

## 基于部分码字消息传递的SCMA多用户检测算法

葛文萍 张雪婉\* 吴雄 代文丽

(新疆大学信息科学与工程学院 乌鲁木齐 830046)

**摘要:** 基于消息传递算法(MPA)进行多用户检测的稀疏码多址接入(SCMA)技术是一种面向5G的非正交多址技术(NOMA)。针对MPA复杂度较高的问题,该文首先分析接收信号概率密度函数值在不同信噪比(SNR)下的统计结果,并根据SCMA的非正交特性,综合考虑资源节点和用户节点之间的数据映射关系,提出基于概率密度函数值门限判决的部分码字搜索(PCS)MPA多用户检测算法(PCS-MPA)。仿真结果表明,在门限值合理的条件下,PCS-MPA在几乎不改变系统误比特率(BER)的条件下,降低了MPA的复杂度,尤其在高SNR条件下效果更好。

**关键词:** 非正交多址; 稀疏码多址; 消息传递算法; 概率密度函数

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)10-2309-07

DOI: 10.11999/JEIT171073

## Message Passing Multiuser Detection Algorithm for SCMA Based on Partial Codewords Searching

GE Wenping ZHANG Xuewan WU Xiong DAI Wenli

(College of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** Sparse Code Multiple Access (SCMA), based on Message Passing Algorithm (MPA) for multiuser detection, is a Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) scheme proposed to meet the demands of the future 5G communication. For the problem that the MPA has the characteristics of high algorithm complexity, some statistical results for the Probability Density Function (PDF) of received signal at various Signal to Noise Ratio (SNR) are first derived. Then, data mapping relationship between resources node and users node is fully considered based on the non-orthogonal property of SCMA, therefore a Partial Codewords Searching of MPA (PCS-MPA) is proposed with threshold decision scheme of PDF. Simulations results show that the proposed PCS-MPA can reduce the complexity without changing the Bit Error Ratio (BER), especially at the case of high SNR.

**Key words:** Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA); Sparse Code Multiple Access (SCMA); Message Passing Algorithm (MPA); Probability Density Function (PDF)

### 1 引言

正交多址接入一直在前几代的电信系统中被广泛应用。为了满足未来5G的众多需求,IMT-2020推进组提出了非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)<sup>[1]</sup>。通过NOMA空口技术,用户符号之间的正交关系已变成非正交关系,可以达到提高频谱效率,解决未来5G无线通信海量连接的问题<sup>[2]</sup>。在众多的NOMA技术中,由低密度信号(Low Density Signature, LDS)<sup>[3,4]</sup>演进而来

的稀疏码多址接入技术(Sparse Code Multiple Access, SCMA)<sup>[5]</sup>,具有更好的系统特性<sup>[6,7]</sup>。与正交频分复用多址技术(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDMA)相比,SCMA则更加适合M2M(Machine to Machine)和D2D(Device to Device)方案<sup>[8]</sup>。

基于和积算法的消息传递算法(Message Passing Algorithm, MPA)被广泛应用于LDPC和Turbo译码,该算法适用于解决边缘概率问题。在SCMA系统中,将高维调制与稀疏扩频融合在一起,直接把比特数据流映射为预先设定码本里的复数域多维码字,具有类似LDPC码的编码特性,可以使用MPA接收器对接收信号进行多用户检测,并能获得近最大后验意义下的次优检测性能<sup>[7]</sup>。相比与最优最大似然(Maximum Likelihood, ML)算

收稿日期: 2017-11-17; 改回日期: 2018-07-11; 网络出版: 2018-07-17

\*通信作者: 张雪婉 1243256137@qq.com

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2018D01C033)

Foundation Item: The Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region of China (2018D01C033)

法, MPA减少了符号数遍历来降低计算复杂度, 但MPA需要迭代循环, 仍具有比较大的复杂性。为了提高其收敛速度, 文献[9,10]提出一种串行MPA算法。结合并行和串行的MPA在文献[11]被提出。为了消除指数运算带来的大量存储空间的消耗, 一种基于MAX-Log的MPA被提出[12,13]。文献[14]根据信道质量, 提出一种减少用户节点的MPA; 另外, 一种部分外部信息传递(Partial Extrinsic Information Transmission)的MPA(PEIT-MPA)在文献[15]被提出。

针对MPA具有算法复杂度较高的特点, 本文提出一种新的基于部分码字搜索(Partial Codewords Searching, PCS)的MPA多用户检测算法(PCS-MPA)。首先采用蒙特卡洛对概率密度函数值进行统计, 通过统计结果, 设计门限判决进行用户码字筛选, 去掉那些对解码影响不大的码字。由于SCMA的非正交性, 在对不同资源块上筛选出的用户码字合并时, 综合考虑时频资源块和用户间的关系, 能够获得一种更低复杂度的MPA检测算法。该算法在多用户检测阶段, 只需计算满足门限判决条件的码字即可完成SCMA的多用户检测, 不但能降低资源节点的负担, 还能降低用户节点的负担。

本文内容安排如下: 第2节给出了SCMA的系统模型; 第3节将详细阐述PCS-MPA算法的实现; 第4节给出仿真结果; 最后总结全文。

## 2 SCMA系统模型

### 2.1 上行SCMA系统模型

在多用户SCMA系统中, 不同的用户将输入的二进制比特流通过不同的SCMA码本[16], 直接映射到SCMA多维码本的码字上。假设用户数和码本数都是 $J$ , 每个码本长度为 $K$ , 非零元素个数 $N(N < K)$ , 其过载因子定义为 $\lambda = \frac{J}{K}$ 。在传输时, 第 $j$ 个用户的 $\log_2(M)$ 比特流直接通过第 $j$ 个用户的 $K$ 维复数域码字 $\mathbf{x}_j$ , 直接映射到 $K$ 个共享的OFDM正交子载波上。其中码字是从码本 $\mathbf{X}_j$ 中选出, 且 $M = |\mathbf{X}_j|$ 为码本尺寸。SCMA资源块和用户间的映射关系, 可以用因子图矩阵 $\mathbf{F} = (\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_J)$ 来表示。当且仅当 $\mathbf{F}_{kj} = 1$ 时, 用户节点 $u_j$ 与资源节点 $c_k$ 连接。 $J = 6, K = 4$ 的SCMA因子图及其稀疏码矩阵 $\mathbf{F}$ 之间的对应关系如图1所示。

假定一个上行多用户SCMA通信系统,  $J$ 个用户共享 $K$ 个正交时频资源( $J > K$ ), 并传输数据给同一个基站, 若全部用户时间同步, 基站接收到的信号为全部用户信号叠加, 可以表示为

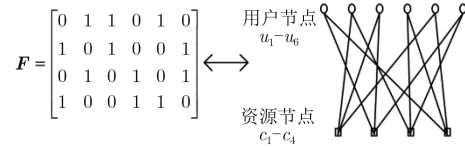


图1 矩阵 $\mathbf{F}$ 以及因子图的对应关系

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

式中,  $\mathbf{x}_j = [x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{Kj}]^T$ 表示第 $j$ 个用户发送的码字,  $\mathbf{h}_j = [h_{1j}, h_{2j}, \dots, h_{Kj}]^T$ 表示第 $j$ 个用户的信道向量,  $\mathbf{n} \sim cN(0, \sigma^2 \mathbf{I})$ 表示服从均值为0, 方差为 $\sigma^2$ 分布的加性高斯白噪声。

时频资源 $k$ 处接收到的信号为

$$y_k = \sum_{j \in \varepsilon_k} h_{kj} x_{kj} + n_k \quad (2)$$

$\varepsilon_k$ 表示稀疏码矩阵 $\mathbf{F}$ 第 $k$ 行的非零位置集。由于码字 $\mathbf{x}_j$ 是稀疏的, 所以在时频资源 $k$ 处仅有较少的码字冲突。

### 2.2 原始MPA

原始MPA算法将复杂的信号处理过程分解为多个相对简单的迭代步骤, 各个步骤之间以信息概率为基础, 要求软信息尽可能无损失地在因子图上传递[9]。每一次迭代过程包括两个阶段, 阶段1, 所有资源节点以用户节点传递过来的信息为先验信息, 同时更新因子图中全部资源节点 $c_k$ 到用户节点 $u_j$ 的消息 $M_{c_k \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j)$ 。阶段2, 所有用户节点通过合成资源节点传递过来的信息进行更新, 同时更新因子图中所有用户节点 $u_j$ 到资源节点 $c_k$ 的消息 $M_{u_j \rightarrow c_k}^t(\mathbf{x}_j)$ 。假设用户 $j$ 的码本里第 $m_j$ 个码字 $\mathbf{x}_j(m_j)$ 在资源块 $k$ 上所对应的码字元素为 $\mathbf{x}_{kj}(m_j)$ ,  $m_j$ 对应码字在码本里的位置序列。则原始MPA可以为

$$M_{c_k \rightarrow u_j}^t(x_{kj}(m_j)) = \sum_{\sim \{\mathbf{x}_j\}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \left\| y_k - \sum_{v \in \varepsilon_k} h_{kv} x_{kv}(m_v) \right\|^2 \right) \cdot \prod_{l \in \varepsilon_k / \{j\}} M_{u_l \rightarrow c_k}^{t-1}(x_{kl}(m_l)) \right\} \quad (3)$$

$$M_{u_j \rightarrow c_k}^t(x_{kj}(m_j)) = \prod_{p \in \varsigma_j / \{k\}} M_{c_p \rightarrow u_j}^t(x_{pj}(m_j)) \quad (4)$$

式中,  $t$ 为迭代次数,  $\sim \{\mathbf{x}_j\}$ 是 $\mathbf{x}_j$ 的边缘函数, 其定义在文献[17]被详细说明,  $\varsigma_j$ 表示稀疏码矩阵 $\mathbf{F}$ 第 $j$ 列的非零位置集。

达到预先设定的最大迭代次数 $t_{\max}$ 后，每一个用户各自的码字输出概率可以表示为

$$I(\mathbf{x}_j(m_j)) = \prod_{k \in \varepsilon_j} M_{c_k \rightarrow u_j}^{t_{\max}}(x_{kj}(m_j)) \quad (5)$$

### 3 本文提出的PCS-MPA算法

为了进一步降低MPA的复杂度，本文以概率密度函数为基础，利用蒙特卡洛统计规律来确定用户各个码字概率，舍去那些对结果几乎没有影响的码字，来降低MPA的复杂度。

#### 3.1 对概率密度数值的统计分析

假定 $J=6, K=4$ ，把式(2)按因子图矩阵 $\mathbf{F}$ 展开：

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= h_{12}x_{12}(m_2) + h_{13}x_{13}(m_3) + h_{15}x_{15}(m_5) + n_1 \\ y_2 &= h_{21}x_{21}(m_1) + h_{23}x_{23}(m_3) + h_{26}x_{26}(m_6) + n_2 \\ y_3 &= h_{32}x_{32}(m_2) + h_{34}x_{34}(m_4) + h_{36}x_{36}(m_6) + n_3 \\ y_4 &= h_{41}x_{41}(m_1) + h_{44}x_{44}(m_4) + h_{45}x_{45}(m_5) + n_4 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中， $y_k([m_j]) = \sum_{j \in \varepsilon_k} h_{kj}x_{kj}(m_j)$  表示合成信号，在星座图上本文称之为合成星座点。当 $M=4$ 时，由式(6)可知，每个资源块 $k$ 上所连接的用户数 $d_f=3$ ，则资源块 $k$ 上合成信号的可能性有64种，即对应64个合成星座点，其合成星座图如图2所示。

由此可知，SCMA接收端在一次译码过程中，每个资源块上需要计算合成信号的概率密度函数值个数为 $M^{d_f}$ 。为了能够清楚说明本文所提算法理论，不失一般性，本文定义资源块 $k$ 上所连接的所有用户发送码字元素的组成集合为

$$\mathbf{x}_k([m_j]) = \{x_{kj}(m_j), j \in \varepsilon_k\} \quad (7)$$

例如图1中， $\mathbf{x}_k([1\ 2\ 4])$ 表示所连接的用户2, 3, 5所发送的码字位置序列分别为1, 2, 4。

由式(3)，时频资源块 $k$ 上可能的合成信号 $y_k([m_j])$ 与接收信号 $y_k$ 之间都会对应一个概率密度函数值为

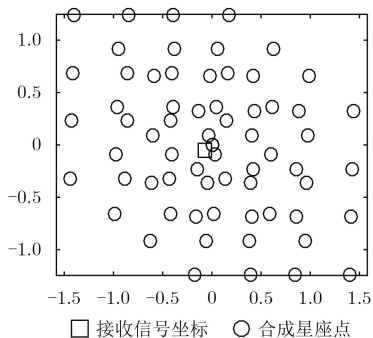


图2 合成星座图

$$f(y_k|y_k([m_j])) = f(y_k|\mathbf{x}_k([m_j])) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \left\| y_k - \sum_{j \in \varepsilon_k} h_{kj}x_{kj}(m_j) \right\|^2\right) \quad (8)$$

其中， $d_k([m_j]) = \|y_k - y_k(m_j)\|$ 表示欧氏距离。

为了分析 $f(y_k|\mathbf{x}_k([m_j]))$ 的分布情况，对其各种可能的值在不同信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)下进行蒙特卡洛仿真。为了方便，设定概率密度门限阈值Td进行仿真并归一化，判决和归一化公式定义为

$$f(y_k|\mathbf{x}_k([m_j])) \geq Td \quad (9)$$

$$\eta = \frac{K \cdot \bar{m}^{d_f}}{K \cdot M^{d_f}} \quad (10)$$

其中， $\bar{m}$ 是满足门限判决条件下映射到一个资源块上的用户平均码字数。仿真结果如图3所示。在统计过程中，满足式(9)的合成信号 $y_k([m_j])$ 的个数被称为合成星座传递量。从图3可以看出，同一SNR下，Td越大，合成星座传递量越少；随着SNR的增大，合成星座传递量不断减少。换句话说，随着SNR的增大，概率密度值整体下降。

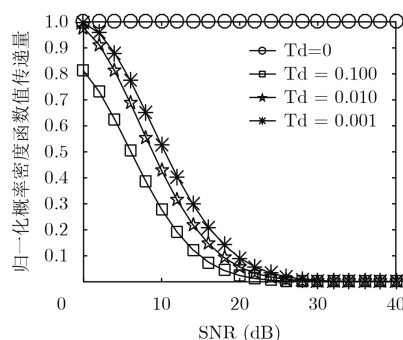


图3 不同门限值下的合成星座计算数目对比

在 $M=4, d_f=3$ 条件下，产生一组随机信号得到的不同SNR下接收信号 $y_1$ 的64种可能的概率密度函数值的分布情况，如图4所示。从图4可知，SNR越大，大多数合成星座点的概率密度值在下降，但在某一区域下降缓慢，该区域极有可能包含能够正确译码的星座点。尤其在高SNR下，在某一区域的概率密度值很大。综合图3和图4，可以得到如下两个结论<sup>[15]</sup>：

结论1:  $f(y_k|\mathbf{x}_k([m_j]))$ 的分布整体上以SNR的增加而减小。

结论2:  $f(y_k|\mathbf{x}_k([m_j]))$ 的值在高SNR条件下，某一特定点的值很大。

主要原因是，在高SNR条件下，接收信号与合成星座图中的一个星座点近似相等的可能性很大，

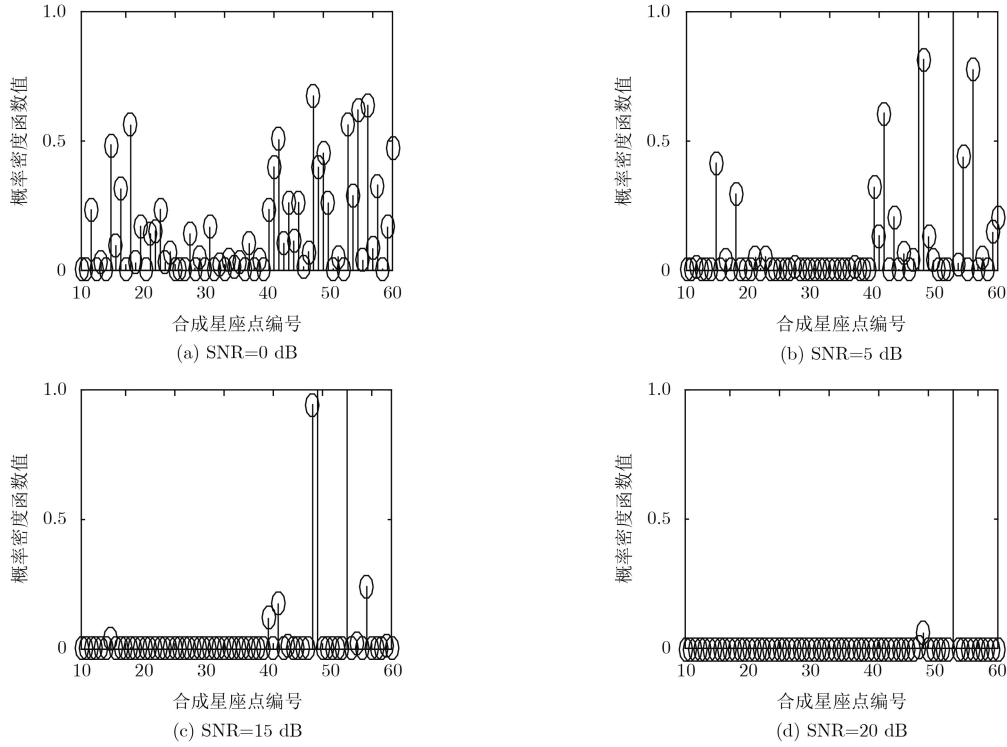


图4 不同SNR下合成星座与接收信号之间的概率密度函数值

$$y_k \approx \sum_{j \in \varepsilon_k} h_{kj} x_{kj}(m_j) = y_k([m_j]) \quad (11)$$

则  $d_k([m_j]) = \|y_k - y_k(m_j)\| \approx 0$ , 代入式(8):

$$f(y_k | \mathbf{x}_k([m_j])) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (12)$$

此时,  $f(y_k | \mathbf{x}_k([m_j]))$  随噪声功率成单调递减。当发射功率不变, SNR较高的情况下, 噪声功率小, 对应的值就较大。该星座点是最有可能正确译码所需的星座点。

值得注意的是, 由式(8)可知, Td的选取可以根据欧式距离  $d_k([m_j])$  来设定, 由于噪声功率  $\sigma^2$  的影响, 则可以定义基于  $d_k([m_j])$  的置信度区间:

$$0 < d_k([m_j]) = \left\| y_k - \sum_{j \in \varepsilon_k} h_{kj} x_{kj}(m_j) \right\| \leq \beta\sigma \quad (13)$$

其中,  $\beta > 0$ 。在理想情况下, 当  $\beta = 1, 2, 3$  时的置信区间与正确译码概率的对应关系如表1。由表1可知, 当  $\beta = 2$  时, 置信区间为  $(-2\sigma, 2\sigma)$  可以保证时频资源块  $k$  上正确译码的概率值达到95.4%。此时 Td 的取值为  $\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-2)$ 。

虽然基于欧式距离门限设定<sup>[18]</sup>相对更灵活, 但其对码本性能的要求较高, 主要原因是对于单一的时频资源, 接收端接收到的是  $d_f$  个用户叠加后的信号  $y_k$ , 其分布规律满足表1, 但对于共享同一时频资源的每个用户来说, 用户之间必定存在干扰, 就不再严格地服从表1的统计结果。当码本的性能越

表1 正态分布规律

置信区间	概率值(%)
$(-\sigma, \sigma)$	68.3
$(-2\sigma, 2\sigma)$	95.4
$(-3\sigma, 3\sigma)$	99.7

好, 用户之间干扰越小, 基于欧式距离门限设定才越可靠。而基于蒙特卡洛概率密度值统计规律门限设定却很好地把用户间的干扰考虑进去。因此, 本文采用的是不受码本性能限制的蒙特卡洛概率密度统计理论。

### 3.2 基于部分码字搜索的PCS-MPA算法

由3.1节的分析可知, 当概率密度函数值较小时, 对译码的结果影响越小。也就是说, 概率密度函数值越大, 其对应下的码字越有可能正确译码。因此可以利用门限Td判断来进行用户码字筛选, 当概率密度函数值小于门限值, 就认为该码字不可能正确译码, 大于等于该门限值, 就认为该码字可能正确译码。为了避免在MPA检测阶段存在判决, 本文采用以下方法, 先把筛选的码字存储起来, 然后在检测阶段, 只有满足判决门限的用户码字参与译码。

由于SCMA的码本是多维码字,  $j$  用户的一个码字的  $N$  个非零元素需要映射到  $N(N < K)$  个资源块上, 在利用门限判决筛选用户码字时, 需要综合考虑  $N$  个资源块上的概率密度值。基于此, 本文采用两种策略进行处理。

**策略1：** 从资源块的角度考虑，保证每个资源块 $k$ 在门限 $T_d$ 下概率密度函数值具有相同的统计结论，此时，第 $j$ 个用户码字 $\mathbf{x}_j(m_j)$ 的 $N$ 个非零元素之间相互独立，互不影响。因此，式(3)可以写为

$$M_{c_k \rightarrow u_j}^t(x_{kj}(m_j)) = \sum_{f(y_k|\mathbf{x}_k([m_j])) \geq T_d} \left\{ f(y_k|\mathbf{x}_k([m_j])) \times \prod_{l \in \varepsilon_k/\{j\}} M_{u_l \rightarrow c_k}^{t-1}(x_{kl}(m_l)) \right\} \quad (14)$$

其中， $T_d$ 的值设定要合理，太大将会把一部分能够正确译码的码字筛选掉，从而影响检测结果。式(14)即为文献[15]提出的PEIT-MPA多用户检测算法，可以明显地降低算法复杂度。但该算法只考虑了资源节点上的用户码字对该资源节点的影响，并未考虑用户节点。

该策略综合下来，在资源块 $k$ 上满足门限 $T_d$ 的所有用户码字元素集合 $\{\mathbf{x}_k([m_j])\}$ 概率值为

$$P(\{\mathbf{x}_k([m_j])\}) = P(\|f(y_k|\mathbf{x}_k([m_j])\| \geq T_d\|), \quad \forall k \in \varsigma_j \quad (15)$$

**策略2：** 从用户角度考虑，假设第 $j$ 个用户的第 $m$ 个码字 $\mathbf{x}_j(m_j)$ 中的 $N$ 个非零元素 $x_{nj}(m_j)$  ( $1 \leq n \leq N$ )同时映射到了 $N$ 个资源块上，那么在同一门限值 $T_d$ 的条件下，第 $n$ 个资源块上的满足门限条件的合成星座点，将会包含 $j$ 用户的码字元素 $x_{nj}(m_j)$ 。因此可以定义：

$$\mathbf{M}_I = \bigcap_{k \in \varsigma_j} \{ \{ [m_j] \}, f(y_k|\mathbf{x}_k([m_j])\| \geq T_d \} \quad (16)$$

其中， $\mathbf{M}_I = [\mathbf{M}_1^I, \mathbf{M}_2^I, \dots, \mathbf{M}_J^I]$ 表示 $N$ 个资源块同时满足门限值 $T_d$ 条件下 $J$ 个用户的候选码字序列集合， $\{ [m_j] \}$ 表示一个资源块上的用户码字序列集合， $\bigcap \{ \cdot \}$ 表示集合交运算。因此，同一SNR下，可以认为 $j$ 个用户的码字中 $N$ 个非零元素服从独立同分布。因此，在资源块 $k$ 上满足门限 $T_d$ 的所有用户码字元素集合 $\{\mathbf{x}_k([m_j])\}$ 概率值为

$$P(\{\mathbf{x}_k([m_j])\}) = \prod_{k \in \varsigma_j} P(\|f(y_k|\mathbf{x}_k([m_j])\| \geq T_d\|) \quad (17)$$

由式(16)得到的候选用户码字，代入式(3)，则式(3)可以改写为

$$M_{c_k \rightarrow u_j}^t(x_{kj}(m_j)) = \sum_{[m_j] \in \mathbf{M}_j^I} \left\{ f(y_k|\mathbf{x}_k([m_j])) \times \prod_{\substack{l \in \varepsilon_k/\{j\} \\ m_l \in \mathbf{M}_l^I}} M_{u_l \rightarrow c_k}^{t-1}(x_{kl}(m_l)) \right\} \quad (18)$$

由式(16)可知，每一个资源块对应的同一个用户的候选码字序列相同，因此，式(4)可以改写为

$$M_{u_j \rightarrow c_k}^t(x_{kj}(m_j)) = \prod_{\substack{p \in \varsigma_j/\{k\} \\ m_j \in \mathbf{M}_j^I}} M_{c_p \rightarrow u_j}^t(x_{pj}(m_j)) \quad (19)$$

式(18)与式(19)即为本文提出的PCS-MPA检测算法，该算法仅以合成星座点中概率密度函数值较大的用户码字参与MPA运算过程，可以进一步降低算法的运算复杂度。

对比式(14)和式(18)可以看出，在同一判决门限条件下，式(14)的复杂度明显高于式(18)的复杂度，尤其在 $T_d$ 较大的情况下。对比式(15)和式(17)可知，式(17)的值将小于式(15)的值，但 $T_d$ 较小的情况下，两者几乎接近，因此，本文算法在 $T_d$ 合适的情况下，仍能保持较高概率的正确检测。值得注意的是，由于串行MPA把资源节点和用户节点消息更新公式合二为一，更新后的消息能够立即传递给下一个节点的消息更新<sup>[9,10]</sup>，因此，本文方法同样可以用于降低串行MPA的复杂度。

### 3.3 复杂度分析

本文复杂度以算法涉及到的加法器和乘法器数目来进行评估，相关算法包括原始MPA算法、基于部分外部信息传递的MPA(PEIT-MPA)以及本文提出的PCS-MPA。下面给出3种算法的复杂度表达式。

$$C_{\text{mul}}^{\text{MPA}} = t_{\max} K M^{d_f} (2d_f + 1) + t_{\max} J d_v M (d_v - 2) \quad (20)$$

$$C_{\text{add}}^{\text{MPA}} = K d_f M^{d_f} + t_{\max} d_f (K M^{d_f} - K M) \quad (21)$$

$$C_{\text{mul}}^{\text{PEIT-MPA}} = t_{\max} K (\overline{M}_p)^{d_f} (2d_f + 1) + t_{\max} J d_v M (d_v - 2) \quad (22)$$

$$C_{\text{add}}^{\text{PEIT-MPA}} = K d_f (\overline{M}_p)^{d_f} + t_{\max} d_f (K (\overline{M}_p)^{d_f} - K M) \quad (23)$$

$$C_{\text{mul}}^{\text{PCS-MPA}} = t_{\max} K (\overline{M}_P)^{d_f} (2d_f + 1) + t_{\max} J d_v \overline{M}_P (d_v - 2) \quad (24)$$

$$C_{\text{add}}^{\text{PCS-MPA}} = K d_f (\overline{M}_P)^{d_f} + t_{\max} d_f (K (\overline{M}_P)^{d_f} - K \overline{M}_P) \quad (25)$$

其中， $\overline{M}_p$ 和 $\overline{M}_P$ 分别表示PEIT-MPA和PCS-MPA的平均用户码字，也是计算复杂度的关键。

## 4 仿真结果分析

本文基于上行SCMA系统模型对本文提出的PCS-MPA进行仿真，各仿真参数为： $J = 6$ ,

$K=4, M=4$ , 过载率 $\lambda=150\%$ , 信道类型为加性高斯白噪声信道AWGN, 采用的码本为华为率先提出的原始码本<sup>[16]</sup>。

#### 4.1 BER性能对比

图5为本文提出的PCS-MPA与原始MPA算法及PEIT-MPA的BER性能随信噪比SNR的对比如。由图5可以看出, 判决门限 $T_d$ 越小, BER性能越好, 原因是 $T_d$ 过大将会过度筛选用户码字信息。与 $T_d=0.01$ 的PEIT-MPA和原始MPA相比,  $T_d=0.01$ 的PCS-MPA的BER性能与之相近, 主要原因是基于概率密度函数值的码字筛选可以保证筛选出来的候选码字可以大概率地保证多用户检测的正确性。

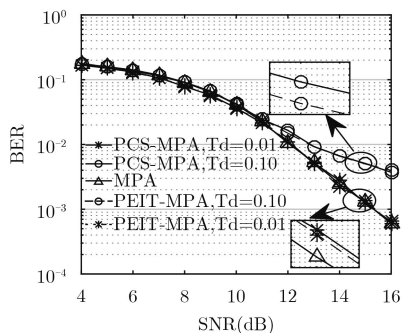


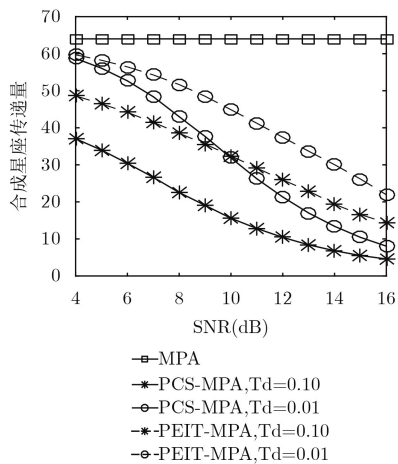
图5 不同门限下的BER-SNR性能比较

#### 4.2 迭代性能

图6为本文所提PCS-MPA与原始MPA及PEIT-MPA在SNR=10 dB和SNR=14 dB的收敛速度对比。由图6可知, 本文算法并不影响MPA的收敛速度。在3~5次迭代后, 3种算法均收敛。

#### 4.3 复杂度对比

图7表示本文算法、PEIT-MPA算法以及MPA



(a) 各种算法的平均码字传递量对比

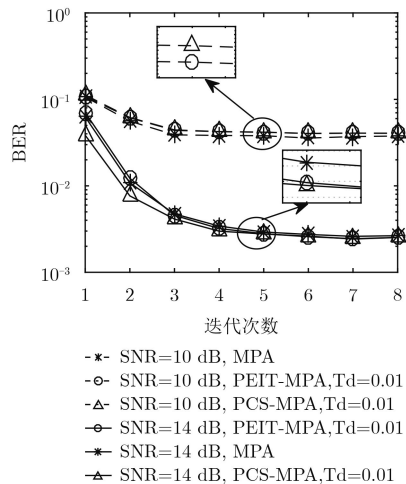
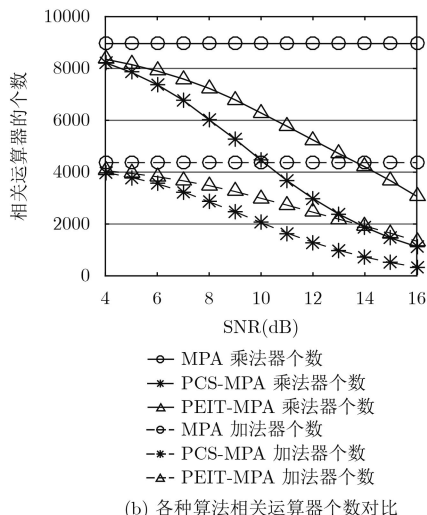


图6 不同门限下的收敛速度对比

的在 $t_{\max}=5$ 的算法复杂度对比。由于3.3节中式(22)~式(25)中的平均码字不容易求得, 仿真时, 图7(a)以每个资源块满足门限 $T_d$ 的合成星座平均量作为平均码字传递量进行对比。图7(b)以图7(a)中BER性能较好的 $T_d=0.01$ 的平均码字作为加法器和乘法器公式计算标准。由图7可以看出, 本文算法其复杂度明显降低, 尤其在高SNR条件下。原因是充分考虑了SCMA的非正交特性, 既能降低资源节点的运算量, 还能降低用户节点的运算量。因此, 该算法能在BER性能和复杂度之间能够取得较好的平衡。

## 5 结论

本文针对MPA具有复杂度较高的特点, 根据蒙特卡洛概率密度函数值统计结果, 提出了一种基于部分用户码字搜索运算的PCS-MPA多用户检测算法, 来减少MPA在进行多用户检测时的运算量。由于SCMA的非正交性, 结合资源节点和用户



(b) 各种算法相关运算器个数对比

图7 复杂度对比

节点之间的关系, 不但能进一步降低资源节点的运算量, 还能降低用户节点的运算量。仿真结果表明, 相对于原始MPA算法, 在判决门限值设定合理的情况下, 本文所提的PCS-MPA算法既能保持较好的BER性能, 又能降低算法复杂度。

### 参考文献

- [1] SOLDANI D and MANZALINI A. Horizon 2020 and beyond: On the 5G operating system for a true digital society[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2015, 10(1): 32–42. doi: [10.1109/MVT.2014.2380581](https://doi.org/10.1109/MVT.2014.2380581).
- [2] BENJEBBOUR A, SAITO Y, KISHIYAMA Y, et al. H Concept and practical considerations of non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access[C]. International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems, Naha, Japan, 2013: 770–774. doi: [10.1109/ISPACS.2013.6704653](https://doi.org/10.1109/ISPACS.2013.6704653).
- [3] 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](https://doi.org/10.1109/TSP.2007.909320).
- [4] RAZAVI R, HOSHYAR R, IMRAN M A, et al. Information theoretic analysis of LDS scheme[J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(8): 798–800. doi: [10.1109/LCOMM.2011.061011.102098](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2011.061011.102098).
- [5] NIKOPOUR H and BALIGH H. Sparse code multiple access[C]. IEEE, International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, London, UK, 2013: 332–336. doi: [10.1109/PIMRC.2013.6666156](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2013.6666156).
- [6] 李钊, 戴晓琴, 陈柯宇, 等. 非正交多址接入下行链路用户匹配与功率优化算法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(8): 1804–1811. doi: [10.11999/JEIT161197](https://doi.org/10.11999/JEIT161197).  
LI Z, DAI X H, CHEN K Y, et al. User matching and power optimization algorithm for downlink NOMA[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 1804–1811. doi: [10.11999/JEIT161197](https://doi.org/10.11999/JEIT161197).
- [7] WANG B, WANG K, LU Z, et al. Comparison study of non-orthogonal multiple access schemes for 5G[C]. IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, Ghent, BEL, 2015: 1–5. doi: [10.1109/BMSB.2015.7177186](https://doi.org/10.1109/BMSB.2015.7177186).
- [8] DU Y, DONG B H, and CHEN Z. Joint Sparse graph-detector design for downlink MIMO-SCMA system[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2017, 6(1): 14–17. doi: [10.1109/LWC.2016.2623785](https://doi.org/10.1109/LWC.2016.2623785).
- [9] 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](https://doi.org/10.11999/JEIT151259).  
DU Y, DONG B H, WANG X J, 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](https://doi.org/10.11999/JEIT151259).
- [10] DU Y, DONG B H, CHEN Z, 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](https://doi.org/10.1109/LWC.2016.2565581).
- [11] DU Y, DONG B H, CHEN Z, et al. Shuffled multiuser detection schemes for uplink sparse code multiple access systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(6): 1231–1234. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2551742](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2551742).
- [12] LU L, CHEN Y, GUO W, et al. Prototype for 5G new air interface technology SCMA and performance evaluation[J]. *China Communications*, 2015, 12(s1): 38–48. doi: [10.1109/CC.2015.7386169](https://doi.org/10.1109/CC.2015.7386169).
- [13] ZHANG S Q, XU X Q, LU L, et al. Sparse code multiple access: An energy efficient uplink approach for 5 G wireless systems[C]. IEEE Global Telecommunications Conference, Austin, USA, 2014: 4782–4787. doi: [10.1109/GLOCOM.2014.7037563](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2014.7037563).
- [14] DU Y, DONG B H, CHEN Z, et al. Low complexity detector in sparse code multiple access systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(9): 1812–1815. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2592912](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2592912).
- [15] 邵凯, 余贝, 王光宇. 部分外部信息传递的SCMA多用户检测算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(10): 2320–2326. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.10.24](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.10.24).  
SHAO K, YU B, and WANG G Y. Multiuser detection scheme for SCMA with partial extrinsic information transmission[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(10): 2320–2326. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.10.24](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.10.24).
- [16] TAHERZADEH M, NIKOPOUR H, BAYESTECH A, et al. SCMA codebook design[C]. IEEE Vehicular Technology Conference Fall, Vancouver, CAN, 2014: 14–17. doi: [10.1109/VTCFall.2014.6966170](https://doi.org/10.1109/VTCFall.2014.6966170).
- [17] KSCHISCHANG F R, FREY B J, and LOELIGER H A. Factor graphs and the sum-product algorithm[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, 47(2): 498–519. doi: [10.1109/18.910572](https://doi.org/10.1109/18.910572).
- [18] YANG L, MA X, and SIU Y M. Low complexity MPA detector based on sphere decoding for SCMA[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(8): 1855–1858. doi: [10.1109/LCOMM.2017.2697425](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2697425).

葛文萍: 女, 1969年生, 教授, 硕士生导师, 研究方向为无线通信、光纤通信。

张雪婉: 男, 1991年生, 硕士生, 研究方向为无线通信关键技术。

吴雄: 男, 1990年生, 硕士生, 研究方向为无线通信关键技术。

代文丽: 女, 1992年生, 硕士生, 研究方向为无线通信的资源分配。