

# 一种基于置信度稳定性的 SCMA 多用户检测算法

李 茂<sup>1,2</sup> 周志刚<sup>1</sup> 王 涛<sup>1,2</sup>

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 上海 200050)<sup>1</sup> (中国科学院大学 北京 100049)<sup>2</sup>

**摘 要** 稀疏码分多址(即非正交多址)(Sparse Code Multiple Access, SCMA)技术,具有在有限频谱资源下过载通信的特点,能够显著提升频谱利用率。得益于稀疏码分多址码本的稀疏性,消息传递算法(Message Passing Algorithm, MPA)成为经典多用户检测算法。在传统 MPA 方法中,尽管与最大似然译码具有相近的误比特率(Bit Error Ratio, BER)性能,但指数运算的复杂度仍然很高。据此,设计一种基于置信度的动态边缘选择更新方法,以减少不必要的节点运算。每次迭代中,利用因子图模型中功能节点到变量节点的置信度稳定性信息,动态判定是否需要节点更新运算。仿真结果表明,动态边缘选择方案使得算法的复杂度得到显著降低,并且能够与 BER 取得良好的均衡。

**关键词** 稀疏码分多址,消息传递算法,动态边缘选择,置信度传播

中图分类号 TN929.5 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.01.021

## Multuser Detection Scheme for SCMA Systems Based on Stability of Belief Propagation

LI Mao<sup>1,2</sup> ZHOU Zhi-gang<sup>1</sup> WANG Tao<sup>1,2</sup>

(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)<sup>1</sup>

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)<sup>2</sup>

**Abstract** The main feature of sparse code multiple access, i. e., non-orthogonal multiple access, is supported by overloaded connection with limited resources, which can greatly improve the spectrum utilization. Thanks to the sparsity of the SCMA codebook sets, MPA becomes a basic receiver decoding algorithm. Although there exists a similar bit error ratio (BER) performance between the maximum likelihood (ML) detection scheme and traditional MAP method, the complexity of the exponential calculation is still high. To further reduce the complexity problem, a novel low-complexity detection algorithm based on dynamic edge selection strategy was proposed to reduce unnecessary node operation. In each iteration, the belief propagation stability information of the function node to the variable node in the factor graph model is used to dynamically determine whether a node update operation is required. The simulation results show that the complexity of the dynamic edge selection algorithm is significantly reduced, and the BER can be well balanced.

**Keywords** Sparse code multiple access, Message passing algorithm, Dynamic edge-selection, Belief propagation

## 1 前言

随着移动和物联网(Internet of Things, IoT)设备数量呈指数型增长,未来 5G 蜂窝网需要具备大规模连接、超密度及低延迟的特性,以完成对不同应用场景的支持<sup>[1]</sup>。现阶段 4G 通信主要通过 OFDM 与 MIMO 联合调制的方式提高频谱利用率,但 OFDM 本身的正交性及 MIMO 天线技术在空间分集、复用和波束赋形 3 种模式的冲突,使其不具备过载通信的能力<sup>[2-3]</sup>。作为编码域非正交技术,稀疏码分多址在大规模连接和过载通信方面表现出巨大的优势,成为 5G 空口技术的主要候选者之一<sup>[4]</sup>。

低密度签名(Low Density Signature, LDS)作为一种非正交技术,是 CDMA 系统在增加低密度扩频序列后的演进技术,使过载率达到 200% 以上,并且使用迭代多用户检测方式来降低算法复杂度<sup>[5]</sup>。SCMA 的本质是基于 LDS 和 QAM 调制技术的联合改进,综合了 LDS 的过载通信能力和 QAM 的抗噪声性能<sup>[4,6]</sup>。与 LDS 技术的不同之处在于,SCMA 能够将二进制比特流根据预定义码本直接编码映射至多维复数域<sup>[6]</sup>。将 QAM 调制和 LDS 扩频矩阵组合成多维星座码本的形式,使得 SCMA 还能够提供额外的星座整型和编码增益,同时也为构建小尺寸星座图提供可能<sup>[7]</sup>。因此,参考 LDS 稀疏矩阵解码方式,将消息传递算法作为多用户检测基

收稿日期:2017-12-21 返修日期:2018-03-23 本文受国家高技术研究发展计划项目(2015AA01A704),上海市自然科学基金(15ZR1447600),中国科学院重点部署项目(KGFZD-135-18-013, YT)资助。

李 茂(1990—),男,硕士生,主要研究方向为稀疏扩频通信, E-mail: limao693@sina.com;周志刚(1974—),男,博士,研究员,主要研究方向为毫米波高速通信, E-mail: zhigang.zhou@mail.sim.ac.cn(通信作者);王 涛(1991—),男,硕士生,主要研究方向为波束赋形。

准译码算法能够提供近似最优的译码性能。

MPA 作为置信度传播(Belief Propagation, BP)算法的一个分支,能够有效解决因子图模型的概率问题<sup>[8]</sup>。因此,MPA 也有两个关键运算过程<sup>[9]</sup>:1)计算所有节点的局部信息(外信息);2)并行计算邻居节点的置信度传播概率。尽管标准消息传递算法(Standard Messaging Passing Algorithm, SMP)与最大似然(Maximum likelihood, ML)方案在误比特率方面有近似最优的性能<sup>[9]</sup>,但由于节点概率的计算复杂度随用户数量呈指数型增长,因此传统方案不适于大规模用户接入场景。文献[10]提出了对数域的消息传递算法(Log-domain Message Passing Algorithm, Log-MPA),将指数运算转换为和积运算。文献[11]提出基于部分边缘化消息传递算法(Partial Marginalization Message Passing Algorithm, PM-MPA)的方案,以减少资源变量向用户变量更新的维度。为进一步提高译码效率,文献[12]使用均值和方差作为反馈因子来评估瑞利衰落信道,动态选择边缘,在提高收敛速度的同时也带来了新的计算消耗。为进一步加快收敛速度,文献[13]提出基于串行节点的更新方案,即置信度信息在当前迭代中立即传播,不必等并行计算完成后统一在下次迭代更新。然而,基于 PM-MPA 的方案没能充分考虑节点置信度传播过程中的变化信息,特别是在高信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)情况下仍然无法保证 BER 性能。

以上述研究为基础,综合部分边缘选择策略<sup>[11]</sup>和基于信道自适应算法<sup>[12]</sup>,根据信息论中熵越大信息量越小的思想,提出基于边缘节点稳定性(迭代过程中节点的变化率)的置信度更新方案;同时,引入阈值因子  $\delta$  作为节点置信度稳定性的参数。此外,与 PM-MPA 相比,更新策略仅决定下次迭代中节点置信度是否更新,在不同 SNR 环境下更加灵活,且能保持较高的 BER 性能。仿真结果表明,所提方案能够在算法复杂度和 BER 方面保持均衡。

## 2 系统模型和传统 MPA

### 2.1 上行 SCMA 编解码链路

依据文献[11],搭建  $J$  个用户共享  $K$  个正交资源块的上行 SCMA 链路,通过加性高斯白噪声信道(AWGN)传输,具体过程如图 1 所示。数据  $d_j (j \in [1, J])$  经过 FEC Turbo 信道预编码后,对于用户  $j$  来说,通过对应的码字集  $x_j$  将二进制比特  $b^j$  直接映射到  $K$  维资源节点。其中,  $x_j$  由预定义的用户码本集合保证唯一性,每个用户码本为  $K \times 2^M$  的复数域矩阵,表示在  $M$  进制时对应的  $2^M$  个码字组合。 $v_m^j$  表示用户  $j$  的第  $m$  个比特符号( $j \in [1, J], m \in [1, M]$ ),  $c^k$  表示第  $k$  个资源块( $k \in [1, K]$ )。SCMA 中用户  $j$  的映射关系可以定义为:

$$f: \mathbf{B}^{\log_2(M)} \rightarrow \chi_j, x = f(b) \quad (1)$$

其中,  $\chi_j \subset \mathbb{C}^K, |\chi_j| = M$  表示用户  $j$  的符号数,  $\mathbf{B}$  和  $\mathbf{C}$  分别对应二进制集合和复数域。与 LDS 系统相似,映射码字集  $x_j$  具有稀疏性,即尽管码字大小为  $K$ ,但仅有  $d_j < K$  个非零元素叠加形成  $K$  维星座  $x_j$ 。上行链路 SCMA 编码器的结构可

以使用因子图矩阵  $F = (f_1, \dots, f_j)$  表示,矩阵的行列分别表示  $K$  资源层和  $J$  用户。当且仅当  $(F)_{j,k} = 1$ , 表示  $j$ -th 用户(VN)占用  $k$ -th 资源块(FN)。

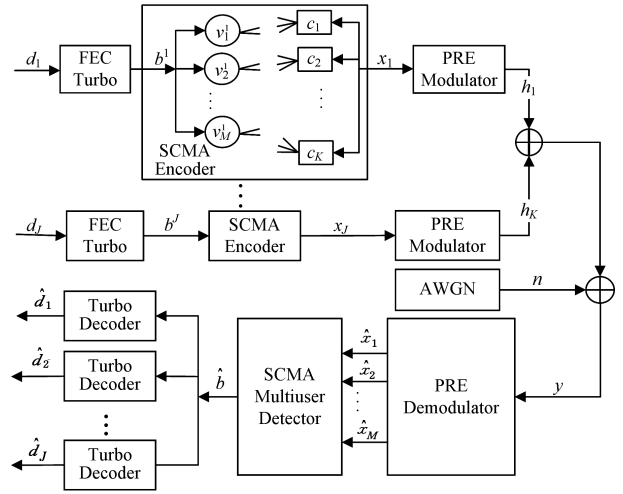


图 1  $J$  个用户共用  $K$  个资源块的 SCMA 简化上行链路图  
Fig. 1 Simplified SCMA up-link system when  $J$  users share

$K$  resources

本文假定  $J=6, K=4$ , 其对应的因子图矩阵  $F_{4 \times 6}$  如下:

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

此处使用  $d_j = \xi_k, d_v = \xi_j$  表示矩阵  $F$  的行列中‘1’的个数,并且由这两个参数决定 SCMA 系统的稀疏性,  $\lambda = J/K$  表示系统过载率。生成码字被分配到  $K$  个正交 OFDM 或 MIMO 调制后,经 AWGN 信道传输。

在基站侧,经同步后的接收信号  $y$  表示为:

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

其中,  $y = (y_1, \dots, y_K)^T$  表示接收信号向量,  $x^j = (x_1^j, \dots, x_K^j)^T, h_j = (h_{1,j}, \dots, h_{K,j})^T$  分别表示生成的信息向量及对应的信道矩阵(信道增益矩阵),  $n \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2 I)$  表示高斯白噪声向量。对于资源层  $k$ , 接收信号为:

$$y_k = \sum_{j=1}^J h_{k,j} x_k^j + n_k \quad (3)$$

由前文给出的稀疏矩阵可知,在资源层  $k$  上仅有  $d_f$  个用户码字的叠加,小于总的用户数。因此,式(3)可以简化为:

$$y_k = \sum_{j \in \xi_k} h_{k,j} x_k^j + n_k \quad (4)$$

其中,  $\xi_k$  为资源层  $k$  上非零元素的位置,即所有的用户集合,亦即  $\xi_k = \{j | x_k^j \neq 0\}$ 。

由 SCMA 系统原理可知,设计的关键点在于高效多维稀疏星座图和高效译码器。SCMA 系统引入的多维稀疏星座点,相比于 LDS 系统在调制、扩频方面减少运算量的同时,还能增加由多维星座产生的额外星座整形和编码增益,或者利用增益减小星座图的尺寸。由于 SCMA 系统改进对接收端的影响不大,可以使用传统 MAP 算法,或使用基于置信度传

播(BP)思想的消息传递算法(Message Passing Algorithm, MPA),以保证性能与效率的均衡。

## 2.2 经典 MPA 算法

在基站侧,假设在良好的信道估计下,SCMA 解码器在最大后验概率(Maximum A Posteriori, MAP)方式下的译码信号可以表示为:

$$\hat{X} = \arg \max_{x \in (\prod_{j=1}^J \{x_j\})} P(X|y) \quad (5)$$

其中,  $x \in (\prod_{j=1}^J \{x_j\}; \{x_1\} \times \dots \times \{x_J\}, \{x_j\}$  表示用户  $j$  的码本。

作为通信系统中最优的检测译码算法,以极大似然为基础的最大的后验概率(MAP)算法由于计算量随用户数量呈指数型增加,检测复杂度过高,因此不适用于大规模用户接入场景。基于 SCMA 码本在二分图中的稀疏性,和稀疏矩阵赋予的整型增益,可以使用基于迭代循环的 BP 消息传递算法逼近 MAP 的性能。

MPA 使用迭代的思想在功能节点 FNs 与变量节点 VNs 之间进行置信度信息的传播,即 FNs 到 VNs 的更新。注意, FNs 与 VNs 的连接情况节点由矩阵  $F$  唯一确定。因此, MPA 不再需要式(5)的穷尽搜索,在每个 FN 节点仅完成  $d_f$  次搜索。MPA 的详细译码过程如下。

1)初始化。接收侧根据用户码本计算每个变量节点 VNs 在不同信道上的条件概率,并给定功能节点  $j$  在变量节点  $k$  的信道增益  $h_{k,j} = 1$ 。

$$\Phi_{k,j}(x_{jm}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-\frac{1}{2\sigma^2} \|y_k - \sum_{i \in \xi_k} h_{k,i} x_{i,m}\|^2), \quad m=1, \dots, M \quad (6)$$

其中,  $\Phi_{k,j}(x_{jm})$  表示 VN  $j$  在 FN  $k$  上的置信度,  $x_{jm}$  ( $m=1, \dots, M$ ) 对应于 VN  $j$  不同的符号。  $\xi_k$  表示 FN  $k$  码字位置“1”的集合,  $\xi_j$  的含义相同。假定 VN 节点的先验概率相等,则:

$$I_{j \rightarrow k}^{\text{init}}(x_{jm}) = \frac{1}{M} \quad (7)$$

2)FN 节点更新。FN 节点联合邻接 VN 节点在上次迭代过程中的外信息,即式(6),计算当前置信度。

$$I_{k \rightarrow j}^t(x_{jm}) = \sum_{x_{jm}} \Phi_{k,j}(x_{jm}) \prod_{j \in \xi_k/j} I_{j \rightarrow k}^{t-1}(x_{jm}) \quad (8)$$

其中,  $I_{k \rightarrow j}^t(\cdot)$  表示第  $t$  次迭代中, FN  $k$  到 VN  $j$  的置信度更新。

3)VN 节点更新。VN 节点在进行外信息的和积运算后进行归一化操作。

$$I_{j \rightarrow k}^t(x_{jm}) = \text{normalize}(\prod_{k \in \xi_j/k} I_{k \rightarrow j}^{t-1}(x_{jm})) \quad (9)$$

4)估计与软输出。在式(8)和式(9)达到最大迭代次数  $t_{\max}$  的前提下, VN  $j$  的最终软输出估计结果为:

$$I_j(x_{jm}) = \prod_{k \in \xi_j} I_{k \rightarrow j}^{\max}(x_{jm}) \quad (10)$$

为清晰表述节点迭代更新的细节,根据 BP 思想,使用二分图分析消息传递算法中置信度的传播过程。分别使用  $M_{k \rightarrow u_j}(x_j)$  和  $M_{u_j \rightarrow c_k}(c_k)$  表示二分图中数值  $x_j$  从  $k$ -th FN 到  $j$ -th VN 的置信度消息和数值  $c_k$  从  $j$ -th VN 到  $k$ -th FN 的

置信度消息。其中 FNs 和 VNs 一次迭代更新,如图 2 所示。

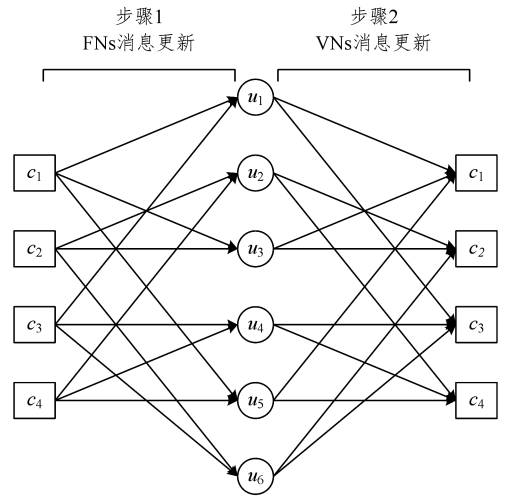


图 2  $J=6, K=4$  时 MPA 一次迭代过程的示例图

Fig. 2 Example of an MPA iteration with  $J=6, K=4$

## 3 本文方案

### 3.1 自适应 SCMA 解码器

如上所述,根据 SCMA 矩阵  $F$  稀疏性引入的 MPA 方案,将算法复杂度从  $O(|M|^J)$  降低至  $O(|M|^{d_f})$ 。但随着符号量  $M$  或  $d_f$  的增加,复杂度仍旧迅速增大,尤其当  $d_f$  增大时会引起复杂度呈指数型增长。方案的优化方向在于减少 FNs 的邻接 VNs 的数量,关键点在于引入 FN 的稳定因子  $\delta$ , 决定 FN 节点在下次迭代更新时的选择策略。

使用  $\alpha_{k,j}^{t-1}$  和  $\alpha_{k,j}^t$  表示变量节点  $j$  到功能节点  $k$  的置信度更新前后的信息量。将每条边  $(k,j)$  在  $t$  次迭代更新的稳定性定义为式(11):

$$\delta_{k,j}^{(t)}(m) \stackrel{\text{def}}{=} \text{sqrt}(\sum_{m=1}^M |\alpha_{m,k,j}^{t-1} - \alpha_{m,k,j}^t|^2) \quad (11)$$

其中,  $\alpha_{m,k,j}$  表示边  $(k,j)$  对于第  $m$  个符号的置信度。同时引入 0-1 矩阵  $V$ , 用于存储判决状态, 矩阵  $V$  中“1”表示对应边在下次迭代时不参与更新。动态边缘选择方案的具体步骤如算法 1 所示。

#### 算法 1 动态边缘选择 MPA 方案

Input:  $y, H, t_{\max}, \delta$

Initialization:

1. for all  $j=1:J$  and  $k \in [\xi_k]$  and  $m=1:M$  do

2.  $I_{k \rightarrow j}^0(x_{jm}) \leftarrow 0, I_{j \rightarrow k}^0(x_{jm}) \leftarrow 1/M;$

3.  $V_{j,k}^0(m) \leftarrow 0;$

4. end for

Iteration:

5. for  $t=1$  to  $t_{\max}$  do

6. for all  $j,k$  (if Edge  $(j,k)$  exists) and  $m$  do

7. if  $V_{j,k}^{t-1}(x_m) = 1$

8. Calculate  $\Phi_{k,j}(x_{jm})$  via (6);

9. Calculate and propagate  $I_{k \rightarrow j}^t(x_{jm})$  via (7);

10. If  $\text{sqrt}(\sum_{m=1}^M |I_{k \rightarrow j}^t(x_{jm}) - I_{k \rightarrow j}^{t-1}(x_{jm})|^2) \leq \delta$

11.  $V_{j,k}^t(m) = 1;$

12. end for

13. Calculate and propagate  $I_{j \rightarrow k}^t(x_{jm})$  via (8);

14.  $t=t+1$ ;

15. end for

Soft output:

16. for all  $j=1:J$  and  $m$  do

17. return  $I_j(x_{jm})$  via (9);

18. end for

由算法 1 可知,将阈值参数  $\delta$  作为输入参数,可以预先从接收数据的训练中获得经验值。FNs 节点是否参与迭代更新由矩阵  $V$  唯一决定,即每次迭代过程仅有  $s \leq d_f$  条边参与置信度计算。因此,参数  $\delta$  足够小,可能使动态边缘选择方案回退成经典消息传递(SMP)。注意,矩阵  $V$  仅能决定 FNs 的邻接 VN 在下次迭代时的更新状态,从算法中第 7-11 行可以得到验证。

图 3 给出了动态 MPA 算法在  $t$  次迭代前后的处理过程。假定在  $t-1$  次迭代中部分变量节点(节点 2,4 和 6)的更新趋于稳定(即  $\delta_{k,j}^{(t-1)} < \delta$ ),第  $t$  次迭代仅更新虚线代表的不稳定边缘(即  $\delta_{k,j}^{(t-1)} > \delta$ ),同时计算所有变量节点的置信度  $\alpha_{k,j}^{t-1}$ 。图 3(b)和图 3(c)为  $t$  次迭代过程中分别使用式(6)和式(7)计算功能节点  $\Phi_{k,j}(x_{jm})$  及变量节点  $I_{k \rightarrow j}^t(x_{jm})$  的外信息。在图 3(c)中,使用式(11)对 VN-FN 的置信度  $\alpha_{k,j}^t$  与上次迭代对应节点的置信度  $\alpha_{k,j}^{t-1}$  进行稳定度计算,判决后的状态“0-1”写入对应矩阵  $V$  中,即  $V_{k,j} \in \{0,1\}$ 。本实例假定  $\delta_{1,j}^t < \delta (j \in \{1,2,3\})$ ,相应的判决矩阵  $V_{1,j}=1 (j \in \{1,2,3\})$ 。因此,在图 3(d)所示的  $t+1$  次迭代中,实线部分表示的变量节点对应的边缘趋于稳定,不再进行下一次迭代更新,从而降低了计算复杂度。

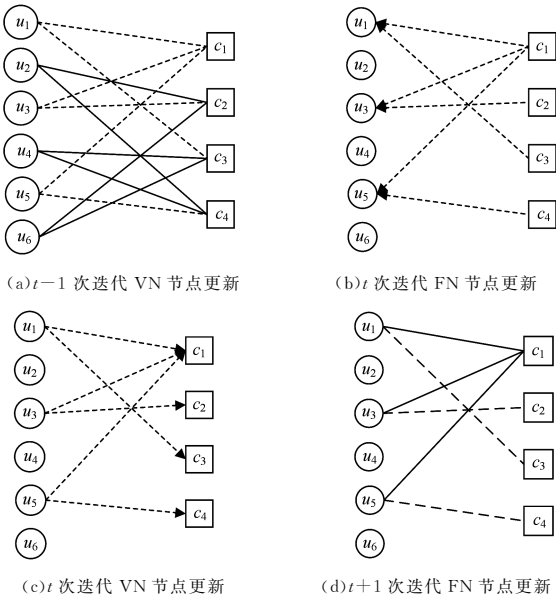


图 3 第  $t$  次迭代动态 MPA 方案的节点更新示例图

Fig. 3 Example of nodes update of  $t$ -th iteration of dynamic MPA scheme

### 3.2 复杂度分析

根据算法 1 的运算过程及 SMP 方案复杂度的结果<sup>[14]</sup>,表 1 列出了动态 MPA 与 SMP 方案在加法、乘法和指数运算中的运算次数。不失一般性,假定阈值参数  $\delta$  为定值,对应的

FNs 的邻接 VN 数量从  $d_f$  减少至  $s (0 \leq s \leq d_f)$ 。

表 1 SMP 与动态边缘选择方案的复杂度公式的比较

Table 1 Comparison of complexity between SMP and proposed MPA

运算	SMP	Proposed MPA
ADD	$((d_f+1)M^{d_f}-M)t_{\max}Kd_f$	$((s+1)M^s-M)t_{\max}Kd_f + Mt_{\max}Kd_f$
MUL	$(2d_f+1)t_{\max}Kd_fM^{d_f} + (d_v-2)t_{\max}Jd_vM + (d_v-1)JM$	$(2s+1)t_{\max}Kd_fM^s + (d_v-2)t_{\max}Jd_vM + (d_v-1)JM + 2t_{\max}Kd_f$
EXP	$t_{\max}Kd_fM^{d_f}$	$t_{\max}Kd_fM^s$

图 4 给出了当过载率为  $\lambda=150\%$ ,最大迭代次数  $t_{\max}=4, d_f=3$  时的复杂度对比值。从图中可以看出,动态 MPA 算法在加法、乘法和指数运算下分别能节省 81%,82%,75% 的计算量。考虑到算法复杂度和运行时间主要受指数、乘法运算的影响,因此动态 MPA 算法在高过载情况下较 SMP 有明显优势。虽然由阈值  $\delta$  不能给出精准的动态 MPA 复杂度的计算公式,但是随着 SNR 的提升,所需要的  $d_f$  数量显著减少,进而动态减少了运算量,使得动态方案具有更强的鲁棒性。

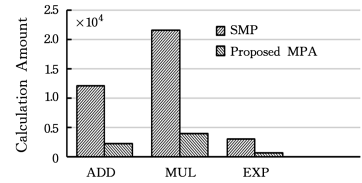


图 4 过载率  $\lambda=150\%$  时 SMP 与动态选择复杂度直方图

Fig. 4 Complexity comparison between SMP and dynamic edge selection with 150% overload

## 4 算法仿真及验证

为验证本文提出的基于稳定置信度的自适应 MPA 算法在复杂度方面的优势,通过 Matlab 平台进行蒙特卡洛仿真来对比分析自适应 MPA、SMP 和 PM-MPA 的单编译码模块的误码率和添加 FEC Turbo 信道编码后的 SCMA 的链路级 BER 性能。假定接收端具有良好的信道估计性能,同时使用文献[2]的码本集合,具体仿真参数如表 2 所列。

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters	
参数	取值
变量节点数量 $J$	6
功能节点数量 $K$	4
迭代次数 $t_{\max}$	5
重叠用户度 $d_f$	3
重叠资源度 $d_v$	2
信道模型	AWGN

首先进行 SCMA 单模块编译码 BER-SNR 仿真分析,结果如图 5 所示。从中可以看出,随着阈值  $\delta$  的减小,自适应 MPA 的 BER 瀑布线逐渐逼近 SMP 性能曲线。当  $\delta=0.005$  或 0.01 时,可以近似认为其已经达到 SMP 的 BER 性能,且超过 PM-MPA( $m=2, n=2$ )方案的性能。当  $\delta=0.02$  时,自适应方案仅与 SMP 相差 1.7 dB,并且随着  $E_b/N_0$  的增加,性能差距逐渐减少。同时,当  $E_b/N_0 > 10$  dB 时,与 PM-MPA

相比,动态方案的 BER 性能优势开始凸显。其原因在于本文方案对节点更新的动态选择性,允许不稳定节点(含有更多外信息的节点)在高  $E_b/N_0$  时继续更新,而非 PM-MPA 方案始终阻断特定节点的更新。阈值  $\delta=0.03$  时,动态方案虽然与 SMP 方案的 BER 性能差距增大,但在可接受的范围。

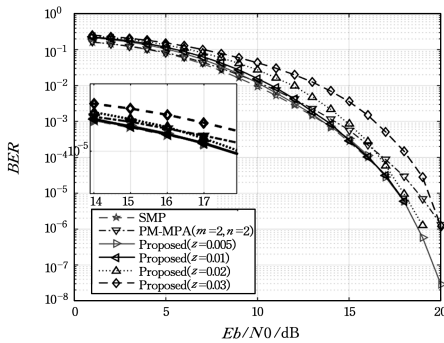


图 5  $t_{\max}=5$  时 SMP, PM-MPA 与动态选择方案的 BER 曲线图

Fig. 5 BER performance of SMP, PM-MPA and proposed MPA when  $t_{\max}=5$

图 6 是在引入 FEC Turbo 信道编码的基础上进行上行 SCMA 链路级的仿真分析。与图 4 相比,整体 BER 性能曲线更加陡峭,且在较低  $E_b/N_0$  时仍然能够保持较高的 BER 性能。在阈值  $\delta=0.02$  时,动态方案与 SMP 相比 BER 差距微弱,即在  $BER=10^{-3}$  时,与 SMP 仅有 0.2 dB 的性能差,且与 PM-MPA( $m=2, n=2$ ) BER 曲线重合。但引入 Turbo 编码后的译码复杂度与 Turbo 码率呈反比,即 Turbo 编码在提高 BER 性能的同时增加了复杂度。

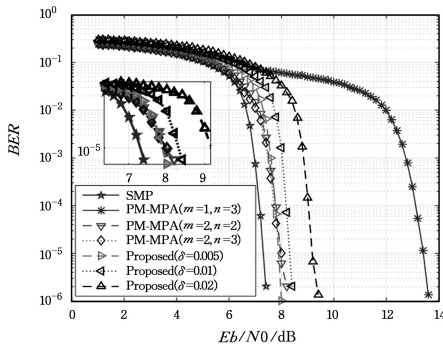


图 6 添加 Turbo 编码后 SMP, PM-MPA 与动态选择方案的 BER 曲线图

Fig. 6 BER performance of proposed MPA and SMP, PM-MPA when adding Turbo encoder over AWGN channel at  $t_{\max}=5$

**结束语** 本文针对上行 SCMA 系统,提出一种基于动态边缘选择的低复杂译码算法,引入动态稳定性因子来动态判决节点的更新。仿真结果表明,在阈值参数  $\delta=0.02$  时,AWGN 信道下的计算复杂度与误码率性能之间能够取得较好的平衡。此外,在信道 SNR 不稳定的情况下,本文的动态方案可以通过训练选择不同的阈值参数来满足系统要求。为进一步提升频谱利用率,在提高 SCMA 码本过载率和引入大规模 MIMO 技术联合调制的同时,从 SCMA 编码与多载波

技术相结合的角度进行深入研究十分必要。

## 参考文献

- [1] RAPPAPORT T S, SUN S, MAYZUS R, et al. Millimeter Wave Mobile Communications for 5g Cellular: It Will Work! [J]. IEEE Access, 2013, 1(1): 335-349.
- [2] ZHANG C Q. Study on Large-scale MIMO Antenna Array for 5G Mobile Network[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2016, 6(3): 34-39. (in Chinese)  
张长青. 面向 5G 的大规模 MIMO 天线阵列研究[J]. 邮电设计技术, 2016, 6(3): 34-39.
- [3] WUNDER G, JUNG P, KASPARICK M, et al. 5gnow: Non-orthogonal, Asynchronous Waveforms for Future Mobile Applications[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 97-105.
- [4] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse Code Multiple Access [C] // 2013 IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (pimrc). IEEE, 2013: 332-336.
- [5] HOSHYAR R, WATHAN F P, TAFAZOLLI R. Novel Low-density Signature for Synchronous Cdma Systems Over Awgn Channel[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(4): 1616-1626.
- [6] TAHERZADEH M, NIKOPOUR H, BAYESTEH A, et al. Scma Codebook Design[C] // 2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (vtc Fall). IEEE, 2014: 1-5.
- [7] BEKO M, DINIS R. Designing Good Multi-dimensional Constellations[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2012, 1(3): 221-224.
- [8] YEDIDIA J S, FREEMAN W T, WEISS Y. Understanding belief propagation and its generalizations[J]. Exploring Artificial Intelligence in the New Millenium, 2002, 54(1): 276-286.
- [9] ZHANG S, XU X, LU L, et al. Sparse Code Multiple Access: an Energy Efficient Uplink Approach for 5g Wireless Systems[C] // 2014 IEEE Global Communications Conference (globeCom). IEEE, 2014: 4782-4787.
- [10] LIU J, WU G, LI S, et al. On Fixed-point Implementation of Log-mpa for Scma Signals[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(3): 324-327.
- [11] MU H, MA Z, ALHAJI M, et al. A Fixed Low Complexity Message Pass Algorithm Detector for Up-link Scma System[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4(6): 585-588.
- [12] DU Y, DONG B, CHEN Z, et al. Low-complexity Detector in Sparse Code Multiple Access Systems[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(9): 1812-1815.
- [13] DU Y, DONG B, CHEN Z, et al. Shuffled Multiuser Detection Schemes for Uplink Sparse Code Multiple Access Systems[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(6): 1231-1234.
- [14] YANG L, LIU Y, SIU Y. Low Complexity Message Passing Algorithm for Scma System[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(12): 2466-2469.