

一种改进基于门限的稀疏码多址接入低复杂度多用户检测算法

杨 维 赵懿伟* 侯健琦

(北京交通大学电子信息工程学院 北京 100044)

摘 要: 稀疏码多址接入(Sparse Code Multiple Access, SCMA)作为一种基于多维码本的非正交多址技术,能有效满足 5G 的巨连接、高频谱效率和毫秒级时延需求。针对基于门限的消息传递算法(Message Passing Algorithm, MPA)存在低门限时误比特率(Bit Error Rate, BER)较高的问题,该文提出一种改进的 SCMA 多用户检测算法。所提出的算法在基于门限 MPA 的基础上,增加了对用户节点稳定性必要条件的判决,即只有符合门限条件并通过用户节点稳定性必要条件判决的用户才能被提前解码。这提高了提前判决码字的可靠性并减少了因变相硬判的检测机制造成的后验软信息损失。与基于门限的 MPA 相比,所提出的算法可使消息在低门限时迭代得更加充分,从而在低门限时仍然能够使 SCMA 用户获得较好的 BER 性能。仿真结果表明,在低门限时采用该文所提出的算法 SCMA 用户 BER 性能明显好于仅采用基于门限的 MPA 的 BER 性能。

关键词: 稀疏码多址接入; 多用户检测; 消息传递算法; 门限

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)05-1044-06

DOI: 10.11999/JEIT170647

An Improved Threshold-based Low Complexity Multiuser Detection Scheme for Sparse Code Multiple Access System

YANG Wei ZHAO Yiwei HOU Jianqi

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Sparse Code Multiple Access (SCMA) is a non-orthogonal multiple access technology based on multi-dimensional codebook, which can effectively address challenges in 5G such as massive connectivity, high spectral efficiency and millisecond delay. For the problem that threshold-based Message Passing Algorithm (MPA) has a high Bit Error Rate (BER) when the threshold is low, an improved SCMA multiuser detection scheme is proposed in this paper. Based on the threshold MPA scheme, the proposed scheme adds a judgment on the necessary conditions of user node stability. The users who not only satisfy the threshold criterion but also pass the judgment on the necessary conditions of user node stability can be decoded in advance. This improves the reliability of codeword which is judged in advance and reduces the loss of posterior soft information caused by the detection mechanism similar to the hard decision. Compared with the threshold-based MPA scheme, the proposed scheme allows the messages to be iterated more fully at low thresholds, which makes SCMA users achieve better BER performance at low thresholds. The simulation results show that better BER performance is achieved with the proposed scheme than that with the threshold-based MPA scheme for SCMA users.

Key words: Sparse Code Multiple Access (SCMA); Multiuser detection; Message Passing Algorithm (MPA); Threshold

1 引言

随着 4G 的成功商用和在世界范围内的普及,下一代通信技术 5G 的研究提上日程^[1-3]。面向 5G

所要求的巨连接、更高的频谱效率和更低的时延,稀疏码多址接入(SCMA)方案作为一种基于多维码本的频率域非正交多址技术^[4],能够支持远多于所占正交时频资源数的用户连接数。SCMA 技术由低密度(Low Density Signature, LDS)技术^[5-7]技术演进而来。相比于原始的 LDS 技术,SCMA^[8-10]将 LDS 技术中的 QAM 调制器和稀疏扩频器合二为一进行联合优化,把用户的数据比特直接映射为 SCMA 码本中的多维码字,从而使 SCMA 系统获得了 LDS 所没有的成型增益。

收稿日期: 2017-07-05; 改回日期: 2017-12-08; 网络出版: 2018-01-23

*通信作者: 赵懿伟 ywzhao@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0801800), 国家自然科学基金(51474015)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (2016YFC0801800), The National Natural Science Foundation of China (51474015)

得益于 SCMA 码本的稀疏性, SCMA 系统接收端可以采用基于最优最大后验概率 (Maximum A Posterior, MAP)^[11] 的多用户检测算法^[8], 本文称之为原始消息传递算法 (MPA)。原始 MPA 在降低检测复杂度的同时, 获得了近似最优最大后验概率检测的误码性能。为了让 SCMA 成为 5G 有力候选方案, SCMA 低复杂度多用户检测算法仍然是 SCMA 系统研究的主要工作之一。文献[12]在码字可信度的基础上提出了一种基于门限的 MPA。该算法在每次迭代中计算所有未判决用户的码字可信度, 并且判断是否存在码字可信度符合门限条件的用户, 如果存在, 则将该用户提前解码。被提前解码的用户所对应的消息在后续的迭代过程中不再进行更新, 从而起到降低检测复杂度的作用。文献[12]基于门限的 MPA 的门限值可以设定为固定门限和基于 E_b/N_0 的可变门限, 门限值选择的多样化能够在复杂度和误码性能折中上提供更多的选择。但基于门限的 MPA 在低门限时 BER 性能急剧下降。

针对基于门限的 MPA 在低门限时 BER 性能较差的问题, 本文提出一种改进的基于门限的 SCMA 多用户检测算法。所提出的算法在文献[12]基于门限 MPA 的基础上, 增加了对用户节点稳定性必要条件的判决, 即只有码字可信度符合门限条件且通过用户节点稳定性必要条件判决的用户才能被提前解码。本文所提算法通过采用两个条件来控制用户的提前解码, 不仅提高了提前判决码字的可靠性, 而且能有效减少文献[12]基于门限的 MPA 因变相硬判的检测机制造成的后验软信息损失和似然运算精度降低, 从而提高了基于门限 MPA 的误码性能。尤其在低门限的情况下, 本文所提算法可以显著地改善基于门限的 MPA 所存在的 BER 性能严重下降的问题, 且门限值设定越低效果就越明显。为方便表述, 在下文中, 文献[12]所提的基于门限的 MPA 称为门限 MPA。

本文内容安排如下: 第 2 节给出了 SCMA 系统模型; 第 3 节详细阐述了所提出的 SCMA 低复杂度多用户检测算法; 第 4 节给出仿真验证结果; 最后一节总结全文。

2 系统模型

2.1 SCMA 上行链路简化模型

本文考虑的是 SCMA 系统上行链路模型, 其简化模型如图 1 所示。J 个用户通过 K 个正交资源块传输数据给基站, 过载因子定义为 $OF = J/K$ 。

对于任意用户 j, SCMA 编码器定义为一种从用户 j 的 $\log_2 M$ 个比特数据 \mathbf{b}_j 到用户 j 所对应码本 \mathcal{X}_j 中预定义的 K 维复码字 \mathbf{x}_j 的映射, 即: $\mathbf{x}_j =$

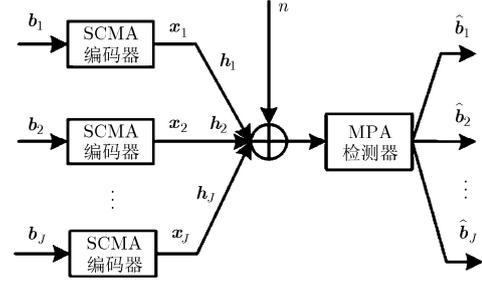


图 1 SCMA 上行链路简化模型

$f(\mathbf{b}_j), f: \mathbb{B}^{\log_2 M} \rightarrow \mathcal{X}_j$, 其中, $\mathcal{X}_j \subset \mathbb{C}^K$, 码本的基数 $|\mathcal{X}_j| = M, \forall j$ 。每个 K 维复码字是只有 $N < K$ 个非零元的稀疏向量, 这减少了一个正交资源块上不同用户间的干扰, 从而使 SCMA 采用低复杂度的 MPA 成为可能。SCMA 编码器可进一步定义为 $f \equiv \mathbf{V}_j g$, 其中编码器 g 定义为 $\mathbf{c}_j = g(\mathbf{b}_j), g: \mathbb{B}^{\log_2 M} \rightarrow \mathcal{C}, \mathcal{C} \subset \mathbb{C}^N$, 其将每个用户的比特数据 \mathbf{b}_j 映射为 N 维星座点 \mathbf{c}_j , 二进制映射矩阵 $\mathbf{V}_j \in \mathbb{B}^{K \times N}$ 将 N 维星座点 \mathbf{c}_j 映射为 K 维码字 \mathbf{x}_j 。

SCMA 码的整体结构可以用对应的因子图和因子图矩阵 \mathbf{F} 表述。因子图是包含所有用户节点 u_j 和所有资源节点 c_k 的二分图。当用户 j 占用资源块 k 时, 则在对应的因子图中, 将用户节点 u_j 和资源节点 c_k 用直线相连。因子图矩阵 \mathbf{F} 和因子图一一对应, 其包含 K 行和 J 列, 分别对应 K 个资源节点和 J 个用户节点。因子图矩阵 \mathbf{F} 中的元素由 0 和 1 构成, 当且仅当因子图中的用户节点 u_j 与资源节点 c_k 相连时, 因子图矩阵 \mathbf{F} 的第 k 行第 j 列元素 $\mathbf{F}_{k,j} = 1$ 。不失一般性, 假设每个资源块承载的用户数和每个用户占用的资源块数分别是相同的, 分别用 d_u 和 d_c 表示。进一步地, 本文分别用 ξ_k 和 ζ_j 表示与资源节点 c_k 相连的用户节点的集合和与用户节点 u_j 相连的资源节点的集合, 它们的定义如下: $\xi_k = \{j | \mathbf{F}_{k,j} = 1, \forall j\} \forall k; \zeta_j = \{k | \mathbf{F}_{k,j} = 1, \forall k\} \forall j$ 。对 $J = 6, K = 4$ 的一种 SCMA 因子图及其对应的因子矩阵 \mathbf{F} 如图 2 所示。

所有用户的码字在 K 个资源块中叠加, 并通过各自的信道到达基站。假设全部用户时间同步, 基站在 K 个资源节点上接收到的总信号可以表示为

$$\mathbf{y} = \sum_{j=1}^J \text{diag}(\mathbf{h}_j) \mathbf{x}_j + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x}_j = [x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{Kj}]^T$ 是用户 j 发送的 SCMA 码字矢量, $\mathbf{h}_j = [h_{1j}, h_{2j}, \dots, h_{Kj}]^T$ 是用户 j 的信道矢

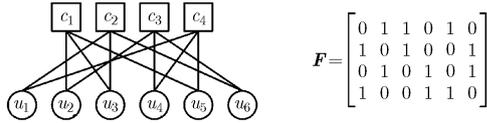


图2 SCMA因子图及其对应因子图矩阵

量, $\text{diag}(\mathbf{h}_j)$ 是以向量 \mathbf{h}_j 为主对角线的对角矩阵。 \mathbf{n} 表示环境噪声, 一般假设为加性高斯白噪声且 $\mathbf{n} \sim cN(0, \sigma_n^2 \mathbf{I}_K)$, \mathbf{I}_K 为 K 维单位矩阵。

在第 k 个时频资源块上的接收信号为

$$\mathbf{y}_k = \sum_{j=1}^J \mathbf{h}_{k,j} \mathbf{x}_{k,j} + \mathbf{n}_k \quad (2)$$

由于用户的码字的稀疏性, 所以在第 k 个时频资源块上只有 $d_k < J$ 个用户发生碰撞, 因此, 式(2)可以改写为

$$\mathbf{y}_k = \sum_{j \in \xi_k} \mathbf{h}_{k,j} \mathbf{x}_{k,j} + \mathbf{n}_k \quad (3)$$

假设基站有完美的信道估计, 即信道矩阵 $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_J]$ 已知, 并且基站也有各个用户的码本。则基站在接收到信号 \mathbf{y} 之后, SCMA 的多用户检测问题可以用最优的联合 MAP 检测。发射端发送的 J 个用户的复合码字 $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_J)$ 的联合 MAP 估计可以用式(4)获得

$$\hat{\mathbf{X}} = \arg \max_{\mathbf{X} \in \prod_{j=1}^J \mathcal{X}_j} p(\mathbf{X} | \mathbf{y}) \quad (4)$$

其中, $\prod_{j=1}^J \mathcal{X}_j = \mathcal{X}_1 \times \mathcal{X}_2 \times \dots \times \mathcal{X}_J$ 。

联合 MAP 检测需要穷举所有用户的码字组合, 检测复杂度随着用户数 J 呈指数上升, 因此复杂度极高。

2.2 SCMA 译码算法

得益于 SCMA 码字的稀疏性, SCMA 系统可以采用原始 MPA 检测算法^[8]。该算法通过沿因子图中的边迭代地交换用户节点 u_j 和资源节点 c_k 外信息的方式, 来逼近最优 MAP 检测。在原始 MPA 中, 假设了每个用户发送的码字是等概率分布的。即所有从用户节点 u_j 到资源节点 c_k 的初始消息设为

$$I_{u_j \rightarrow c_k}^0(\mathbf{x}_j) = |\mathcal{M}|^{-1}, \forall j \quad (5)$$

初始化完成后, 算法进入迭代更新过程。MPA 检测第 i 次迭代的消息更新环节具体可以分为两步: (1) 首先更新所有从资源节点 c_k 到用户节点 u_j 的消息 $M_{c_k \rightarrow u_j}^i(\mathbf{x}_j)$; (2) 再更新所有从用户节点 u_j 到资源节点 c_k 的消息 $I_{u_j \rightarrow c_k}^i(\mathbf{x}_j)$ 。计算 $M_{c_k \rightarrow u_j}^i(\mathbf{x}_j)$ 和 $I_{u_j \rightarrow c_k}^i(\mathbf{x}_j)$ 具体的数学公式如式(6)和式(7)所示。

$$M_{c_k \rightarrow u_j}^i(\mathbf{x}_j) = \sum_{\mathbf{x}_j} \left(M_k(\mathbf{x}) \prod_{l \in \xi_k / \{j\}} I_{u_l \rightarrow c_k}^{i-1}(\mathbf{x}_l) \right), \forall k \quad (6)$$

$$I_{u_j \rightarrow c_k}^i(\mathbf{x}_j) = \prod_{m \in \zeta_j / \{k\}} M_{c_m \rightarrow u_j}^i(\mathbf{x}_j), \forall j \quad (7)$$

其中, $M_k(\mathbf{x}) = \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_n^2} \left\| \mathbf{y}_k - \sum_{j \in \xi_k} \mathbf{h}_{k,j} \mathbf{x}_{k,j} \right\|^2 \right\}$, $\xi_k / \{j\}$

表示在集合 ξ_k 中除去元素 j , $\zeta_j / \{k\}$ 表示在集合 ζ_j 中除去元素 k 。

当达到最大迭代次数 I_{\max} 时, 将用户 j 的码字判决为

$$\hat{\mathbf{x}}_j = \arg \max_{\mathbf{x}_j \in \mathcal{X}_j} \left\{ \prod_{k \in \zeta_j} M_{c_k \rightarrow u_j}^{I_{\max}}(\mathbf{x}_j) \right\}, \forall j \quad (8)$$

SCMA 系统所对应的因子图一般为如图 2 所示的有环因子图。因此, 在经过一定次数的迭代后, 原始 MPA 只能得到用户码字后验概率的近似值^[13]。为表述方便, 本文用 MPA 在第 i 次迭代时所获得的用户 j 所有 M 个码字的后验概率的近似值构成用户 j 在第 i 次迭代时的码字可信度向量 $\mathbf{q}^i(\mathcal{X}_j) = [q^i(\mathcal{X}_{j,1}), q^i(\mathcal{X}_{j,2}), \dots, q^i(\mathcal{X}_{j,M})]$ 。其中, 向量 $\mathbf{q}^i(\mathcal{X}_j)$ 的第 m 个元素 $q^i(\mathcal{X}_{j,m})$ 为 MPA 在第 i 次迭代时所得到的用户 j 第 m 个码字的后验概率近似值, 其可由式(9)获得。

$$q^i(\mathcal{X}_{j,m}) = \prod_{k \in \zeta_j} M_{c_k \rightarrow u_j}^i(\mathcal{X}_{j,m}), \forall j, m = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

其中, $\mathcal{X}_{j,m}$ 表示码本 \mathcal{X}_j 中的第 m 个码字。

原始 MPA 需要所有码字都达到最大迭代次数 I_{\max} 时才会判决, 因此原始 MPA 的检测复杂度很高。文献[12]门限 MPA 将码字可信度向量 $\mathbf{q}^i(\mathcal{X}_j)$ 作为衡量用户码字可靠性的一种指标, 通过设置门限条件, 将码字可信度符合门限条件的用户及时地解码出来, 并在之后的迭代过程中不再对这些用户所对应的消息进行更新, 从而降低了检测复杂度。具体来说, 门限 MPA 根据用户的码字可信度是否符合门限条件, 将所有用户分为两个集合, 可信集 ϕ 和不可信集 ψ 。当码字可信度满足门限条件时, 将该用户码字提前判决出来, 并将该用户放入可信集 ϕ , 否则将该用户放入不可信集 ψ 。该算法在初始化阶段将所有用户都放入不可信集 ψ 中。门限 MPA 第 i 次迭代首先按照式(6)和式(7)对不可信集 ψ 中的所有用户进行消息更新, 并按式(9)计算这些用户在第 i 次迭代时每个码字的可信度 $q^i(\mathcal{X}_{j,m})$ 。

然后将每个用户 $j \in \psi$ 在第 i 次迭代时的码字可信度 $\mathbf{q}^i(\mathcal{X}_j)$ 中的元素按降序排序:

$$[p_{j1}, p_{j2}, \dots, p_{jM}] = \text{sort}(\mathbf{q}^i(\mathcal{X}_j), 'descend'), j \in \psi \quad (10)$$

最后对每个用户 $j \in \psi$, 判定码字可信度是否

符合门限条件:

$$p_{j1}/p_{j2} > \text{Th}, \quad j \in \psi \quad (11)$$

其中, 门限条件 Th 既可以设置为固定值, 也可以是基于 E_b/N_0 的可变值。显然, 门限值 Th 设定的越高, 提前判决码字的可靠性就越高, 但复杂度降低越不明显。当所有码字都被提前检测出来或者算法达到最大迭代次数 I_{\max} 时, 算法终止。

3 本文提出的多用户检测算法

门限 MPA 虽然可以通过设定门限条件将码字可信度符合门限条件的用户提前解码, 从而减少计算复杂度。但该算法中对码字可信度符合门限条件用户的提前解码处理, 会造成与该用户占用同一资源块的其他用户在之后迭代过程中软信息的损失。因此, 门限 MPA 其本质是一种变相硬判的检测机制。门限 MPA 这类变相硬判的检测机制由于造成了后验软信息的损失, 会导致似然运算精度的降低, 最终使得 SCMA 用户 BER 性能的降低, 且这种降低在低门限时尤其严重。如在门限值 $\text{Th} = 5$, $E_b/N_0 = 13$ dB 时, 门限 MPA 的 BER 性能比迭代 6 次的原始 MPA 的 BER 性能差一个数量级^[12]。

3.1 改进的基于门限多用户检测算法

为提高门限 MPA 在低门限时的误码性能, 同时保持其利用门限条件降低算法复杂度的优点, 本文提出了一种改进的基于门限 SCMA 多用户检测算法。所提出的算法在门限 MPA 基础上, 增加了对用户节点稳定性必要条件的判决, 只有符合门限条件并通过用户节点稳定性必要条件判决的用户才能被提前译码。这样不仅能提高提前判决码字的可靠性, 而且减少了门限 MPA 因变相硬判的检测机制所造成的后验软信息损失, 从而提高了门限 MPA 的 BER 性能, 尤其在低门限情况下, 可使消息的迭代更加充分, 从而显著提高了门限 MPA 的 BER 性能。

为方便描述用户节点稳定性必要条件的判决对 SCMA 系统误码性能的作用, 本文沿用文献[12]中可信集 ϕ 和不可信集 ψ 的用法, 但在所提出的算法中, 只有既符合门限条件又通过用户节点稳定性必要条件判决的用户才属于可信集 ϕ 。本文首先给出“用户节点稳定性”的定义: 在 SCMA 迭代译码过程中, 对于任意用户 j , 如果因子图中该用户节点 u_j 在第 i 次迭代时码字可信度向量中最大元素所在的位置与之后的迭代中码字可信度向量中最大元素所在的位置都相同, 即对第 i 次和第 i' 次迭代的 $\arg \max_{1 \leq m \leq M} q^i(\mathcal{X}_{j,m})$ 和 $\arg \max_{1 \leq n \leq M} q^{i'}(\mathcal{X}_{j,n})$, $i < i' \leq I_{\max}$, 有 $m = n$, 则用户节点 u_j 是稳定的。显然, 用户节

点 u_j 稳定的必要条件是用户节点 u_j 在第 i 次迭代和第 $i+1$ 次迭代中, 码字可信度向量中最大元素所在的位置相同, 即对第 i 次和第 $i+1$ 次迭代的 $\arg \max_{1 \leq m \leq M} q^i(\mathcal{X}_{j,m})$ 和 $\arg \max_{1 \leq n \leq M} q^{i+1}(\mathcal{X}_{j,n})$, 有 $m = n$ 。

显然, 如果某用户 j 的码字可信度符合门限条件但其对应的用户节点 u_j 不稳定, 那么, 在对应的 SCMA 因子图中, 该用户节点 u_j 所在的这部分子图必然还没有收敛, 门限 MPA 此时就将该用户提前解码, 这将导致对用户码字判决的错误概率大大增加。不仅如此, 门限 MPA 变相硬判机制所导致的软信息损失对其他用户节点的判决也会产生不利影响, 甚至会将本能够正确判决的码字判决错误。因此, 增加用户节点稳定性的判决对进一步提高门限 MPA 的 BER 性能是十分重要的。然而, 如果要完全保证用户节点的稳定性, 用户节点的稳定性判决要遍历每个用户的所有迭代过程, 直到最大迭代次数 I_{\max} 时, 算法才能终止。此时, 本文所提出的算法和原始 MPA 的复杂度相当, 这就失去了通过设定门限条件而降低复杂度的优势。因此, 本文采用用户节点稳定性的必要条件作为用户节点稳定性判定的依据, 并称之为用户节点稳定性必要条件的判决。采用这种方法虽然仅能保证某用户在相邻两次迭代过程中码字可信度向量最大元素所在的位置相同, 但在与门限条件相结合后, 却不仅能减少门限 MPA 变相硬判机制所导致的后验软信息损失和似然运算精度的降低, 还保持了门限 MPA 利用门限条件降低检测复杂度的优点, 尤其在门限设置较低时, 用户节点稳定性必要条件的判决对提高门限 MPA 的 BER 性能更为显著。

具体地说, 所提出的算法在初始化时, 假定所有的用户节点都是不稳定的, 并将每次迭代过程分为两部分, 即消息更新环节和校验环节。消息更新环节和原始 MPA 的消息更新过程一致, 消息更新环节之后是控制码字提前判决的校验环节。第 i 次迭代的校验环节具体为: 第 1 步, 首先判定不可信集 ψ 中每个用户节点是否通过用户节点稳定性必要条件的判决。对于不可信集 ψ 中的用户 j , 只有当次迭代和前一次迭代码字可信度向量中最大元素所在的位置相同时, 才认为用户 j 通过了用户节点稳定性必要条件的判决。只有通过用户节点稳定性必要条件判决的用户才能进入校验过程的第 2 步, 否则直接进入下一次迭代过程。第 2 步, 按照式(9)、式(10)和式(11)对通过用户节点稳定性必要条件判决的用户进行门限条件的判决。第 3 步, 当某用户 j^* 不仅通过用户节点稳定性必要条件判决, 其码字可信度

也符合门限条件时, 将用户 j^* 所发送的码字提前判决为 $\max(q^i(\mathcal{X}_{j^*}))$ 所对应的码字,

$$\hat{x}_{j^*} = \arg \max_{x \in \mathcal{X}_{j^*}} \{q^i(\mathcal{X}_{j^*})\} \quad (12)$$

并将用户 j^* 放入可信集 ϕ 中。本文所提算法在所有用户码字都提前判决或者达到最大迭代次数时终止。

3.2 算法复杂度分析

SCMA 多用户检测算法的复杂度主要体现在迭代时消息更新过程的大量运算上^[14]。在本文所提算法的校验环节中, 由于用户节点稳定性必要条件的判决只需要少量的比较运算, 相比于迭代环节运算量增加的很少。因此, 比较原始 MPA、门限 MPA 和本文所提算法的复杂度只需要比较不同算法在迭代过程中消息更新环节的运算量即可。本文涉及到的所有算法都没有破坏用户在每次迭代过程中的消息更新环节。因此, 本文以消息更新过程中所需乘法运算的数目为标准来比较不同算法的复杂度。原始 MPA 所需的乘法个数为^[15]

$$N_p = I_{\max} K d_r M (2d_r + 1) + I_{\max} J d_c M (d_c - 2) \quad (13)$$

其中, d_r 和 d_c 分别表示每个资源块承载的用户数和每个用户占用的资源块数。

显然, 最大迭代次数 I_{\max} 和门限值 Th 这两个参数会影响本文所提算法的复杂度。然而由于噪声的随机性, 本文并不能给出所提算法复杂度的具体表达式。与门限 MPA 相似, 当某些用户在迭代过程中被提前解码时, 这些用户所对应的消息在后续迭代中就不再更新, 因此本文所提算法的复杂度比原始 MPA 的低。但本文所提算法在门限 MPA 的基础上增加了用户节点稳定性必要条件的判决, 这导致在相同门限值设定下需要更多的迭代过程才能够将用户码字提前判决。因此, 相比于门限 MPA, 本文所提算法的计算复杂度也会有所增加。

4 仿真结果分析

为了考察本文所提出基于门限 SCMA 方案低复杂度多用户检测算法的性能, 将所提出的改进算法与门限 MPA 以及原始 MPA 进行了仿真比较。文献 [12] 列出了 $\text{Th} = 5$, $\text{Th} = 20$ 和 $\text{Th} = 50$ 3 种固定门限的情况, 当 $\text{Th} = 50$ 时, 门限 MPA 的误码性能已经很接近原始 MPA 的性能了。由于本文主要是解决门限 MPA 在低门限时的误码性能, 因此, 仿真结果中选择了 $\text{Th} = 5$ 和 $\text{Th} = 20$ 两种门限较低时的情况。仿真参数设置如表 1 所示。

4.1 BER 性能比较

图 3 为分别采用所提出的改进算法与门限 MPA

表 1 仿真参数

参数	取值
用户数 J	6
码本大小 M	4
正交时频资源数 K	4
过载因子 OF	150%
信道模型	AWGN

以及原始 MPA 3 种 SCMA 方案的 BER 性能。从图 3 可以看出, 门限 MPA 在低门限如 $\text{Th}=5$ 的情况下, 其 BER 性能明显变差, 尤其是在 $E_b/N_0 > 10$ dB 时, 性能下降更加显著, 如在 $E_b/N_0 = 11$ dB 时就已经差于原始 MPA 迭代 2 次的 BER 性能。这是由于 E_b/N_0 越大, 门限 MPA 可能迭代越不充分。在 $\text{Th} = 5$, $I_{\max} = 6$ 的情况下, 当 BER 为 2×10^{-3} 时, 门限 MPA 的 E_b/N_0 与原始 MPA 相差高达 3 dB, 而采用所提出的改进算法 E_b/N_0 与原始 MPA 只相差 1 dB。从图 3 还可以看出, 在 $E_b/N_0 = 13$ dB, $I_{\max} = 6$ 的情况下, 当 $\text{Th} = 20$ 时, 采用所提出的改进算法与门限 MPA 的 SCMA 方案的 BER 性能分别为 2.58×10^{-4} 和 4.11×10^{-4} , 所提出的改进算法的 BER 性能好于门限 MPA 的 BER 性能。当 $\text{Th} = 5$ 时, 采用所提出改进算法与门限 MPA 的 SCMA 方案的 BER 性能分别为 2.73×10^{-4} 和 1.95×10^{-3} , BER 性能甚至相差约一个数量级。这些表明本文所提算法通过在门限 MPA 基础上增加对用户节点稳定性必要条件判决环节, 可以很好地解决门限 MPA 在低门限时所存在的 BER 性能严重下降的问题, 且门限值设定越低效果就越明显。

4.2 复杂度比较

接收端完成所有译码工作后, 统计在更新环节中乘法运算的总数, 并除以总的发射码字数, 可以

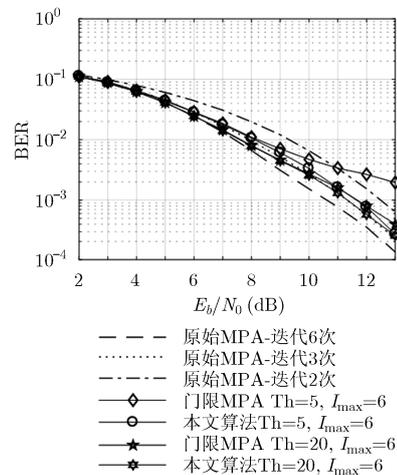


图 3 不同算法 BER 性能比较

得到不同算法所需的平均乘法数目。在 $E_b/N_0 = 12$ dB, $T_h = 5$, $I_{\max} = 6$ 的情况下, 所提出的改进算法、文献[12]门限 MPA 以及原始 MPA 的 SCMA 方案所需平均乘法数目分别为 11053, 6000 和 32256。本文所提出改进算法的复杂度比门限 MPA 高 84.2%, 但与原始 MPA 相比, 复杂度只相当于原始 MPA 的 34.3%。在 $E_b/N_0 = 12$ dB, $T_h = 20$, $I_{\max} = 6$ 的情况下, 所提出的改进算法与门限 MPA 以及原始 MPA 的 SCMA 方案所需平均乘法数目分别为 11073, 6573 和 32256。本文所提出的改进算法的复杂度比门限 MPA 高 68.4%, 但与原始 MPA 相比, 复杂度只相当于原始 MPA 的 34.3%。

5 结束语

本文针对 SCMA 通信系统上行链路, 以门限 MPA 为基础, 提出了一种将用户节点稳定性必要条件的判决和门限 MPA 相结合的 SCMA 多用户检测算法。与门限 MPA 相比, 本文所提出的算法提高了提前判决码字的可靠性并减少了门限 MPA 因变相硬判决的检测机制造成的后验软信息损失, 从而很好地解决了门限 MPA 存在的低门限时误码性能下降严重问题。虽然门限 MPA 可以通过提高门限值, 来提高算法的 BER 性能, 但由此会使检测复杂度大幅上升, 因此, 在实际应用中一般会选择较小的门限值来保证较低的复杂度, 而本文所提算法能够在低门限情况下保证较好的 BER 性能。综上所述, 本文所提算法是一种实用价值较好的 SCMA 多用户检测算法。

参考文献

- [1] DAI Linglong, WANG Bichai, YUAN Yifei, *et al.* Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(9): 74–81. doi: 10.1109/MCOM.2015.7263349.
- [2] 张平, 陶运铮, 张治. 5G 若干关键技术评述[J]. *通信学报*, 2016, 37(7): 15–29. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2016130. ZHANG Ping, TAO Yunzheng, and ZHANG Zhi. Survey of several key technologies for 5G[J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(7): 15–29. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2016130.
- [3] DONG Lei, ZHAO Hongyi, CHEN Yan, *et al.* Introduction on IMT-2020 5G trials in China[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(8): 1849–1866. doi: 10.1109/JSAC.2017.2710678.
- [4] CHEN Yan, BAYESTEH Alireza, WU Yiqun, *et al.* SCMA: A promising non-orthogonal multiple access technology for 5G networks[C]. 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Montreal, Canada, 2016: 1–6. doi: 10.1109/VTCFall.2016.7881213.
- [5] HOSHYAR R, WATHAN F P, and TAFAZOLLI R. Novel low-density signature for synchronous CDMA systems over AWGN channel[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(4): 1616–1626. doi: 10.1109/TSP.2007.909320.
- [6] BEEK J V D and POPOVIC B M. Multiple access with low-density signatures[C]. *IEEE Global Telecommunications Conference*, Honolulu, USA, 2009: 1–6. doi: 10.1109/GLOCOM.2009.5425243.
- [7] HOSHYAR R, RAZAVI R, and AL-IMARI M. LDS-OFDM an efficient multiple access technique[C]. 2010 IEEE 71st IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring), Taipei, 2010: 1–5. doi: 10.1109/VETECS.2010.5493941.
- [8] NIKOPOUR H and BALIGH H. Sparse code multiple access[C]. 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), London, UK, 2013: 332–336. doi: 10.1109/PIMRC.2013.6666156.
- [9] TAHERZADEH M, NIKOPOUR H, BAYESTECH A, *et al.* SCMA codebook design[C]. *IEEE Vehicular Technology Conference Fall*, Vancouver, Canada, 2014: 14–17. doi: 10.1109/VTCFall.2014.6966170.
- [10] 康晋, 周世东, 张秀军, 等. 超蜂窝架构下基于跳码的 SCMA 控制信道接入设计[J]. *中国科学:信息科学*, 2017, 47(6): 789–799. doi: 10.1360/N112017-00038. LIAN Jin, ZHOU Shidong, ZHANG XiuJun, *et al.* An SCMA control channel accessing scheme based on codebook-hopping under hyper-cellular network architecture[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2017, 47(6): 789–799. doi: 10.1360/N112017-00038.
- [11] KSCHISCHANG F R, FREY B J, and LOELIGER H. Factor graphs and the sum-product algorithm[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2001, 47(2): 498–519. doi: 10.1109/18.910572.
- [12] YANG Lin, LIU Yunyun, and SIU Yunming. Low complexity message passing algorithm for SCMA system[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(12): 2466–2469. doi: 10.1109/LCOMM.2016.2609382.
- [13] XIAO Kexin, XIAO Baicen, ZHANG Shutian, *et al.* Simplified multiuser detection for SCMA with sum-product algorithm[C]. 2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), Nanjing, China, 2015: 1–5. doi: 10.1109/WCSP.2015.7341328.
- [14] DU Yang, DONG Binhong, CHEN Zhi, *et al.* A fast convergence multiuser detection scheme for uplink SCMA systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(4): 388–391. doi: 10.1109/LWC.2016.2565581.
- [15] 杜洋, 董彬虹, 王显俊, 等. 基于串行策略的 SCMA 多用户检测算法[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(8): 1888–1893. doi: 10.11999/JEIT151259. DU Yang, DONG Binhong, WANG Xianjun, *et al.* Multiuser detection scheme for SCMA systems based on serial strategy[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(8): 1888–1893. doi: 10.11999/JEIT151259.

杨 维: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为宽带移动通信系统与专用移动通信。

赵懿伟: 男, 1993 年生, 硕士生, 研究方向为面向第 5 代移动通信的新型多址技术。

侯健琦: 女, 1991 年生, 硕士生, 研究方向为面向第 5 代移动通信的新型多址技术。