



研究与开发

基于 SSCANL 译码器的联合迭代检测译码算法

刘重阳, 郭锐

(杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为了提升基于极化码的稀疏码多址接入 (sparse code multiple access, SCMA) 系统接收机性能, 提出了基于简化软消除列表 (simplify soft cancellation list, SSCANL) 译码器的循环冗余校验 (cyclic redundancy check, CRC) 辅助联合迭代检测译码接收机方案。该方案中极化码译码器使用 SSCANL 译码算法, 采用译码节点删除技术对软消除列表 (soft cancellation list, SCANL) 算法所需要的 L 次软消除译码 (soft cancellation, SCAN) 进行简化, 通过近似删除冻结位节点, 简化节点间软信息更新计算过程, 从而降低译码算法的计算复杂度。仿真结果表明, SSCANL 算法可获得与 SCANL 算法一致的性能, 其计算复杂度与 SCANL 算法相比有所降低, 码率越低, 算法复杂度降低效果越好; 且基于 SSCANL 译码器的 CRC 辅助联合迭代检测译码接收机方案相较于 SCAN 译码器的联合迭代检测译码 (joint iterative detection and decoding based on SCAN decoder, JIDD-SCAN) 方案、基于 SCAN 译码器的 CRC 辅助联合迭代检测译码 (CRC aided joint iterative detection and decoding based on SCAN decoder, C-JIDD-SCAN) 方案, 在误码率为 10^{-4} 时, 性能分别提升了约 0.65 dB、0.59 dB。

关键词: SCMA; 极化码; SSCANL 译码器; CRC 辅助联合迭代检测译码

中图分类号: TN925

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022086

SSCANL decoder based joint iterative detection and decoding algorithm

LIU Chongyang, GUO Rui

School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: In order to improve the receiver performance of the sparse code multiple access (SCMA) system based on polar codes, the cyclic redundancy check (CRC) aided joint iterative detection and decoding receiver scheme based on simplify soft cancellation list (SSCANL) decoder (C-JIDD-SSCANL) was proposed. A polar code decoder in the C-JIDD-SSCANL receiver used the SSCANL algorithm. In this algorithm, decoding node deletion technology was used to simplify L times of soft cancellation (SCAN) decoding required by soft cancellation list (SCANL) algorithm by deleting frozen bit nodes, then the computational process of soft information update between nodes was simplified, and the computational complexity of decoding algorithm was reduced. The simulation results show that the SSCANL algorithm can obtain the same performance as the SCANL algorithm, and its computational complexity is reduced

收稿日期: 2022-01-06; 修回日期: 2022-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U1709220)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.U1709220)



compared with the SCANL algorithm. Compared with the joint iterative detection and decoding scheme based on SCAN decoder (JIDD-SCAN) and the CRC aided joint iterative detection and decoding scheme based on SCAN decoder (C-JIDD-SCAN), the performance of C-JIDD-SSCANL receiver scheme based on SSCANL decoder is improved by about 0.65 dB and 0.59 dB respectively when the bit error rate is 10^{-4} .

Key words: SCMA, polar code, SSCANL decoder, CRC aided joint iterative detection and decoding

0 引言

面对 5G 对高频谱效率和海量连接的需求,非正交多址(non-orthogonal multiple access, NOMA)技术受到了广泛关注^[1]。目前,已经有许多 NOMA 方案,如稀疏码多址接入(sparse code multiple access, SCMA)^[2]、图样分割多址接入^[3]、多用户共享接入^[4]等。在这些 NOMA 技术中,SCMA 方案通过引入稀疏码本实现了更有效的用户资源分配以及更好的频谱利用率。

随着极化码的提出与广泛的应用,基于极化码的 SCMA 系统吸引了大量的关注。文献[5]首次提出了联合检测译码(joint detection and decoding, JDD)接收机方案,该方案将极化码因子图与 SCMA 因子图联合,实现内部消息交换。与分离检测译码(separate detection and decoding, SDD)接收机相比,该方案极大地提高了 SCMA 系统性能。文献[6]提出通过调用一种新型的软输入软输出编码,实现在 SCMA 检测器与连续消除(successive cancellation, SC)译码器^[7]之间交换外部消息。通过适当次数的迭代后,性能可得到显著提升。文献[8-9]在联合因子图的基础上,提出了基于软消除(soft cancellation, SCAN)译码^[10]的联合迭代检测译码接收机(joint iterative detection and decoding based on SCAN decoder, JIDD-SCAN)方案。该方案显著提高了 polar-SCMA 系统误码率性能。文献[11]比较了采用不同极化码译码器的 JIDD 接收机误码率性能。文献[12]提出了基于 SCAN 译码的串行循环冗余校验(cyclic redundancy check, CRC)辅助联合迭代检测译码接收机(serial CRC aided joint iterative detection

and decoding based on SCAN decoder, S-C-JIDD-SCAN)方案,它将基于 SCAN 译码的串行联合迭代检测译码(serial joint iterative detection and decoding based on SCAN decoder, S-JIDD-SCAN)方案和基于 SCAN 译码的 CRC 辅助联合迭代检测译码(CRC aided joint iterative detection and decoding based on SCAN decoder, C-JIDD-SCAN)方案结合,从而得到比 JIDD-SCAN 方案更好的误码率性能,但是它的性能仍然受 SCAN 译码器的限制。文献[13]提出的软消除列表(soft cancellation list, SCANL)译码算法可实现比 SCAN 译码算法更好的误码率性能,但它的缺点是计算复杂度偏高。

本文在 SCANL 算法的基础上,通过译码节点删除技术,简化译码因子图中软信息更新计算过程,在保证译码性能几乎一致的情况下,降低算法的计算复杂度,得到简化软消除列表(simplify soft cancellation list, SSCANL)算法。然后将 SSCANL 算法应用于接收机的极化码译码器,提出了基于 SSCANL 译码器的 CRC 辅助联合迭代检测译码接收机(CRC aided joint iterative detection and decoding based on SSCANL decoder, C-JIDD-SSCANL)方案,并仿真分析了 JIDD-SCAN、S-C-JIDD-SCAN、C-JIDD-SSCANL 等接收机方案的误码率性能以及复杂度。

1 极化码 SCANL 译码算法

文献[10]首次提出了 SCAN 算法,该算法基于因子图进行软信息迭代传递译码。对于码长为 N 的极化码,其因子图由 n ($n=\lg N$) 个阶段构成。软信息通过因子图双向传递,分为左信息与右信

息。码长为 8 的 SCAN 译码因子图如图 1 所示, 因子图最右列节点上左信息 λ 初始化为信道接收信息 (LLR), 最左列节点上右信息 β 初始化如式 (1) 所示。

$$\beta_i = \begin{cases} \infty, i \in F \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中, i 为当前节点索引, F 为冻结位索引集合。当左、右信息到达因子图两侧, 一次迭代译码完成。

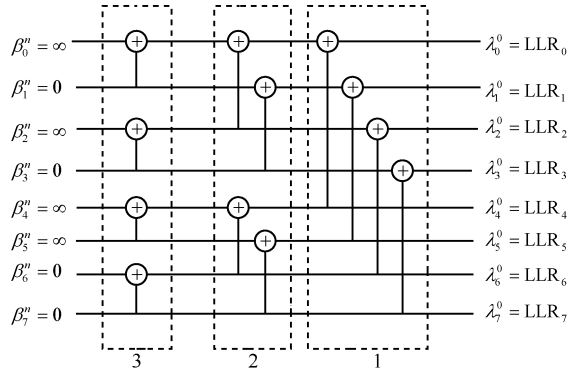


图 1 码长为 8 的 SCAN 译码因子图

SCANL 译码算法是在 SCAN 算法基础上的进一步改进^[13]。通过对因子图的 n 个阶段进行排列组合可得 $n!$ 种等效因子图, 每种因子图由排列 π_i 定义^[14]。SCANL 译码因子图置换过程如图 2 所示。基于排列 π_i 之间汉明距离, 选择具有较大汉明距离的 L 个排列, 即 $\Pi(\pi) = \{\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_{L-1}\}$, 从而获得对应的 L 种不同等效因子图。排列之间汉明距离由式 (2) 计算。

$$HD(\pi_a, \pi_b) = n + 1 - \sum_{s=0}^n \delta_{\pi_a(s), \pi_b(s)} \quad (2)$$

其中, δ 为克罗内克脉冲函数, π_a 、 π_b 分别表示两个不同的排列。当获得信道接收信息后, SCANL 算法执行 L 次不同等效因子图形式的

SCAN 译码, 每次译码返回一个路径度量值 PM_i , 选择 $PM_{i, \min}$ 对应的译码比特序列作为 SCANL 译码结果输出。 PM_i 更新规则如式 (3) 所示。

$$PM_i = PM_i - \lambda_i, i \in F \quad (3)$$

其中, λ_i 表示冻结位 i 对应节点的左信息。

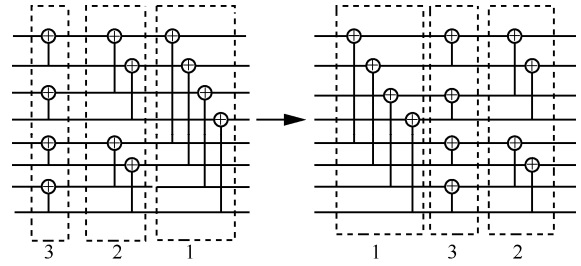


图 2 SCANL 译码因子图置换过程

2 基于联合迭代检测译码接收机的 polar-SCMA 系统

基于 C-JIDD-SCAN 接收机的 polar-SCMA 系统如图 3 所示, 采用了 CRC 提前停止条件。在 C-JIDD-SCAN 接收机中, 信道接收信号在 SCMA 检测器与 SCAN 译码器之间迭代交换, 即 SCMA 检测器在经过内部迭代后输出外部信息, 并将其直接作为 SCAN 译码器的先验信息输入, 反之亦然。当 SCAN 译码器输出码字满足 CRC 校验, 则立即停止联合迭代并返回译码码字, 从而减少迭代次数, 提升系统检测性能^[12]。

3 基于 SSCANL 译码器的 CRC 辅助联合迭代检测译码接收机

3.1 SSCANL 译码算法

首先, 本文依据图 2 所示等效因子图对因子图中的码字进行排列置换, 因子图置换与码字置换之间的映射过程如图 4 所示。

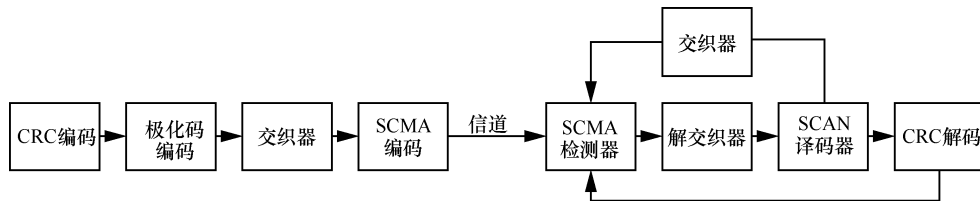


图 3 基于 C-JIDD-SCAN 接收机的 polar-SCMA 系统

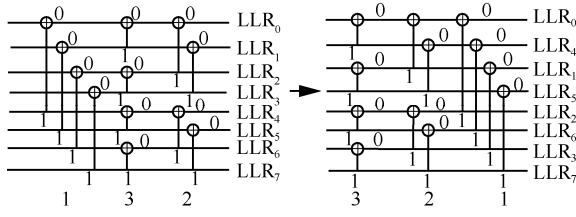


图4 因子图置换与码字置换之间的映射过程

由图4可得因子图阶段排列与码字排列之间存在对应关系。因此,与SCANL译码算法不同的是,本文提出的SSCANL译码算法依据排列集合 $\Pi(\pi)$ 对信道接收信息 y 进行相应置换,获得 L 种不同排列的信道接收信息 $\{y_1, y_2, \dots, y_L\}$,并对其进行依次执行基于译码节点删除技术的简化SCAN译码。

译码节点删除技术的描述如下。在译码初始化阶段,与传统SCAN算法不同,本文提出将因子图最左列中冻结位节点上右信息 β_i^n 初始化为一个较大正整数 γ ,其余节点上右信息依旧设为0,如式(4)所示。

$$\beta_i^n = \begin{cases} \gamma, & i \in F \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $0 \leq i \leq N-1$, F 为冻结位索引集合。

初始化完成后,开始迭代译码。以单位因子图为例,单位因子图软信息传递过程如图5所示,其中需要传递 λ_i^t 、 λ_{i+1}^t 、 β_i^{t+1} 、 β_{i+1}^{t+1} 共4个软信息值, t 表示当前节点所在因子图阶段数且有 $0 \leq t \leq (\text{lb}N - 1)$,其余软信息值已知。

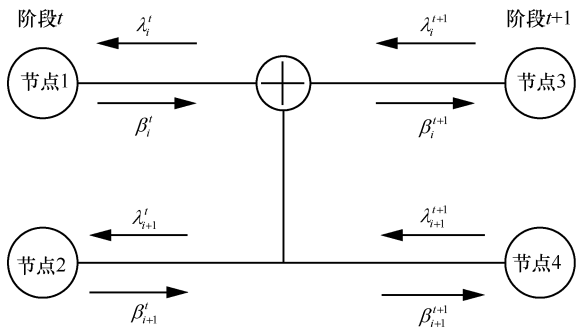


图5 单位因子图软信息传递过程

根据 γ 对单位因子图中节点进行分类,为了方便描述,将冻结位节点表示为黑色节点,信息

位节点表示为白色节点,未判决节点表示为灰色节点。由于节点3、节点4上右信息未知,因此节点3、节点4即未判决节点。

(1)若节点1、节点2上的右信息 β_i^t 、 β_{i+1}^t 均小于 γ ,则判决节点1、节点2为信息位节点。其软信息更新过程与SCAN算法一致,更新规则如下。

$$\lambda_i^t = f(\lambda_i^{t+1}, \lambda_{i+1}^{t+1} + \beta_{i+1}^t) \quad (5)$$

$$\lambda_{i+1}^t = \lambda_{i+1}^{t+1} + f(\lambda_i^{t+1}, \beta_i^t) \quad (6)$$

$$\beta_i^{t+1} = f(\beta_i^t, \lambda_{i+1}^{t+1} + \beta_{i+1}^t) \quad (7)$$

$$\beta_{i+1}^{t+1} = \beta_{i+1}^t + f(\lambda_i^{t+1}, \beta_i^t) \quad (8)$$

其中, $f(x, y) = \text{sign}(x) \times \text{sign}(y) \times \min(|x|, |y|)$ 。

(2)若节点1上的右信息 $\beta_i^t \geq \gamma$,节点2上的右信息 $\beta_{i+1}^t < \gamma$,则判决节点1为冻结位节点,节点2为信息位节点。此时可简化软信息更新计算过程中与右信息 β_i^t 有关的计算步骤,近似为对节点1的删除处理,省略节点1后的软信息更新过程如图6所示。

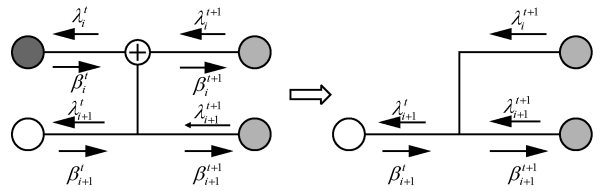


图6 省略节点1后的软信息更新过程

根据图6可对式(6)、式(8)进行简化得:

$$\lambda_{i+1}^t = \lambda_{i+1}^{t+1} + \lambda_i^{t+1} \quad (9)$$

$$\beta_{i+1}^{t+1} = \beta_{i+1}^t + \lambda_i^{t+1} \quad (10)$$

(3)若节点1上的右信息 $\beta_i^t < \gamma$,节点2上的右信息 $\beta_{i+1}^t \geq \gamma$,则判决节点1为信息位节点,节点2为冻结位节点。与(2)同理,近似将节点2删除,省略节点2后的软信息更新过程如图7所示。

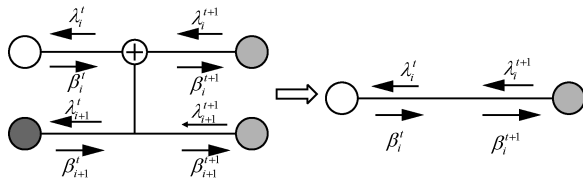


图 7 省略节点 2 后的软信息更新过程

此时根据图 7 对式 (5)、式 (7) 进行简化得:

$$\lambda_i^t = \lambda_{i+1}^{t+1} \quad (11)$$

$$\beta_i^{t+1} = \beta_i^t \quad (12)$$

(4) 若节点 1、节点 2 上的右信息 β_i^t 、 β_{i+1}^t 均大于或等于 γ ，则判决节点 1、节点 2 为冻结位节点。此时简化后左信息 λ_{i+1}^t 、 λ_i^t 更新计算过程如式 (9)、式 (11)，右信息 β_i^{t+1} 、 β_{i+1}^{t+1} 则直接与节点 1、节点 2 上的右信息 β_i^t 、 β_{i+1}^t 相等。

从上述译码过程可知，通过简化与因子图中冻结位节点上右信息有关的软信息更新计算步骤，从而近似对冻结位节点进行删除，进而降低算法的计算复杂度。当码率越低，冻结位越多时，其计算复杂度降低效果越好。SSCANL 算法具体过程如算法 1 所示，其中置换简化 SCAN 译码 (permuted simplify SCAN decode) 子函数如算法 2 所示。

算法 1 SSCANL 算法

输入 信道接收信息 y ，迭代次数 T ，置换排列集合 π_i ，冻结位索引集合 F

输出 译码向量 $\hat{u}$

$PM \leftarrow \infty$

for $i = 0 : L - 1$

$PM_i, u_i \leftarrow \text{permuted simplifySCAN decode}$

(y, T, π_i, F)

if $PM_i < PM$

$PM \leftarrow PM_i$

$\hat{u} \leftarrow \pi_i^{-1}(\hat{u}_i)$

end if

end for

算法 2 置换简化 SCAN 译码

输入 信道接收信息 y ，迭代次数 T ，置换排

列集合 π_i ，冻结位索引集合 F

输出 译码估计向量 $\hat{u}_i$ ，路径度量值 PM_i

#初始化阶段

$PM = 0$

$\lambda_i^0 \leftarrow \pi_i(y)$

for $i = 0 : N - 1$

if $\pi_i(i) \in F$

$\beta_i^n \leftarrow \gamma$

else

$\beta_i^n \leftarrow 0$

end for

#译码阶段

for $t = 0 : T - 1$

for $i = 0 : N - 1$

if $i \in F$

对与 β_i 有关的左、右信息更新计算进行简化

else

左、右信息更新计算过程如式 (5) ~ 式 (8)

if $\pi_i(i) \in F$

$\hat{u}_i \leftarrow 0$

$PM_i = PM - \lambda_i$

else

对 $\lambda_i^n + \beta_i^n$ 进行判决，返回 $\hat{u}_i$

end for

end for

3.2 基于 SSCANL 译码器的 CRC 辅助联合迭代检测译码接收机

本节将 SSCANL 译码算法应用于 polar-SCMA 系统，从而得到与 C-JIDD-SCAN 接收机不同的 C-JIDD-SSCANL 接收机，C-JIDD-SSCANL 接收机结构如图 8 所示。

SSCANL 译码器由预处理器、 L 个简化 SCAN 译码器以及判决器构成。当 SCMA 检测器的外部信息经过解交织生成解交织信息 L_v 后， L_v 不再直接作为译码器的初始化信息，而先经过预处理器进行预处理，即将 L_v 依据排列集合 $\Pi(\pi)$ 进行相

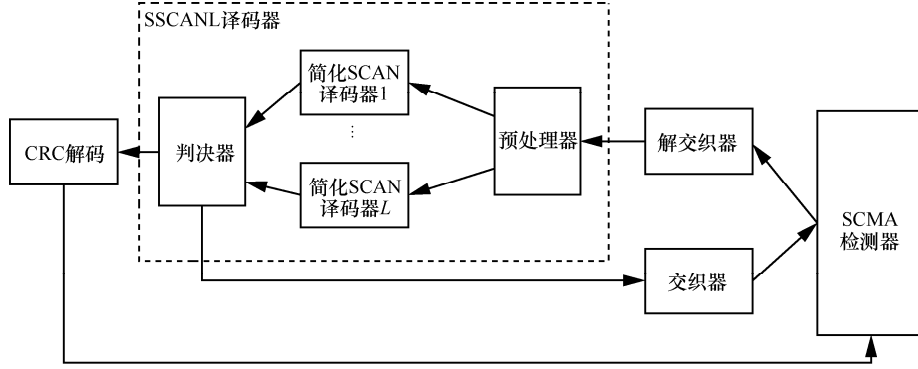


图8 C-JIDD-SSCANL 接收机结构

应置换，生成 L 种不同排列组合形式的 L_v 信息集合 $\Pi(L_v)$ ，如式 (13) 所示。

$$\Pi(L_v) = \{L_v^0, L_v^1, \dots, L_v^{L-1}\} = \Pi[\pi_i(L_v)] \quad (13)$$

然后用 $\Pi(L_v)$ 中元素依次对 L 个具有相同因子图形式的简化 SCAN 译码器进行初始化。初始化完成后， L 个简化 SCAN 译码器并行译码。当译码器全部译码完成后，获得估计比特序列集合 $\Pi(\hat{\mathbf{u}}) = \{\hat{\mathbf{u}}_0, \dots, \hat{\mathbf{u}}_{L-1}\}$ 以及对应的路径度量值集合 $\Pi(\text{PM}) = \{\text{PM}_0, \dots, \text{PM}_{L-1}\}$ 并将其送入判决器，选择出集合 $\Pi(\text{PM})$ 中最小路径度量值 $\text{PM}_{\min}$ ，该过程可表示为：

$$\text{PM}_{\min} = \min\{\text{PM}_0, \dots, \text{PM}_{L-1}\} \quad (14)$$

根据 $\text{PM}_{\min}$ 输出其对应的估计比特序列 $\hat{\mathbf{u}}$ 进行 CRC 解码，同时输出外部信息 $L_{e,\text{polar}}$ 通过交织器再次送入 SCMA 检测器中，完成一次外部迭代。外部信息 $L_{e,\text{polar}}$ 可表示为：

$$L_{e,\text{polar}} = \beta_{n+1, c_v^{(l-1)Q+m}} + \alpha \frac{\overline{\beta_{n+1, c_v^{(l-1)Q+m}}}}{\overline{\lambda_{n+1, c_v^{(l-1)Q+m}}}} \lambda_{n+1, c_v^{(l-1)Q+m}} \quad (15)$$

其中， $\overline{\beta_{n+1, c_v^{(l-1)Q+m}}}$ 与 $\overline{\lambda_{n+1, c_v^{(l-1)Q+m}}}$ 分别表示 $\beta_{n+1, c_v^{(l-1)Q+m}}$ 与 $\lambda_{n+1, c_v^{(l-1)Q+m}}$ 的平均值， α 为阻尼因子。若 CRC 检验成功，锁定当前 $\hat{\mathbf{u}}$ ，输出标记信息送入 SCMA 检测器，跳出此次迭代过程。

C-JIDD-SSCANL 算法具体过程如算法 3 所示，其中， g_j 表示第 j 个函数节点， q_i 表示第 i 个变量节点， $\{S_j^g\}$ 表示与 g_j 相连的变量节点集合，

$\{S_i^q\}$ 表示与 q_i 相连的函数节点集合。 $\{S_j^g \setminus i\}$ 与 $\{S_i^q \setminus j\}$ 分别表示排除 q_i 的集合 $\{S_j^g\}$ 和排除 g_j 的集合 $\{S_i^q\}$ 。

算法 3 CRC 辅助联合迭代检测与 SSCANL 译码算法

输入 接收端接收信号 $(y_{l,1}, y_{l,2}, \dots, y_{l,J})^T$ ，信道增益 $(h_v^{l,1}, h_v^{l,2}, \dots, h_v^{l,J})^T$ ，码字符号 $(x_v^{l,1}, x_v^{l,2}, \dots, x_v^{l,J})^T$ ，噪声功率谱密度 N_0 ，外部迭代次数 $I_{C\text{-JIDD}}$

输出 译码向量 $\hat{\mathbf{u}}$

初始化: $I_{q_i \rightarrow g_j} = 1/M$

for iter_num = 1 : $I_{C\text{-JIDD}}$

for $l = 1 : N/Q$

for $v = 1 : V$

$$P(y_{l,j} | X_v^l, X_p^l) = \frac{1}{\pi \times N_0}$$

$$\exp\left(-\frac{1}{N_0} y_{l,j} - h_v^{l,j} x_v^{l,j} - \sum_p h_p^{l,j} x_p^{l,j2}\right)$$

$$I_{g_j \rightarrow q_i}(X_v^l) = \sum_{x_p^l} \left\{ P(y_{l,j} | X_v^l, X_p^l) \prod_p I_{q_p \rightarrow g_j}(X_p^l) \right\}$$

$$P_{e,\text{SCMA}}(b_v^{(l-1)Q+m} = x) =$$

$$\sum_{X_{v,x}^l \in \{X_v^l | q_v^m = x\}} \prod_{t \in \{S_i^q\}} I_{g_t \rightarrow q_i}(X_{v,x}^l),$$

$\{X_v^l | q_v^m = x\}$ 满足映射

$$\{g_v : (q_v^1, \dots, q_v^{m-1}, x, q_v^{m+1}, \dots, q_v^Q) \rightarrow X_v^l\},$$

$$x \in \{0, 1\}, 1 \leq m \leq Q$$

$$L_{e,\text{SCMA}}(b_v^{(l-1)Q+m}) = \lg \frac{P_{e,\text{SCMA}}(b_v^{(l-1)Q+m} = 0)}{P_{e,\text{SCMA}}(b_v^{(l-1)Q+m} = 1)}$$

```

end for
end for
for  $v = 1:V$ 
    # SSCANL 译码
     $L_v = \Pi^{-1}(L_{e,SCMA}(b_v^{(l-1)Q+m}))$ 
     $L_v^i = \{L_v^0, L_v^1, \dots, L_v^{L-1}\} \leftarrow \Pi[\pi_i(L_v)]$ 
    将  $L_v^i$  依次输入简化 SCAN 译码器中进行
    译码, 返回集合  $\hat{u}_i$  以及  $PM_i$ 
     $PM_{\min} = \min\{PM_0, \dots, PM_{L-1}\}$ 
    将  $PM_{\min}$  对应估计比特序列  $\hat{u}$  送入 CRC
    校验
    计算输出外部信息  $L_{e,polar}$ , 如式 (15) 所示
    if 通过 CRC 校验
        锁定  $\hat{u}$ , 输出标记信息, 然后跳
        出此次迭代
    end if
     $L_{p,SCMA} = \Pi(L_{e,polar})$ 
end for
 $I_{q_i \rightarrow g_j}(X_v^i) = \Pi_{m=1}^Q \frac{(L_{p,SCMA})^{1-h}}{1 + L_{p,SCMA}} \times \Pi_t I_{g_i \rightarrow q_i}(X_t^i)$ ,
 $t \in \{S_i^q \setminus j\}$ 
end for

```

在计算 SSCANL 译码器输出的外部信息过程中引入了一个重要参数, 即阻尼因子 α , 它的取值将会影响 C-JIDD-SSCANL 接收机的误码率性能。因此本文在不同码长、码率、信噪比情况下, 对 α 值进行仿真。不同阻尼因子下 C-JIDD-SSCANL 接收机的误码率性能如图 9 所示。在码率为 $\frac{1}{2}$ 的情况下, α 为 0.8 时接收机性能最佳; 而在码率为 $\frac{1}{3}$ 的情况下, α 为 0.4 时性能最佳。

4 结果分析

本节将对 JIDD-SCAN^[8-9]、C-JIDD-SCAN^[12]、S-C-JIDD-SCAN^[12]、C-JIDD-SCANL 以及本文提出的 C-JIDD-SSCANL 等接收机方案的误码率性

能以及计算复杂度进行对比分析。为了便于描述, 令 JIDD-SCAN、C-JIDD-SCAN、S-C-JIDD-SCAN、C-JIDD-SCANL 以及 C-JIDD-SSCANL 这几种接收机方案简称方案一~方案五。

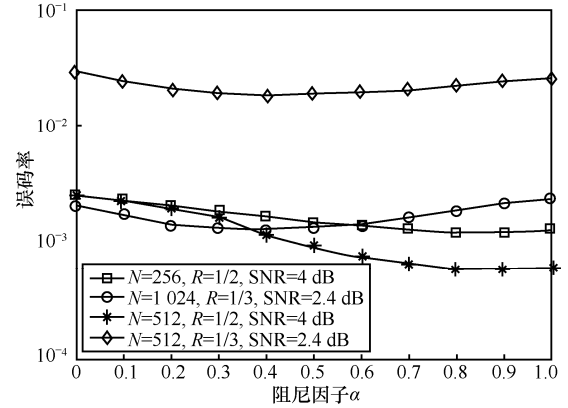


图 9 不同阻尼因子下 C-JIDD-SSCANL 接收机的误码率性能

4.1 仿真结果分析

本文对比分析了 SCAN 算法^[10]、SCANL 算法^[13]以及 SSCANL 算法的译码性能。码长 512 在不同码率情况下的性能比较如图 10 所示, 本文提出的 SSCANL 算法的误码率性能曲线始终与 SCANL 算法的误码率性能曲线几乎重合, 说明 SSCANL 算法译码性能并没有明显降低, 特别是在低信噪比时与 SCANL 算法性能基本一致, 但降低了计算复杂度; 与 SCAN 算法相比, 误码率性能得到了显著的提升。

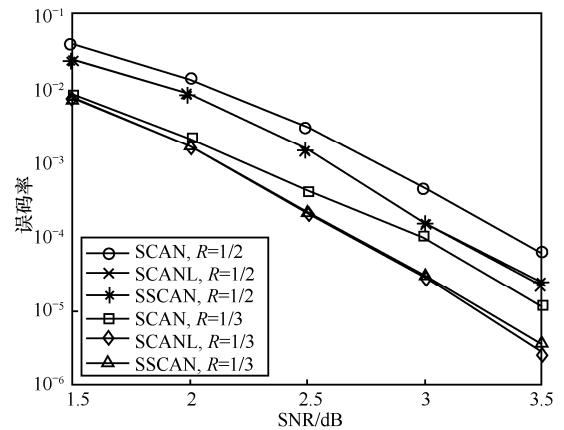


图 10 码长 512 在不同码率情况下的性能比较

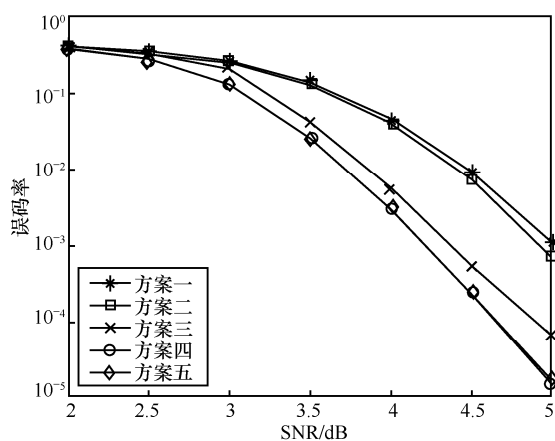
接下来的仿真结果将对分析不同码长 N 、码率 R 、迭代次数 $iter$ 情况下 5 种接收机方案的误



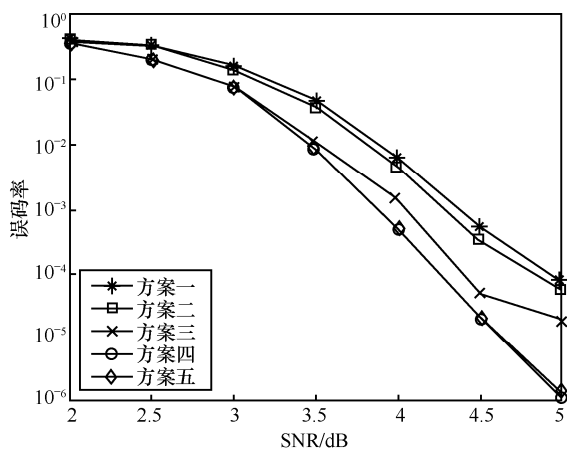
码率性能如图 11 所示。

$N = 256$ 、 $R = \frac{1}{2}$ 、 $\text{iter} = 3$ 情况下性能比较如图 11 (a) 所示。与方案一、方案二相比, 方案五在误码率为 10^{-3} 时可分别获得约 0.79 dB、0.73 dB 的性能增益; 与方案三相比, 方案五在误码率为 10^{-4} 时可获得约 0.24 dB 的性能增益。 $N = 256$ 、 $R = \frac{1}{2}$ 、 $\text{iter} = 5$ 情况下性能比较如图 11 (b) 所示。与方案一、方案二、方案三相比, 方案五在误码率为 10^{-4} 时可分别获得约 0.65 dB、0.59 dB、0.15 dB 的性能增益。

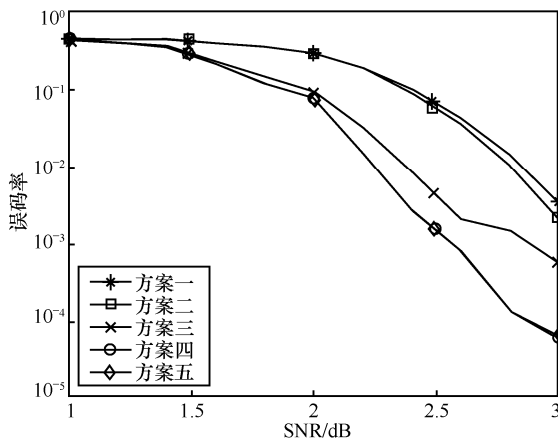
$N = 1024$ 、 $R = \frac{1}{3}$ 、 $\text{iter} = 3$ 情况下性能比较如



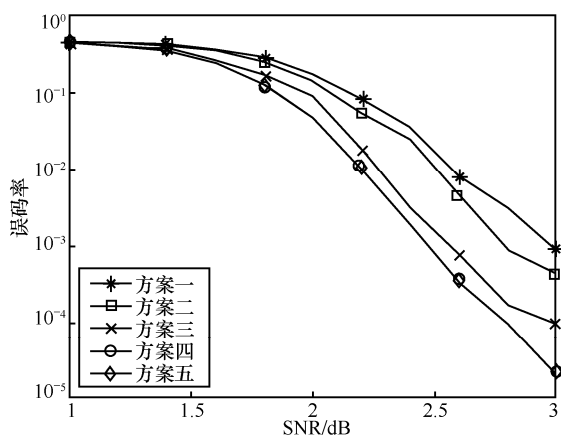
(a) $N = 256$ 、 $R = \frac{1}{2}$ 、 $\text{iter} = 3$



(b) $N = 256$ 、 $R = \frac{1}{2}$ 、 $\text{iter} = 5$



(c) $N = 1024$ 、 $R = \frac{1}{3}$ 、 $\text{iter} = 3$



(d) $N = 1024$ 、 $R = \frac{1}{3}$ 、 $\text{iter} = 5$

图 11 不同不同码长 N 、码率 R 、迭代次数 iter 情况下 5 种接收机方案的误码率性能

图 11 (c) 所示。与方案一、方案二相比, 方案五在误码率为 10^{-2} 时可分别获得约 0.6 dB、0.56 dB 的性能增益; 与方案三相比, 方案五在误码率为 10^{-3} 时可获得约 0.32 dB 的性能增益。 $N = 1024$ 、 $R = \frac{1}{3}$ 、 $\text{iter} = 5$ 情况下性能比较如图 11 (d) 所示。与方案一、方案二相比, 方案五在误码率为 10^{-3} 时可分别获得约 0.5 dB、0.32 dB 的性能增益; 与方案三相比, 方案五在误码率为 10^{-4} 时可获得约 0.2 dB 的性能增益。

从图 11 的仿真结果来看, 在不同 N 、 R 、 iter 情况下, 方案四与方案五的误码率性能曲线始终保持几乎重合的状态, 说明方案五的性能可与方案四保持一致, 但降低了计算复杂度。

4.2 计算复杂度分析

polar-SCMA 系统中接收机的计算复杂度主要取决于 SCMA 检测器和极化码译码器的计算复杂度。本文根据 SCMA 检测器与极化码译码器产生的加法运算次数、乘法运算次数, 分析了方案一~方案五的计算复杂度。已知 SCMA 码本中码字数量为 M 、polar-SCMA 系统中正交资源数量为 K 、每个正交资源上的复用用户数为 n_v 、极化码码长为 N 。

对于 SCMA 检测器, 不同接收机方案下检测器计算复杂度见表 1。

表 1 不同接收机方案下检测器计算复杂度

接收机方案	加法运算次数	乘法运算次数
方案一	$I_{\text{JDD}} \times K \times n_v \times M^{n_v} \times (2n_v - 1)$	$I_{\text{JDD}} \times K \times n_v^2 \times M^{n_v}$
方案二、 方案四、 方案五	$I_{\text{C-JDD}} \times K \times n_v \times M^{n_v} \times (2n_v - 1)$	$I_{\text{C-JDD}} \times K \times n_v^2 \times M^{n_v}$
方案三	$I_{\text{C-JDD}} \times K \times n_v \times [M^{n_v} \times (2n_v - 1) + 2M + 1]$	$I_{\text{C-JDD}} \times K \times n_v^2 \times M^{n_v}$

表 1 中 I_{JDD} 、 $I_{\text{C-JDD}}$ 分别表示检测器与极化码译码器之间的外部迭代次数、CRC 辅助后外部迭代次数, 且有 $I_{\text{C-JDD}} < I_{\text{JDD}}$ 。

对于极化码译码器, 本文整理了不同码率情况下极化码译码器计算复杂度见表 2。

表 2 不同码率情况下极化码译码器计算复杂度

接收机方案	加法运算次数		乘法运算次数	
	$R = \frac{1}{2}$	$R = \frac{1}{3}$	$R = \frac{1}{2}$	$R = \frac{1}{3}$
方案一、 方案二、 方案三	$2N\text{lb}N$	$2N\text{lb}N$	$4N\text{lb}N$	$4N\text{lb}N$
方案四	$2L\text{lb}N$	$2L\text{lb}N$	$4L\text{lb}N$	$4L\text{lb}N$
方案五	$L\text{lb}N$	$2L\text{lb}(N/3)$	$2L\text{lb}N$	$4L\text{lb}(N/5)$

综上, 本文比较了不同码长、码率情况下方案一~方案五的计算复杂度如图 12 所示。方案四与本文提出的方案五各自产生的加法运算次数、乘法运算次数均大于方案一~方案三。从仿真数

据来看, 当码长为 256、码率为 $\frac{1}{2}$ 时, 方案四产生的加法运算次数与乘法运算次数分别为 17 536、33 563, 而方案五产生的加法运算次数与乘法运算次数分别为 9 344、17 152, 因此相较方案四, 方案五可减少约 47% 的加法运算以及 49% 的乘法运算; 而当码长为 1 024、码率为 $\frac{1}{3}$ 时, 相较方案四, 方案五可减少约 66% 的加法运算以及 78% 的乘法运算。

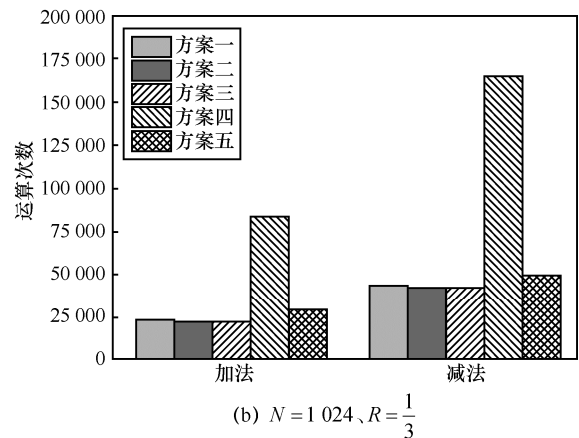
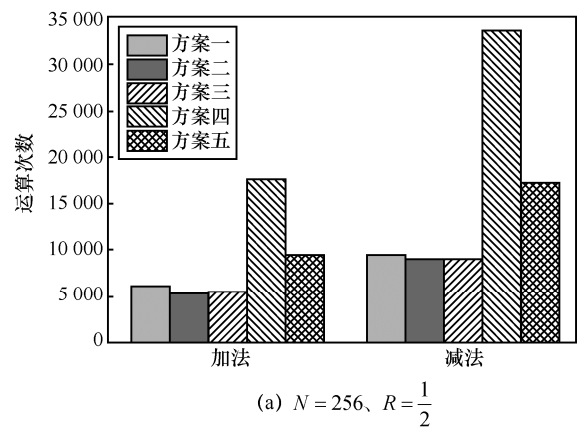


图 12 不同码长、码率情况下方案一~方案五的计算复杂度

5 结束语

本文首先提出了一种改进 SCANL 算法的技术即译码节点删除技术。基于这种改进技术, 提出了 SSCANL 算法。SSCANL 算法在保持与 SCANL 算法一致性能的前提下, 其计算复杂度与

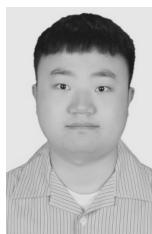


SCANL 算法相比得到了一定程度的降低。为了提高现有的接收机性能,本文还提出了 C-JIDD-SSCANL 接收机方案。C-JIDD-SSCANL 接收机中极化码译码器采用 SSCANL 算法,利用 SSCANL 算法优越的译码性能,加快接收机的收敛,提高系统性能。仿真结果表明,C-JIDD-SSCANL 接收机方案的误码率性能显著优于 JIDD-SCAN、C-JIDD-SCAN、S-C-JIDD-SCAN 等接收机方案。

参考文献:

- [1] SAITO Y, KISHIYAMA Y, BENJEBBOUR A, et al. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access[C]//Proceedings of 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [2] 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.
- [3] LI S F, SUN C, JIN X F. Research on PDMA access technology for 5G communication[C]//Proceedings of 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology. Piscataway: IEEE Press, 2020: 519-523.
- [4] YUAN Z F, YU G H, LI W M, et al. Multi-user shared access for Internet of Things[C]//Proceedings of 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [5] JING S S, YANG C, YANG J M, et al. Joint detection and decoding of polar-coded SCMA systems[C]//Proceedings of 2017 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [6] MU H, TANG Y H, LI L, et al. Polar coded iterative multiuser detection for sparse code multiple access system[J]. China Communications, 2018, 15(11): 51-61.
- [7] ARIKAN E. Channel polarization: a method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(7): 3051-3073.
- [8] PAN Z P, LI E B, ZHANG L, et al. Design and optimization of joint iterative detection and decoding receiver for uplink polar coded SCMA system[J]. IEEE Access, 2018, 6: 52014-52026.
- [9] PAN Z P, LI E B, WEN L, et al. Joint iterative detection and decoding receiver for polar coded SCMA system[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [10] FAYYAZ U U, BARRY J R. Low-complexity soft-output decoding of polar codes[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(5): 958-966.
- [11] ABIDI I, HIZEM M, AHRIZ I, et al. Performances analysis of polar codes decoding algorithms over polar-coded SCMA system[C]//Proceedings of 2019 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [12] ZHANG Y X, GE W P, ZHANG P J, et al. The optimization scheme for joint iterative detection and decoding of polar coded SCMA system[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 58: 102283.
- [13] PILLET C, CONDO C, BIOGLIO V. SCAN list decoding of polar codes[C]//Proceedings of ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [14] KORADA S B. Polar codes for channel and source coding[R]. EPFL, 2009.

[作者简介]



刘重阳(1997—),男,杭州电子科技大学硕士生,主要研究方向为信道编码。



郭锐(1980—),男,博士,杭州电子科技大学副教授,主要研究方向为无线通信、信道编码。