上述说明，为方便叙述，定义如下在迭代更新中需要的 6 种消息类型。

$I_{l,k \rightarrow j}$ ：SCMA 码字 l ， $f_{l,k}$ 流向 $sv_{l,j}$ 的消息。

$G_{l,j \rightarrow k}$ ：SCMA 码字 l ， $sv_{l,j}$ 流向 $f_{l,k}$ 的消息。

$Q_{j,p \rightarrow n}$ ：LDPC 译码器 j ， $c_{j,p}$ 流向 $lv_{j,n}$ 的消息。

$S_{j,n \rightarrow p}$ ：LDPC 译码器 j ， $lv_{j,n}$ 流向 $c_{j,p}$ 的消息。

$A_{j,\eta \rightarrow n}$ ：NCN $nc_{j,\eta}$ 流向 LVN $lv_{j,n}$ 的消息。

$A_{j,n \rightarrow \eta}$ ：LVN $lv_{j,n}$ 流向 NCN $nc_{j,\eta}$ 的消息。

为简化叙述，本文规定 $A \setminus b$ 表示在集合 A 中除去元素 b 余下的全部元素。

下面，将逐步介绍所提的 NC-SCMA 的联合检测算法。

1) 初始化。本文中所采用的 SCMA 检测算法的软信息是定义在概率域上的，而 LDPC 译码器的消息是定义在对数域上的，为此，需要首先进行如下消息初始化： $I_{l,k \rightarrow j}^{(r)} = \frac{1}{M}$ ， $Q_{j,p \rightarrow n} = 0$ 以及 $A_{j,\eta \rightarrow n} = 0$ 。

2) FN 更新。在第 r 轮的传输中，当 BS 接收到 J 个用户的叠加信号后，检测将从 SCMA 的 FN 开始进行。FN 的更新式为

$$I_{l_{\Xi}, k \rightarrow u}^{(r)}(\mathbf{X}_u) = \sum_{X_j: j \in \zeta_k \setminus u} \frac{1}{\pi N_0} \exp\left(-\frac{d_{j,k}^{l_{\Xi}}}{N_0}\right) \prod_{j \in \zeta_k \setminus u} G_{l_{\Xi}, j \rightarrow k}^{(r)}(\mathbf{X}_j) \quad (6)$$

其中

$$d_{j,k}^{l_{\Xi}} = \frac{2}{N_0} |Y_{l_{\Xi}, k} - \sum_{k \in \zeta_k} h_{j,k}^{l_{\Xi}} X_{j,k}|^2 \quad (7)$$

其中， $h_{j,k}^{l_{\Xi}}$ 表示 SCMA 第 l_{Ξ} 个码字上第 j 个 SVN 与第 k 个 FN 之间的信道系数， $Y_{l_{\Xi}, k}$ 表示 SCMA 第 l_{Ξ} 个码字第 k 个资源块叠加信号， ζ_k 表示连接到第 k 个 FN 的所有 SVN 的集合， $l_{\alpha}, l_{\beta}, l_{\gamma} \in \{1, 2, \dots, L\}$ 。

3) SVN 更新。SVN 的更新与 SCMA 检测中是一致的，遵循以下规则

$$G_{l_{\Xi}, j \rightarrow k}^{(r)}(\mathbf{X}_j) = \prod_{k \in \zeta_j \setminus v} I_{l_{\Xi}, k \rightarrow j}^{(r)}(\mathbf{X}_j) \quad (8)$$

其中， ζ_j 是连接到第 j 个 SVN 的所有 FN 集合。

4) NCN 更新。完成 SCMA 迭代后，即进入 NCN 的更新，NCN 是连接 SCMA 检测与 LDPC 译码的桥梁，因此其节点更新规则也是本文算法需要设计的核心部分。值得注意的是，NCN 的消息更新是双向的，即 NCN 的消息有流出和流入 2 个方向。为更新 NCN 的信息，首先应当先考虑 SCMA 迭代后 SVN 上输出的消息

$$I_j(\eta_{\Xi}) = \sum_r \mathcal{M} \left[\prod_{k \in \zeta_j} \left[I_{\frac{\eta_{\Xi}}{b}, k \rightarrow j}^{(r)}(\mathbf{X}_j) \right] \right] \quad (9)$$

式(9)中对 r 求和的目的是利用 MRC 准则合并过去 r 次传输检测得到的信息。需要注意的是，对于 NC-SCMA 来说，集合 Ξ 中的数据不会每次都被重传，而对于未重传的数据包来说，此时其对应的

$I_{\frac{\eta_{\Xi}}{b}, k \rightarrow j}^{(r)}(\mathbf{X}_j) = \frac{1}{M}$ ， M 表示 SCMA 码本的点数。 \mathcal{M}

表示将 SCMA 符号向量的概率域软信息映射为对应对数域比特软信息的变换，一般可以写作

$$\mathcal{M} = \frac{\ln \left(\sum_{\mathbf{a}^{(0)} \in \mathcal{A}^{(0)}} \Pr(\mathbf{a}^{(0)}) \right)}{\ln \left(\sum_{\mathbf{a}^{(1)} \in \mathcal{A}^{(1)}} \Pr(\mathbf{a}^{(1)}) \right)} \quad (10)$$

其中， $\mathcal{A}^{(0)}$ 和 $\mathcal{A}^{(1)}$ 分别表示符号向量对应的比特向量的第 i 个元素为 0 和 1 的集合。

对于 NCN 的流出消息更新，需考虑所有传输

包, 方便起见, 这里以 $\mathbf{P}_{j,\alpha}$ 的更新为例, 具体更新规则如下

$$A_{j,\eta_\alpha \rightarrow n_\alpha} = w \left[A_{j,\eta_\beta \rightarrow \eta_\beta} \boxplus A_{j,\eta_\gamma \rightarrow \eta_\gamma} \right] + I_j(\eta_\alpha) \quad (11)$$

其中, 运算“ \boxplus ”也被称作 box plus, 可以表示为

$$L_1 \boxplus L_2 = 2 \tanh^{-1} \left(\tanh \left(\frac{L_1}{2} \right) \tanh \left(\frac{L_2}{2} \right) \right) \approx \text{sign}(L_1) \text{sign}(L_2) \min(|L_1|, |L_2|) \quad (12)$$

同时, 在 NCN 上还存在流入消息的更新, 相似地, 此时集合 Ξ 中的所有数据包的软信息均需要进行更新。与流出方向的消息更新类似, 需先获得 LVN 上的输出消息为

$$Q_j(n_\Xi) = \sum_{p_\Xi \in \Psi_n} Q_{j,p_\Xi \rightarrow n_\Xi} \quad (13)$$

之后, 将该信息送入 NCN 中, 并与来自 SVN 的信息结合, 为了方便起见, 这里只以 $\mathbf{P}_{j,\alpha}$ 的更新为例进行说明, 则有

$$A_{j,n_\alpha \rightarrow \eta_\alpha} = \left[Q_j(n_\beta) \boxplus Q_j(n_\gamma) \right] + \pi_{j,\alpha} \left[I_j(\eta_\alpha) \right] \quad (14)$$

其中, $\pi_{j,\gamma}$ 表示对数据包 γ 的比特级软信息交织, $\mathbf{P}_{j,\beta}$ 数据包的更新规则与式(14)相似。同时, 为了更好地进行后续的迭代, $\mathbf{P}_{j,\gamma}$ 的信息也需要进行重编码

$$A_{j,n_\gamma \rightarrow \eta_\gamma} = \left[Q_j(n_\alpha) \boxplus Q_j(n_\beta) \right] + \pi_{j,\gamma} \left[I_j(\eta_\gamma) \right] \quad (15)$$

5) LVN 更新。与分立检测方式不同, 为使 SCMA、LDPC 以及 NC 译码的信息更为充分地进行交换, LVN 的更新需要来自 NCN 以及 PN 两类节点上的信息。其更新规则如下

$$S_{j,n_\Xi \rightarrow q} = \sum_{p \in \Psi_{n_\Xi} \setminus q} Q_{j,p \rightarrow n_\Xi} + \pi_{j,\Xi}^{-1} \left(A_{j,\eta_\Xi \rightarrow n_\Xi} \right) \quad (16)$$

其中, Ψ_{n_Ξ} 表示连接到 n_Ξ 的所有的 PN 集合, $\pi_{j,\Xi}^{-1}$ 表示对数据包 $\mathbf{P}_{j,\Xi}$ 的软信息进行比特级的解交织。

6) PN 更新。LDPC 的 PN 采取以下规则更新

$$Q_{j,p_\Xi \rightarrow i_\Xi} = 2 \tanh^{-1} \left[\prod_{n_\Xi \in \phi_c \setminus i_\Xi} \tanh(S_{j,n_\Xi \rightarrow p_\Xi}) \right] \quad (17)$$

其中, ϕ_c 包含了 LDPC 中所有连接到第 c 个 PN 的 LVN, $\tanh(\cdot)$ 和 $\tanh^{-1}(\cdot)$ 分别表示双曲正切和反双曲正切函数。需要注意的是, 式(6)和式(17)在迭代过程中需进行归一化, 以保证数据的稳定性。

7) 输出与判决。当达到最大迭代次数或判决码

字满足校验方程时, 最终结果将在 LVN 上输出, 其输出结果为迭代中累积的对数似然比

$$\text{LLR}_j(n_\Xi) = \sum_{p_\Xi \in \Psi_n} Q_{j,p_\Xi \rightarrow n_\Xi} + A_{j,\eta_\Xi \rightarrow n_\Xi} \quad (18)$$

图 3 给出了 NC-SCMA 联合检测算法的消息流向。如图 3 所示, 在 BS 接收到 NC-SCMA 的叠加信号后, 接收机将结合先前接收到的 2 个错误数据包进行 SCMA 检测。需要注意的是, 先前错误数据包的软信息已事先存储, 因此在对网络编码的数据包进行检测时不需要再次检测。之后, 检测后的数据包软信息将进行网络编码译码并流向 NCN 以及 LDPC 译码器, 在 LDPC 译码器内形成内循环 I_{in} 。最后, 输出的 LDPC 软信息将重新流向 NCN, 并在网络译码器一端与 SCMA 检测器的软信息相结合, 由此构成外循环 I_{out} 。为方便起见, 本文结合图 3 将联合检测的具体算法流程总结为算法 1。

算法 1 NC-SCMA 的联合检测算法

输入 $I_{\text{out}}, I_{\text{in}}, I_{\text{scma}}$, 各用户码本 \mathcal{X}_j , 接收信号 \mathbf{y} , 信道矩阵 \mathbf{h}_j

输出 恢复各用户传输信息

1) 初始化 $I_{l,k \rightarrow j}^{(r)} = \frac{1}{M}$, $Q_{j,p \rightarrow n} = 0$, $A_{j,\eta \rightarrow n} = 0$, w ,

RWT

2) for $r = 1$ to R

3) for $l = 1$ to L

4) for $i_{\text{scma}} = 1$ to I_{scma} do// SCMA 循环

5) for $k = 1$ to K do

6) 根据式(6)、式(7)更新 FN

7) end for

8) for $j = 1$ to J do

9) 根据式(8)更新 SVN

10) end for

11) end for

12) end for

13) for $i_{\text{out}} = 1$ to I_{out} do// 联合检测外循环

14) 利用式(9)、式(11)更新流出 NCN 的消息

15) for $i_{\text{in}} = 1$ to I_{in} do// 联合检测内循环

16) for $n = 1$ to N do

17) 根据式(16)更新 LVN

18) end for

19) for $p = 1$ to P do

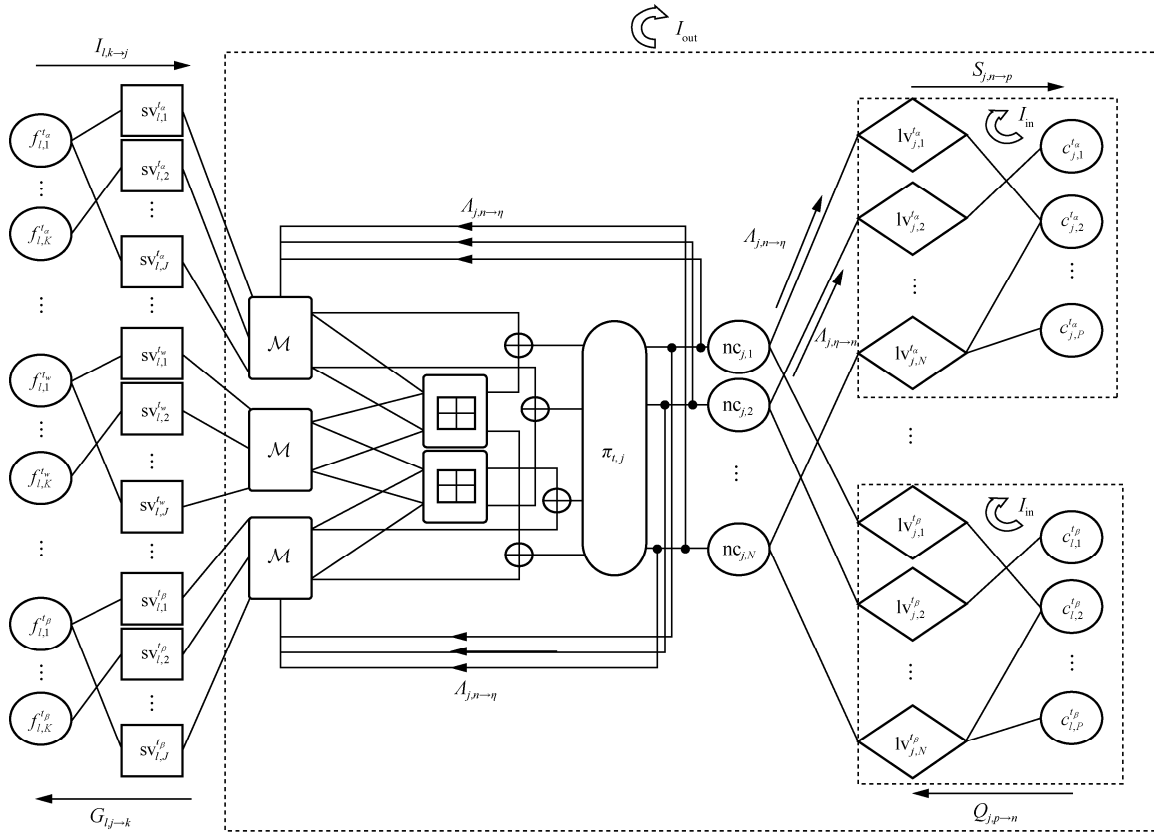


图 3 NC-SCMA 联合检测算法的消息流向

- 20) 根据式(17)更新 PN
- 21) end for
- 22) end for
- 23) 利用式(13)、式(14)更新流入 NCN 的消息
- 24) 利用式(18)做判决得到 $\hat{P}_{j,\alpha}$ 和 $\hat{P}_{j,\beta}$
- 25) if 校验方程得到满足或迭代达到 I_{out}
- 26) then 跳出 I_{out} 循环
- 27) end if
- 28) end for
- 29) 若解码得到的 $\hat{P}_{j,\alpha}$ 和 $\hat{P}_{j,\beta}$ 通过 CRC 校验或重传次数达到 R
- 30) end for

3 仿真分析

3.1 权重因子选择以及 RWT 分析

为了验证本文所提方案及算法的有效性，将其与传统的 CC-SCMA 进行对比。本文采用 2 种不同过载率下的 SCMA 进行仿真验证 ($\lambda=150\%$ 和 $\lambda=200\%$)，其“ 4×6 ”和“ 5×10 ”的因子矩阵分

别由式(1)和式(19)给出

$$F_{5 \times 10} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

码本构造遵循文献[17]中的相关规则，SCMA 的迭代次数均为 6。此外，仿真中所使用的 LDPC 码均为 5G 新空口 (5G NR, 5G new radio) 制定的码^[18]，本文使用了其中码率 c 为 $\frac{5}{6}$ 、 $\frac{2}{3}$ 以及 $\frac{1}{2}$ 的 3 种短码，其码长 N 相近，分别为 260、264 以及 270。对于所提的联合检测算法，本文的所有仿真均取 $I_{out} = 8$ ， $I_{in} = 20$ 。本文对 NC-SCMA 在加性白高斯噪声 (AWGN, additive white Gaussian noise) 以及瑞利 (Rayleigh) 衰落信道下的性能均进行了仿真。

如文献[11,19]中所述，平均吞吐量将作为衡量 NC-SCMA 性能的一个重要指标，方便起见，本文采用式(20)所示的吞吐量定义^[11,19]

$$\theta = c \frac{T_{\text{correct}}}{T_{\text{total}}} \quad (20)$$

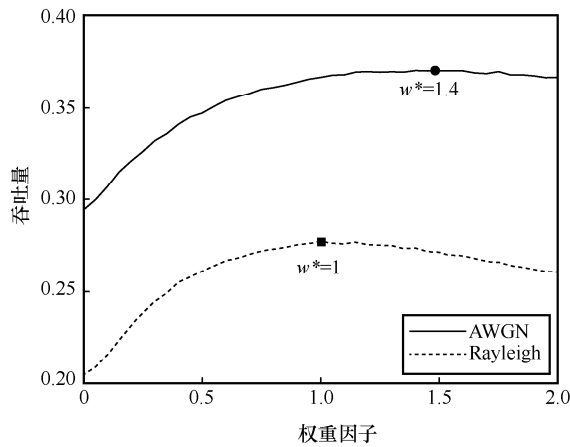
其中, T_{correct} 以及 T_{total} 分别表示一定时隙长度内正确解码的数量以及传输包的总数量。

根据 NC-SCMA 联合检测译码接收机的设计方案, 权重因子 w 的选择将在一定程度上影响 NC-SCMA 的性能。为寻找合适的权重因子 w^* , 本文针对不同条件下的 NC-SCMA 进行了仿真, 并依此选择合适的权重因子。在图 4(a)~图 4(d)中, 通过对不同信道、信噪比、LDPC 码率以及 SCMA 过载率进行仿真, 并基于此选择不同系统参数 NC-SCMA 在联合检测时的权重因子。

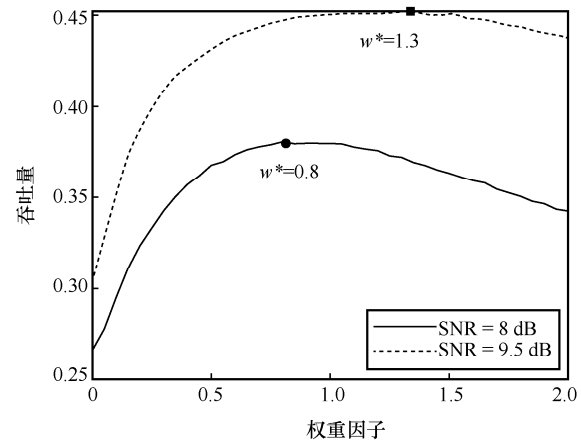
从图 4 中可以看出, 不同条件下的最优权重因子存在一定差异。根据对图 4(a)~图 4(d)的分析, 可以得到以下几点最优权重因子选择的准则: 1) 从图

4(a)中可以看出, AWGN 信道所需要的权重因子一般较高, 且在一定权重因子范围内吞吐量的动态变化范围不大, 因此 AWGN 下的 w^* 选择较为宽松; 2) 针对不同信噪比的情况, 在信噪比较低时, 吞吐量在最优权重因子 w^* 的两侧变化率较大, 而在较高信噪比区域两侧则相对平缓, 为保证性能, 在选择最优权重因子时, 应主要考虑中低信噪比的情况; 3) 从图 4(c)与图 4(d)可以看出, 不同 LDPC 码率 c 和 SCMA 过载率 λ 对 w^* 的敏感性相对较低, 且不同条件下获得的 w^* 也较为接近, 这在一定程度上意味着 c 和 λ 不是影响 w^* 选择的主导因素。根据上述的讨论, 在下文的仿真中, 联合检测所选择的最优权重因子如表 1 所示。

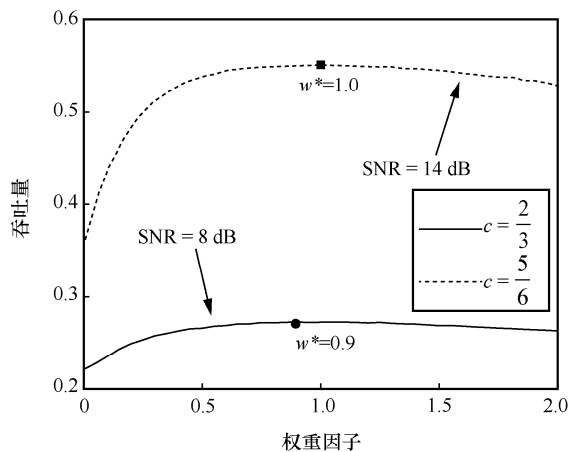
本文所提的 NC-SCMA 在整体时延上主要由传输次数 r 和 RWT 决定。由于重传次数对时延的影



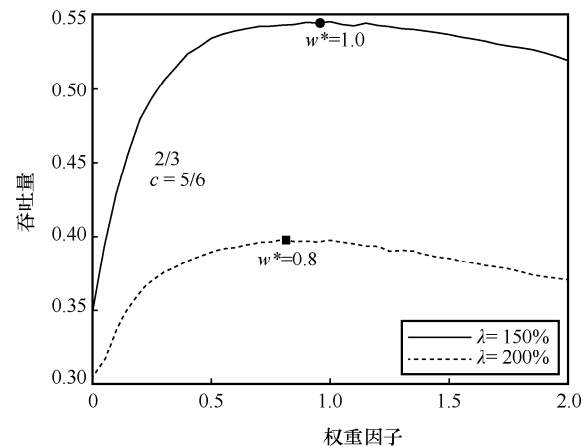
(a) 不同信道条件下的权重因子选择
(“4×6” SCMA, $R_{\text{eq}}=2$, $c=\frac{1}{2}$, SNR=5.5 dB)



(b) 不同信噪比下的权重因子选择
(“4×6” SCMA, $R_{\text{eq}}=3$, $c=\frac{2}{3}$, Rayleigh)



(c) 不同码率条件下的权重因子选择
(“5×10” SCMA, $R_{\text{eq}}=3$, Rayleigh)



(d) 不同过载率下的权重因子选择
(“5×10” SCMA, $R_{\text{eq}}=3$, $c=\frac{6}{5}$, SNR=12 dB, Rayleigh)

图 4 不同条件下权重因子与吞吐量的关系

响是确定的,因此下面主要研究 RWT 对 NC-SCMA 吞吐量的影响。

表 1 联合检测所选择的最优权重因子

最优权重因子	条件
1.2	AWGN 信道, “4×6” “5×10” NC-SCMA, $c = \frac{1}{2}, \frac{5}{6}, R_{eq} = 2, 3, 3.5$
1.0	Rayleigh 信道, “4×6” NC-SCMA, $c = \frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \frac{5}{6}, R_{eq} = 2, 3, 3.5$
0.8	Rayleigh 信道, “5×10” NC-SCMA, $c = \frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \frac{5}{6}, R_{eq} = 2, 3, 3.5$

如图 5 和图 6 所示, 分别对 AWGN 和瑞利衰落信道下 RWT 与吞吐量之间的关系进行了仿真。从图 5 和图 6 可以看出, 无论是 AWGN 还是瑞利衰落信道, 吞吐量随 RWT 的动态变化范围都不大, 这是因为 NC-SCMA 在这一信噪比区域发生错误的数据包数量极少, 其吞吐量 $\theta \rightarrow c$ 。如图 5 和图 6(b) 所示, 此时出现的多数都是连续性错误, 因此主要工作在 NC-SCMA 状态下, 这就使 RWT 对吞吐量的影响有限。如图 6(a) 所示, 若 RWT 较小, NC-SCMA 将近似等效为 CC-SCMA, 从而降低吞吐量性能; 而当 RWT 较大时, 则将主要以 NC-SCMA 的状态工作。此外, AWGN 信道下吞吐量随 RWT 的变化较为平稳, 受到 RWT 的影响不显著。其原因在于, 在瑞利衰落信道下, 信道状态信息具有较大的随机性, 这将使 2 个错误包出现的时刻也较为随机。根据上述讨论, 为在时延与吞吐量之间获得较好的折中, 本文后续的仿真中均取 $RWT = 8$ 。

3.2 吞吐量分析

本节针对不同参数下的 NC-SCMA 的吞吐量性能进行了仿真与分析, 旨在验证所提 NC-SCMA 和联合检测算法的有效性。

图 7 和图 8 分别展示了 AWGN 和瑞利衰落信道下 NC-SCMA 与 CC-SCMA 的吞吐量对比。通过对图 7 和图 8 的观察和分析, 可以得到以下几点结论。1) 相较于传统的 CC-SCMA, 所提的 NC-SCMA 重传方案在不同信道、不同码率以及不同过载率下均具有一定的性能提升。2) NC-SCMA 的联合检测策略在中低信噪比区域可以获得比分立检测和 CC-SCMA 更好的性能。然而, 在中高信噪比区域, 该优势逐渐消失, 吞吐量性能也会受到一定损失, 但是这样的性能损失基本可以忽略。导

致这一现象的主要原因是最优权重因子 w^* 在不同信噪比上的差异。3) NC-SCMA 的优势在使用高码率的 LDPC 码时更为明显, 这可以归因于高码率信道编码较弱的纠错性能使 NC 带来的编码增益更为显著。同时, 从图 8 中可以看到, 在中高信噪比区域, NC-SCMA 相较于 CC-SCMA 获得的吞吐量增益尤其明显, 这主要是因为经过网络编码的传输包在这个区域内能以更大的概率同时恢复初始传输的 2 个数据包。这意味着由于 NC 的引入, NC-SCMA 可能只需要一次重传即能实现 2 个错误数据包的成功传输, 而 CC-SCMA 则需要两次重传。得益于此事实, NC-SCMA 对中高信噪比的吞吐量提升最为明显。

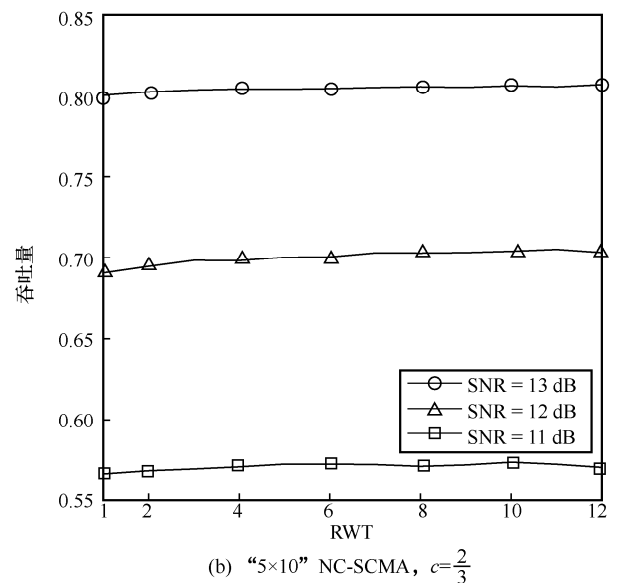
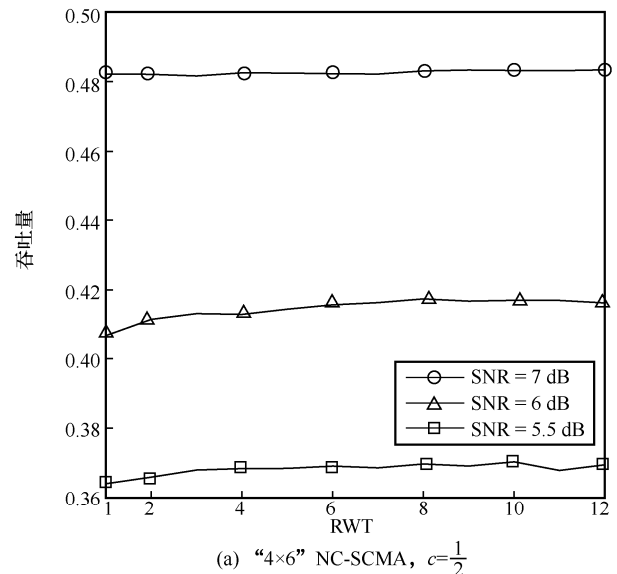


图 5 AWGN 信道下 RWT 与吞吐量的对比 ($R_{eq} = 2$)

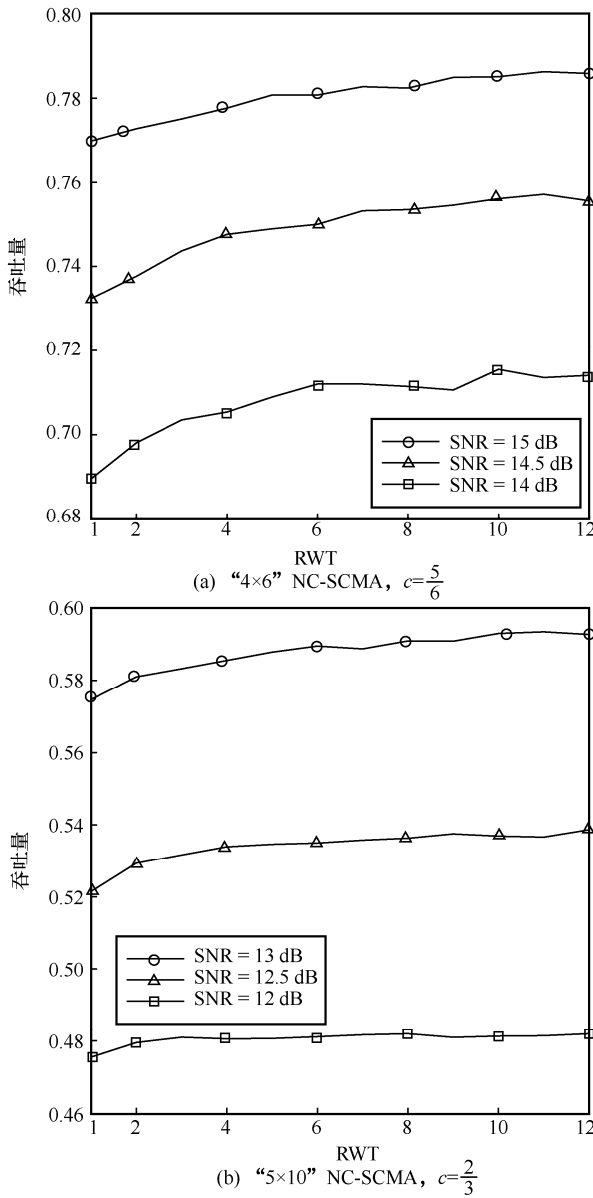


图 6 瑞利衰落信道下 RWT 与吞吐量的对比 ($R_{eq} = 2$)

图 9 对比了在采用联合检测的条件下, NC-SCMA 在不同 R_{eq} 下的吞吐量对比。从图 9 中可以看出, 不同 R_{eq} 的“4×6”NC-SCMA 和“5×10”NC-SCMA 分别在 $SNR = 5.5$ dB 和 $SNR = 7.5$ dB 时开始逐渐收敛, 这意味着更多次数的重传只对低信噪比区域的吞吐量产生影响, 而中高信噪比的性能则主要受到 SCMA 和 LDPC 码性能的限制, 这与 CC-SCMA 的结论是一致的。同时, 当“4×6”NC-SCMA 的吞吐量为 0.1 时, $R_{eq} = 3.5$ 相较于 $R_{eq} = 2$ 能够获得约为 2 dB 的增益, 而对于“5×10”NC-SCMA, 这一数值约为 2.8 dB。这说明采用 NC 准则对重传数据包进行编码对过载率较高, 即误码率性能较差的 SCMA 系统有更大的提升。

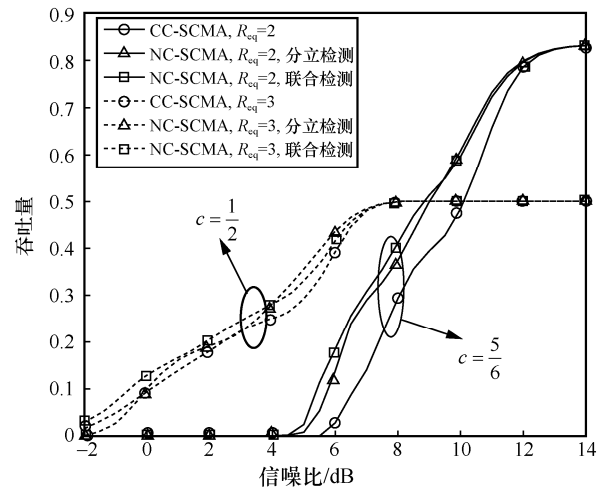


图 7 AWGN 信道下 NC-SCMA 与 CC-SCMA 的吞吐量对比

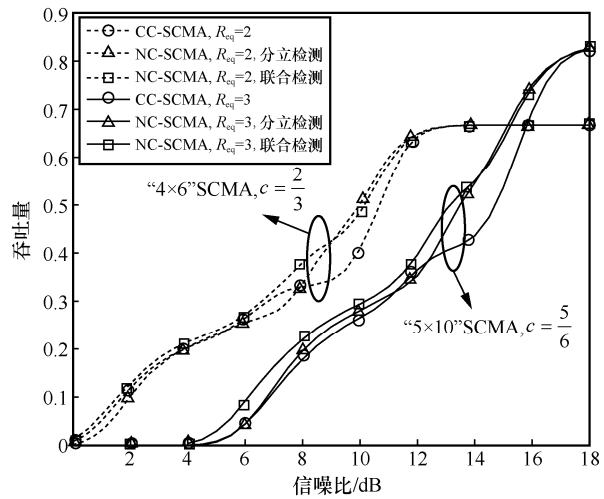


图 8 瑞利衰落信道下 NC-SCMA 与 CC-SCMA 的吞吐量对比

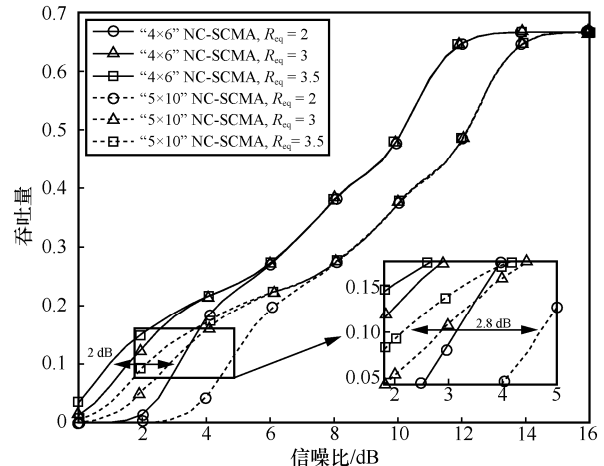


图 9 在采用联合检测的条件下, NC-SCMA 在不同 R_{eq} 下的吞吐量对比

图 10 研究了 $R_{eq} = 3.5$ 的 NC-SCMA 与 $R_{eq} = 4$ 的 CC-SCMA 在不同系统参数下的吞吐量对比。如图 10 所示, 当码率 $c = \frac{5}{6}$ 时, NC-SCMA 在低信噪

比区域的性能几乎与 R_{eq} 更高的 CC-SCMA 一致，这主要归因于在低信噪比区域，通过式(12)得到的 $P_{j,\alpha}$ 和 $P_{j,\beta}$ 数据包中各个比特的软信息置信度较差，导致难以仅通过重传网络编码后的数据包恢复 $P_{j,\alpha}$ 和 $P_{j,\beta}$ 。另一方面，当 $SNR > 5$ dB 以及 $SNR > 3.5$ dB 时，过载率为 $\lambda = 150\%$ 和 $\lambda = 200\%$ 的 NC-SCMA 分别在吞吐量上超过了 CC-SCMA。对于 $c = \frac{2}{3}$ ， $\lambda = 200\%$ 的情况，尽管在 $SNR < 3.5$ dB 的范围内， $R_{eq} = 4$ 的 CC-SCMA 具有一定的优势，但此后 NC-SCMA 的性能更优。图 10 仿真结果说明 NC-SCMA 能够以更少的 R_{eq} 获得更优的性能。

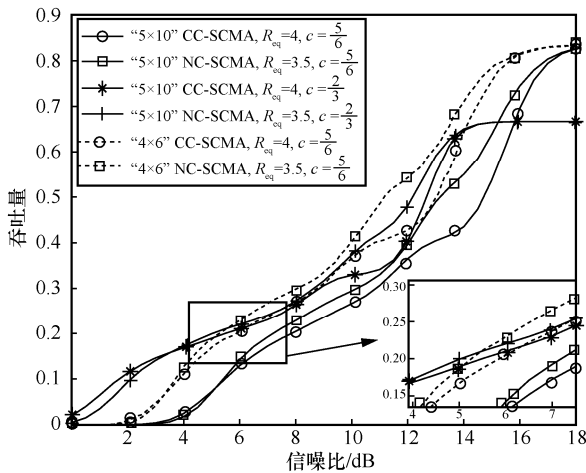


图 10 $R_{eq} = 3.5$ 的 NC-SCMA 与 $R_{eq} = 4$ 的 CC-SCMA 吞吐量对比

3.3 误包率及平均重传次数分析

本节主要研究不同参数下 NC-SCMA 的误包率 (PER, packet error rate) 性能以及平均重传次数。为与吞吐量的定义进行区分，本文中的 PER 指的是 J 个用户采用 CC-SCMA 或是 NC-SCMA 策略完成 R_{eq} 次传输后的平均 PER。需要注意的是，在 CC-SCMA 中，只需要考察用户 j 的一个数据包在 R_{eq} 次重传后能否被正确接收，而对于 NC-SCMA 来说，所考虑的则是 2 个数据包在 $2R_{eq}$ 次重传后的 PER。

图 11 为 CC-SCMA 与 NC-SCMA 的 PER 对比。如图 11 所示，相较于 CC-SCMA，NC-SCMA 在 PER 性能上也有一定的提升，在 $PER = 10^{-3}$ 处，对比编码码率为 $c = \frac{2}{3}$ 的“4x6”CC-SCMA，使用联合检测的 NC-SCMA 能够获得约 0.5 dB 的增益；而对于编码码率为 $c = \frac{5}{6}$ 的“5x10”NC-SCMA 来说，这一增益达到约 1.2 dB。结合 NC-SCMA 与 CC-SCMA

的 PER 以及吞吐量性能，可以观察到，针对码率为 $c = \frac{2}{3}$ 的“4x6”NC-SCMA，采用分立检测的 PER 性能在 $SNR = 4$ dB 左右要优于联合检测。在相同条件下，根据图 8 可以看到，此时联合检测的吞吐量性能略优于分立检测。导致这种现象出现的原因可能是联合接收机需要将多次传输的软信息进行迭代，因此可能发生错误传播现象，使某些用户无法在 $2R_{eq}$ 次重新传输中正确解译信息。同时，尽管分立接收机平均需要的重传次数大于联合接收机，但由于没有错误传播的问题，因此在某些条件下， R_{eq} 次重传内实现正确解译的概率更大。

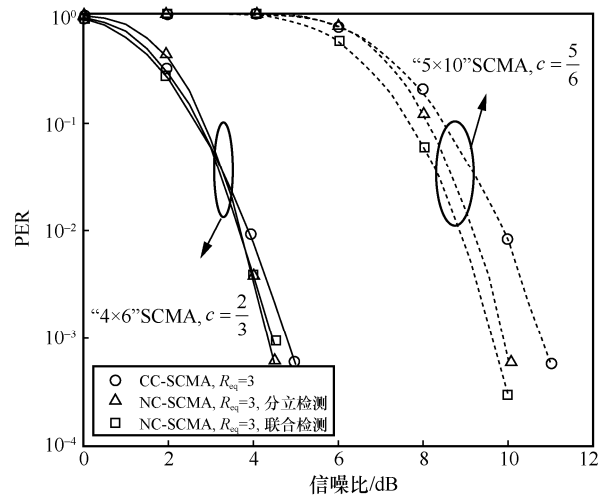


图 11 CC-SCMA 与 NC-SCMA 的 PER 对比 ($R_{eq} = 3$)

为了从时延的角度考察 NC-SCMA 的性能，本文定义平均重传次数为

$$\rho = \frac{\sum_{j=1}^J R_j}{JV} \quad (21)$$

其中， R_j 为用户 j 为传输 V 个数据包实际所需要的传输次数，对于 CC-SCMA， $V = 1$ ；对于 NC-SCMA， $V = 2$ 。需要注意的是，这里的平均重传次数与前述的等效重传次数 R_{eq} 不同， R_{eq} 特指实现 2 个数据包成功传输所需要的等效重传次数；而 ρ 则是统计意义上的平均重传次数。

平均重传次数对比如图 12 所示。从图 12 中可以看出，在中低信噪比区域，NC-SCMA 的联合检测策略所需要的重传次数均是最少的，且在高信噪比区域，无论是采用联合检测还是分立检测的 NC-SCMA，相较于 CC-SCMA，其所需的重传次数都获得了较大的降低。具体而言，在使用“4x6”

码本, 且 $R_{\text{eq}} = 3$, $c = \frac{1}{2}$ 的情况下, 采用联合检测的 NC-SCMA 在中低信噪比阶段所使用的平均传输次数要略低于 CC-SCMA, 而从 7 dB 开始至 11 dB, NC-SCMA 的平均重传次数要比 CC-SCMA 低 0.25~0.50 次。而使用“5×10”码本, $R_{\text{eq}} = 2$, $c = \frac{2}{3}$ 的 NC-SCMA, 其平均重传次数在 6~10 dB 也要小于 CC-SCMA 约 0.15~0.40 次。这说明 NC-SCMA 对于降低系统的能量开销以及传输时延均有帮助。需要注意的是, 当信噪比较低时, 对比 CC-SCMA, 采用分立检测的 NC-SCMA 需要更多的重传次数来恢复数据, 而这部分损失在联合检测中均获得了补偿, 这说明了所提联合检测算法的有效性。

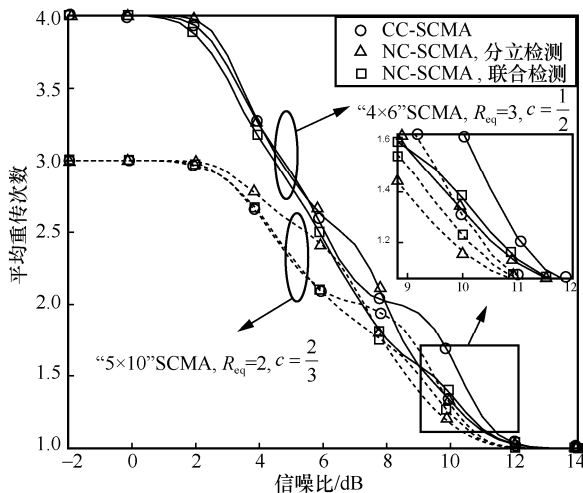


图 12 平均重传次数对比

平均重传次数降低的主要原因是在重传中引入了网络编码。举例来说, 在 CC-SCMA 中, 若 2 个错误数据包进行重传, 则至少需要两次重传才能保证 CC-SCMA 错误数据包的成功传输; 而对于 NC-SCMA 来说, 2 个错误数据包最少只需要一次重传便可正确恢复出错误数据包。图 12 的结果很好地说明了 NC-SCMA 的这一特性。但需要注意到, 无论是 NC-SCMA 的联合检测还是分立检测, NC-SCMA 对于平均重传次数的降低仍无法达到上述例子中的理想情况。这主要是由本文所提的 NC-SCMA 检测方法的次优性造成的, 对于 NC-SCMA 来说, 最优的接收机为最大似然检测, 而最优的软合并方法为距离级合并^[20]。因此, 在多用户以及多数据包的条件下, 若想实现 NC-SCMA 的最优检测, 将面临十分巨大的复杂度, 这在实际中几乎是无法实现的, 故本文采用次优的检测方法,

在检测性能与计算复杂度之间进行折中。尽管如此, NC-SCMA 相较于 CC-SCMA 来说仍具有优势。

4 结束语

本文提出了一种基于 NC 准则的新型 SCMA-HARQ 方案。该方案基于 LDPC 编码的上行 SCMA 多用户通信场景, 利用 NC 将相隔一定时间间隔的 2 个错误传输包进行异或后合并重传, 以减少用户进行 HARQ 重传的次数。同时, 为使该 LDPC-NC 联合编码的 SCMA-HARQ 方案能够在接收端成功译码, 本文进一步提出了一种基于 MPA 的联合迭代译码算法, 并对算法中相关的参数选择进行了分析。仿真结果表明, 对比传统的 CC-SCMA, 在中高信噪比阶段, 无论是 NC-SCMA 的分立检测还是联合检测, NC-SCMA 的吞吐量和 PER 性能均更优, 并且联合检测通过引入网络编码以及 LDPC 译码之间的迭代, 使低信噪比区域的吞吐量和 PER 性能较分立检测也有一定的提升。

参考文献:

- [1] GUO F X, YU F R, ZHANG H L, et al. Enabling massive IoT toward 6G: a comprehensive survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(15): 11891-11915.
- [2] 范平志, 李里, 陈欢, 等. 面向大规模物联网的随机接入: 现状、挑战与机遇[J]. 通信学报, 2021, 42(4): 1-21.
FAN P Z, LI L, CHEN H, et al. Random access for massive Internet of things: current status, challenges and opportunities[J]. Journal on Communications, 2021, 42(4): 1-21.
- [3] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse code multiple access[C]//Proceedings of 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE Press, 2013: 332-336.
- [4] YU L S, LIU Z L, WEN M W, et al. Sparse code multiple access for 6G wireless communication networks: recent advances and future directions[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2021, 5(2): 92-99.
- [5] AHMED A, AL-DWEIK A, IRAQI Y, et al. Hybrid automatic repeat request (HARQ) in wireless communications systems and standards: a contemporary survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(4): 2711-2752.
- [6] 张睿, 朱敏, 张冀, 等. 面向 5G 的递增冗余 HARQ 传输方案研究[J]. 北京邮电大学学报, 2018, 41(5): 92-97.
ZHANG R, ZHU M, ZHANG J, et al. Study on 5G incremental redundancy HARQ transmission strategy[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018, 41(5): 92-97.
- [7] LIU Z L, YANG L L. Sparse or dense: a comparative study of code-domain NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(8): 4768-4780.
- [8] LAI K, LEI J, WEN L, et al. Codeword position index modulation design for sparse code multiple access system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 13273-13288.

- [9] LONG Y, CHEN Z, GUO Z W, et al. A novel HARQ scheme for SCMA systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(5): 452-455.
- [10] MHEICH Z, YU W J, XIAO P, et al. On the performance of HARQ protocols with blanking in NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(11): 7423-7438.
- [11] LANG Y D, WÜBBEN D, DEKORSY A, et al. Improved HARQ based on network coding and its application in LTE[C]//Proceedings of 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1958-1963.
- [12] WOLTERING M, WUBBEN D, DEKORSY A, et al. Performance of HARQ with reduced size retransmissions using network coding principles[C]//Proceedings of 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-6.
- [13] XU K, MA W F, ZHU L, et al. NTC-HARQ: network-turbo-coding based HARQ protocol for wireless broadcasting system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(10): 4633-4644.
- [14] JIAO J, NI Z L, WU S H, et al. Energy efficient network coding HARQ transmission scheme for S-IoT[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2021, 5(1): 308-321.
- [15] CHOI J, DING J. Network coding for K-repetition in grant-free random access[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(11): 2557-2561.
- [16] MUKHTAR H, AL-DWEIK A, AL-MUALLA M. CRC-free hybrid ARQ system using turbo product codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(12): 4220-4229.
- [17] TAHERZADEH M, NIKOPOUR H, BAYESTEH A, et al. SCMA codebook design[C]//Proceedings of 2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-5.
- [18] WANG B B, ZHU Y, KANG J. Two effective scheduling schemes for layered belief propagation of 5G LDPC codes[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(8): 1683-1686.
- [19] NADEEM F, SHIRVANIMOGHADDAM M, LI Y H, et al. Nonorthogonal HARQ for URLLC: design and analysis[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(24): 17596-17610.
- [20] JANG E W, LEE J, LOU H L, et al. On the combining schemes for MIMO systems with hybrid ARQ[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(2): 836-842.

[作者简介]



赖恪（1994- ），男，福建厦门人，国防科技大学博士生，主要研究方向为先进接入技术、信道编码技术、物联网以及随机接入等。



雷菁（1968- ），女，陕西西安人，博士，国防科技大学教授、博士生导师，主要研究方向为信息论、LDPC、空时编码、先进的多址技术、物理层安全、隐蔽通信、无线通信技术。



刘伟（1979- ），男，湖南邵阳人，博士，国防科技大学副教授，主要研究方向为通感一体化、物联网、空时编码以及 MIMO 等。

文磊（1980- ），男，湖南长沙人，博士，国防科技大学副教授，主要研究方向为先进接入技术、信道编码技术等。