

基于迭代剔除的 SCMA 多用户检测算法

朱翠涛, 韦宁, 汪汉新, 李中捷

(中南民族大学智能无线通信湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 针对稀疏码多址接入(SCMA)系统中译码算法复杂度高问题, 提出一种基于迭代剔除的多用户检测算法(RM-MPA)。首先基于串行消息传播机制提出了一种简单直观的方法用于比较用户间的译码优势, 然后在每轮迭代过后, 对译码优势高的前 n 个用户直接进行译码并剔除, 不再参与后继迭代过程, 从而使后续每轮迭代的复杂度依次降低。在此基础上提出了译码优势用户排序和正交用户分组 2 种剔除策略。实验结果表明, 基于正交用户分组剔除策略的 RM-MPA 算法在降低译码复杂度的前提下, 能够保证译码性能, 同时由于每轮迭代的复杂度依次降低, 也减小了译码时延。

关键词: 稀疏码多址接入; 消息传播算法; 多用户检测; 迭代剔除策略

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018093

Multi-user detection scheme for SCMA systems based on iteration removal

ZHU Cuitao, WEI Ning, WANG Hanxin, LI Zhongjie

Hubei Key Laboratory of Intelligent Wireless Communication, South-Center University for Nationalities, Wuhan 430074, China

Abstract: A multi-user detection scheme based on iteration removal (RM-MPA) was proposed to solve the problem of high complexity of decoding algorithm for sparse code multiple access (SCMA) systems. Firstly, a simple and novel method to compare the decoding advantages between users was proposed. Then n users in front of them with higher decoding advantages directly decoded and removed after each iteration, the users removed no longer participate in the subsequent iteration, so the complexity of subsequent iterations decreased gradually. Moreover, two iteration removed strategies based on decoding advantages of users and orthogonal user grouped were proposed respectively. Simulation results show that the RM-MPA with removed strategies based on orthogonal user grouped, which can reduce the decoding complexity with well decoding performance, and the decoding delay is also decreased.

Key words: sparse code multiple access, message passing algorithm, multi-user detection, iteration removal strategy

1 引言

面向 5G 的非正交多址技术比正交多址具有更高的可达容量, 因此得到业界的广泛关注^[1-2]。SCMA^[3-4]是一种非正交多址技术, 具有独特的编码优势。SCMA 由低密度签名序列码分多址(LDS-CDMA, low density signature-code-division

multiple access) 发展而来^[5], 不同于 LDS-CDMA 的是, SCMA 把调制与扩频结合起来, 直接把用户发送的数据比特流映射成预定义稀疏码本中的多维稀疏码字。因此, SCMA 获得了 LDS-CDMA 中没有的成形增益, 其误码率性能也比 LDS-CDMA 好。然而, SCMA 要正式成为 5G 选用的空口技术^[6], 高效的多用户检测是要解决的关键技术之一。

收稿日期: 2017-04-05; 修回日期: 2018-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61671483, No.61379028); 湖北省自然科学基金资助项目(No.2016CFA089)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61671483, No.61379028), The Natural Science Foundation of Hubei Province (No.2016CFA089)

利用 SCMA 码字结构具有的稀疏特性,文献[7]提出了一种基于消息传播(MPA, message passing algorithm)的次优多用户检测算法,用来有效接近理论上最优的最大联合后验概率(MAP, maximum joint a posteriori probability)译码算法的性能。虽然 MPA 译码算法的复杂度远小于 MAP 译码算法,但随着用户数的增加,MPA 译码算法的复杂度呈指数增加,不利于应用于实际系统中。文献[8]在 MPA 的基础上提出了 MAX-Log MPA 算法,利用雅克比公式变换到对数域,使 MPA 算法中的指数运算消失,降低了复杂度。文献[9]提出了基于部分边缘化的 MPA 算法,在降低 MPA 算法复杂度的同时保证译码性能,但该算法所引入的重要参数取值需进一步探讨。文献[10]提出了串行干扰消除(SIC, successive interference cancellation)和基于串行干扰消除的 MPA(SIC-MPA) 2 种译码算法, SIC 算法复杂度较低,而译码性能较差, SIC-MPA 算法的复杂度适中,译码性能较好,但这 2 种算法都需要在发送端改变原有编码规则和多维调制星座图设计的支持。文献[11]给出了多种降低 MPA 译码算法复杂度的方法, ProjMPA、CMPA 和 SelEXP-MPA, 但只对 ProjMPA 进行了仿真分析,而且涉及多维调制星座图和码本的最优设计,译码性能有待验证。文献[12]提出了 WMPA 译码算法,其原理是对 MPA 算法进行加权处理,以加权取代了原 MPA 算法的迭代运算,降低了算法的复杂度,再结合 Turbo 编码,可以取得较好的译码性能。文献[13]在 MPA 的基础上,改变消息传播的机制,以串行消息传播取代原来的并行消息传播,使消息的传播更及时,加快了 MPA 算法的收敛速度,降低 MPA 算法所需的迭代次数。文献[14]提出基于门限的 MPA 算法,根据码字的可靠性,用户被分成可靠用户集和不确定用户集,每次迭代过后都要对用户消息的可靠性进行检测并与门限值比较,若用户消息的可靠性达到了门限的要求则对此用户进行译码并将其放到可靠用户集中,且不再对可靠用户集里的用户进行消息的更新,若用户消息的可靠性达不到门限值的要求,则将此用户放到不确定用户集中,然后再对不确定用户集中的所有用户进行下一轮迭代,此方法虽然能够降低译码的复杂度,但由于用户消息的随机性比较大,若门限值取值不恰当,则很难达到降低 MPA 算法复杂度的效果。SCMA 与大规模 MIMO 技术相结合^[15-16],将进一步提高系统的频谱资源利

用率,但多用户检测将更加复杂,低复杂度的多用户检测方法显得更加重要。

综上所述,本文提出了基于迭代剔除的 SCMA 多用户检测算法,主要思想是利用 SCMA 编码结构特点,算法边迭代边检测出一部分用户,而不是在算法迭代完毕后才将所有用户统一检测出。此算法的优势在于随着迭代次数的增加,每次迭代的复杂度逐步降低。算法的主要实现过程如下。首先对用户的译码优势进行分析并排序,然后在每一轮迭代后,找到译码可靠性高的前 n 个用户直接进行译码并剔除,被剔除的用户不再参与后续的迭代运算,则每一轮迭代过后,未译码的用户数越来越少,所以随着迭代次数的增加,此算法每一次迭代的复杂度也会随着降低,并提出了 2 种迭代剔除策略:基于译码优势用户排序剔除策略和正交用户分组剔除策略,前者每轮迭代剔除的用户数可变,比较灵活,后者每轮迭代剔除的用户数固定,但在剔除的用户数相同时,后者的复杂度要低于前者。

2 系统与信号模型

假定一个拥有 J 个用户共享 K 个时频资源块的上行 SCMA 系统,用户 $j(j=1,2,\dots,J)$ 发送的数据比特流 b_j 被映射成 K 维码字向量 \mathbf{x}_j , \mathbf{x}_j 从长度为 M 的对应用户码本 $\boldsymbol{\chi}_j$ 中取得,每个码字都是包含 $N < K$ 个非零元素的 K 维稀疏向量。在非正交环境下,用户数 J 要大于时频资源块数 K ,则系统过载率为: $\lambda = \frac{J}{K}$ 。用户多路复用信号经过同步后,基站接收到的信号表示为

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

其中, $\mathbf{x}_j = (x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{K,j})^T \in \mathbf{C}^K$ 表示用户 j 的码字向量, $\mathbf{h}_j = (h_{1,j}, h_{2,j}, \dots, h_{K,j})^T \in \mathbf{C}^K$ 表示用户 j 的信道向量, $\mathbf{n} = (n_1, n_2, \dots, n_K)^T$ 表示高斯白噪声且 $\mathbf{n} \sim \text{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I})$, $\text{diag}(\mathbf{h}_j)$ 表示以向量 \mathbf{h}_j 的元素为对角元素构造的对角矩阵。那么,时频资源块 k 处接收到的信号为

$$y_k = \sum_{j=1}^J h_{k,j} x_{k,j} + n_k \quad (2)$$

SCMA 系统的编码结构可以用编码指示矩阵

$\mathbf{F} = (\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_J)$ 来表示, 其中, $\mathbf{f}_j = (f_{1,j}, f_{2,j}, \dots, f_{K,j})^T \in \mathbf{B}^K$ 是用户 j 的编码指示向量, 当 $f_{k,j} = 1$ 时, 表示用户 j 占用时频资源块 k 。除了编码指示矩阵外, 也可利用因子图表示 SCMA 系统的编码结构, 当变量节点 j 与功能节点 k 相连时 $f_{k,j} = 1$, 否则 $f_{k,j} = 0$, 一个因子图与 \mathbf{F} 矩阵对应关系的例子如图 1 所示。分别用 d_f 和 d_c 表示矩阵 \mathbf{F} 中每一行和每一列元素为 1 的个数, 则集合 $\zeta_j = \{k | f_{k,j} = 1\}$ 和集合 $\zeta_k = \{j | f_{k,j} = 1\}$ 分别表示用户 j 占用的时频资源块集和占用时频资源块 k 的用户集。因为 SCMA 码字的稀疏特性, 使每个时频资源块上实际叠加的用户码字个数要远小于 J , 所以式(2)可以改写为

$$y_k = \sum_{j \in \zeta_k} h_{k,j} x_{k,j} + n_k \quad (3)$$

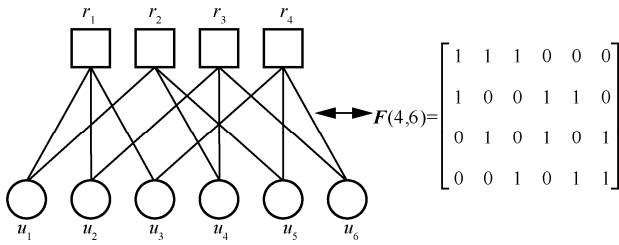


图 1 SCMA 编码结构的因子图与 \mathbf{F} 矩阵对应关系

图 1 中, r_k 为功能节点, 也表示时频资源块 k , u_j 为变量节点, 也表示用户 j 。每个变量节点与 2 个功能节点相连, 表示每个用户占用 2 个时频资源块; 每个功能节点与 3 个变量节点相连, 表示每个时频资源块同时被 3 个用户占用。相应地, 在 \mathbf{F} 矩阵中, 每一行代表一个时频资源块, 每一列代表一个用户的码字结构, 每一行中元素为 1 的位置表示占用此资源块对应的用户, 每一列中元素为 1 的位置表示此用户所占用的对应资源块。

3 MPA 译码算法及性能分析

理论上, 最优的 SCMA 系统译码算法是 MAP 算法, 但其复杂度高, 难以将其应用于实际通信系统中。利用 SCMA 码字所具有的稀疏特性, 可以用次优的 MPA 算法来进行译码。MPA 算法有 2 种消息传播机制, 即为并行消息传播与串行消息传播, 并行消息传播是指在每轮迭代过程中, 先更新全部功能节点, 再去更新所有变量节点, 而串行消息传

播是更新一个功能节点, 便去更新与这个功能节点相关的变量节点^[17], 本文把基于这 2 种消息传播的 MPA 算法分别记为 PMPA 和 SMPA。如图 1 中的因子图所示, PMPA 算法通过接收外部信息, 先后更新功能节点集 $RN\{r_k\}$ 与变量节点集 $UN\{u_j\}$ 来改变用户码字的概率分布^[18], 功能节点与变量节点的更新分别表示为

$$I_{r_k \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j) = \sum_{\mathbf{x}_j} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \left\| y_k - \sum_{m \in \zeta_k} h_{k,m} x_{k,m} \right\|^2\right) \times \prod_{l \in \zeta_k}^{l \neq j} I_{u_l \rightarrow r_k}^{t-1}(\mathbf{x}_l) \right\} \quad (4)$$

$$I_{u_j \rightarrow r_k}^t(\mathbf{x}_j) = \text{normalize} \left(\prod_{m \in \zeta_j} I_{r_m \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j) \right) \quad (5)$$

其中, $l \in \zeta_k$ 表示在用户集 ζ_k 中去除用户 j , t 表示迭代次数, 在达到预定的最大迭代次数 t_{\max} 后, 用户各码字概率估计为

$$Q(\mathbf{x}_j) = \prod_{k \in \zeta_j} I_{r_k \rightarrow u_j}^{t_{\max}}(\mathbf{x}_j) \quad (6)$$

由式(4)和式(5)可知, 在 PMPA 算法中, 本轮迭代产生的新消息要等到下一轮迭代才会用上, 而 SMPA 算法不是先后更新功能节点与变量节点, 它更新一个功能节点便去更新与之相关的变量节点, 使本轮迭代更新过的功能节点消息可被用于同一轮中其他功能节点的更新, SMPA 算法中变量节点的更新与 PMPA 算法相同, 不同的是 SMPA 算法中变量节点的更新紧接于每一个功能节点的更新之后, SMPA 算法中功能节点的更新可以表示为

$$I_{r_k \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j) = \sum_{\mathbf{x}_j} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \left\| y_k - \sum_{m \in \zeta_k} h_{k,m} x_{k,m} \right\|^2\right) \cdot \prod_{\substack{l \in \zeta_k \\ l < j}} I_{u_l \rightarrow r_k}^t(\mathbf{x}_l) \prod_{\substack{l \in \zeta_k \\ l > j}} I_{u_l \rightarrow r_k}^{t-1}(\mathbf{x}_l) \right\} \quad (7)$$

其中, $l < j$ 和 $l > j$ 分别表示在用户 j 之前和之后的用户 l 。从式(7)可以看出, 在本轮迭代更新部分功能节点时已经用到了本轮迭代更新过的变量节点的消息, 显然本轮更新过的变量节点消息比上一轮变量节点的消息要更可靠, 即 SMPA 算法中的消息

传播更及时，使其收敛速度更快。

通过上述分析可知，MPA 算法的复杂度主要与 $t_{\max} KM^{d_f}$ 有关，虽然 SMPA 的收敛速率比 PMPA 快，但 PMPA 与 SMPA 都是在 t_{\max} 次迭代之后才将所有用户信号统一检测出。因此，它们的一个共同劣势是所有用户都参与到每次迭代的过程中，即每次迭代过程中参数 d_f 都一样大，导致每次迭代的复杂度都很高。基于此，本文提出基于迭代剔除的多用户检测。

4 基于迭代剔除的多用户检测

受博弈论中迭代剔除劣势理论和串行干扰消除算法的启发，本文所提 RM-MPA 算法把每一轮迭代后译码可靠的用户检测出来并剔除，使其不参与到下一轮的迭代，这样，随着算法迭代次数的增加，参与迭代的用户数就越少，其复杂度就越低。此算法的核心问题有 2 个，一是如何确定本轮迭代中哪些用户的译码可靠性高，可以不再参与多次迭代就能够直接进行正确译码，这样在将其剔除的同时，不会因为差错传播原理造成后译码用户的译码错误；二是采取怎样的剔除策略，才能在很好地降低复杂度的同时，保证译码的性能。下面，将对这些问题的实现过程进行详细说明。

4.1 RM-MPA 译码优势用户分析

本文所提 RM-MPA 译码算法既适合用串行消息传播机制，也能用并行消息传播机制，但采用并行消息传播机制的 RM-MPA 算法要在迭代次数达到一定次数后才能进行用户的译码和剔除操作，而采用串行消息传播机制的 RM-MPA 算法在第一次迭代过后就能进行用户的译码和剔除。因为并行消息传播机制收敛速度较慢，而且每轮迭代所有用户的译码优势相同，不存在译码优势用户问题，所以在迭代次数较低时，用户的译码可靠性不高，不能直接进行译码和剔除。本文通过大量的仿真实验也发现串行消息传播机制更适合 RM-MPA 算法，所以下面只对采用串行消息传播机制的 RM-MPA 算法进行分析。以 $e'_{k,j}(\mathbf{x}_j)$ 表示第 t 次迭代中时频资源 k 上用户 j 进行消息更新时用到本次迭代中产生的外部消息个数， $e'_j(\mathbf{x}_j)$ 定义为

$$e'_{k,j}(\mathbf{x}_j) = \left\{ n = \sum f_{l,i} \mid f_{k,i} = 1 \ \& \ f_{l,i} = 1, i \neq j, l < k \right\} \quad (8)$$

其中， $e'_{k,j}(\mathbf{x}_j)$ 等于满足约束条件的 $f_{l,i}$ 的个数 n ，

那么用户 j 在第 t 次迭代时用到本次迭代中产生的外部消息总数为

$$e'_j(\mathbf{x}_j) = \sum_{k \in \mathcal{C}_j} e'_{k,j}(\mathbf{x}_j) \quad (9)$$

从式(9)中可以看出： $e'_j(\mathbf{x}_j)$ 越大，用户 j 用到的同次迭代中产生的外部消息越多，则本次迭代后用户 j 的译码可靠性就越高，此用户相对于其他用户来说，就存在译码优势。以上是从使用同次迭代中产生的外部消息的量来判断用户译码的可靠性，由式(8)和式(9)可以看出，此方法比较烦琐，为求得一个用户的译码可靠性需要遍历同一时频资源块上其他用户的码字结构信息。下面，提出一种简单直观的方法来比较用户间的译码优势。

按照本文提出的 RM-MPA 算法中时频资源被处理的先后顺序，给每个时频资源分配一个优势等级，等级越高，其译码优势就越大，译码的可靠性也就越高。例如，给时频资源 $k = 1, 2, 3, \dots, K$ 分配相应的优势等级 $l_k = 1, 2, 3, \dots, K$ ，则用户 j 的译码优势等级为

$$a_j = \sum_{k \in \mathcal{C}_j} f_{k,j} l_k \quad (10)$$

如式(10)所示，按此方法求一个用户的译码优势等级只需要知道该用户自身的码字结构即可，比采用外部消息来比较用户间的译码优势更简单。将 RM-MPA 算法中所有用户按译码优势等级进行降序排序，即可得出用户译码可靠性的排序，进而剔除译码可靠用户，再进行下一轮迭代。图 2 是一个 RM-MPA 译码优势用户分析的例子。

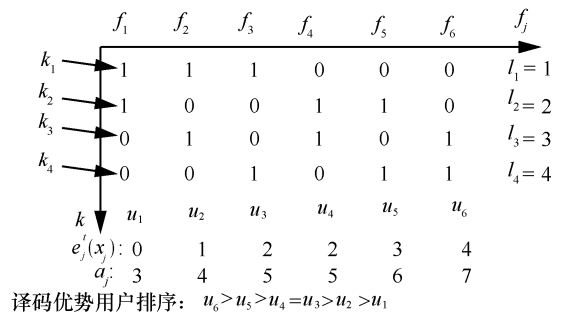


图 2 RM-MPA 译码优势用户分析

图 2 表示的是一个拥有 4 个时频资源块，6 个用户的 SCMA 系统的编码指示矩阵 \mathbf{F} ，其行和列分别表示时频资源块和用户的编码结构。可以看出，通过 $e'_j(\mathbf{x}_j)$ 和 a_j 计算出来的译码优势用户排序是相同的，而且用户的译码优势越大，其译码可靠

性就越高。从图 2 中也可直观地看出, 由于串行消息传播机制本身特有的性质, 使越靠后处理的时频资源块, 其输出的消息越可靠, 所以在同一次迭代中占用的时频资源块越是靠后的用户, 其译码的可靠性也就越高。在此基础上本文提出了 2 种迭代剔除策略。

4.2 迭代剔除策略

4.2.1 译码优势用户排序剔除策略

因为迭代剔除存在差错传播问题, 所以每次迭代过后剔除用户的译码可靠性越高越好, 综上分析, RM-MPA 译码算法中用户的译码优势越大, 其译码可靠性就越高。因此, 可依据译码优势从高到低对用户进行排序, 在每次迭代后对译码优势用户排序中的前 n 个用户直接译码并剔除, $1 \leq n \leq \frac{K}{N}$, 假设 K 能被 N 整除。被剔除的 n 个用户不再参与到后续的迭代过程, 则每次迭代过后用户数都相应地减少 n 个, 若在最大迭代次数 t_{\max} 到来之前, 所有的用户数已被译码并剔除, 表明算法不需要那么多次迭代运算, 而在达到最大迭代次数 t_{\max} 后, 对剩余的所有未被译码的用户统一进行译码。可以预见的是, 每次迭代过后剔除的用户数越多, 译码算法整体的复杂度越低, 但为了保证 RM-MPA 算法的译码性能, 并考虑差错传播的影响, 此剔除策略并不是最优的。因此, 在此基础上提出了正交用户分组剔除策略。基于译码优势用户排序剔除的 RM-MPA 算法的具体步骤如下所示。

1) 初始化

$$I_{u_j \rightarrow r_k}^0(\mathbf{x}_j) = \frac{1}{M} (k \in \zeta_j, j = 1, 2, \dots, J)$$

$$Q(\mathbf{x}_j) = \frac{1}{M} (j = 1, 2, \dots, J)$$

2) 译码优势用户排序

$$a_j = \sum_{k \in \zeta_j} f_{k,j} l_k (j = 1, 2, \dots, J)$$

$$[j, u] = \text{sort}(a_j) (j = 1, 2, \dots, J)$$

3) 信息迭代更新

while $t < t_{\max}$ do

for $k = 1, 2, \dots, K$

for $j \in \zeta_k$

$$I_{r_k \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j)$$

$$I_{u_j \rightarrow r_k}^t(\mathbf{x}_j)$$

end for

end for

4) 用户剔除

$$\zeta_k = \zeta_k - u_j$$

5) 剔除用户译码

$$I_{u_j \rightarrow r_k}^t(\mathbf{x}_j) = 1$$

$$Q(\mathbf{x}_j) = 1$$

$$t = t + 1$$

end while

6) 剩余用户译码

for $i \in \zeta_k$

$$Q(\mathbf{x}_i) = \prod_{k \in \zeta_i} I_{r_k \rightarrow u_i}^{t_{\max}}(\mathbf{x}_i)$$

end for

4.2.2 正交用户分组剔除策略

在一个 SCMA 系统中, 若每个用户占用一个数据流层, 则最多能容纳的用户数为 C_K^N 个, 相应地, \mathbf{F} 矩阵中用户指示向量 \mathbf{f}_j 的个数最多也只有 C_K^N 个, 若按向量间的正交性进行分组, 这些用户指示向量一共可以分成 $\frac{NC_K^N}{K} = C_{K-1}^{N-1}$ 个向量组^[19], 每组含有 $\frac{K}{N}$ 个向量, 而且同组内的各个用户指示向量 \mathbf{f}_j 是相互正交的。每个用户指示向量对应一个用户, 则同一组内的用户都占用不同的正交时频资源块, 即同一组内的用户相互之间无干扰, 所以把这种分组方式称为正交用户分组。若每组内的用户个数相同, 且组内所有用户一起占用了所有的时频资源块, 则称为正交完全用户分组, 否则称为正交非完全用户分组。如图 2 所示的 $K = 4, N = 2, J = 6$ 的指示矩阵 \mathbf{F} 中, 用户指示向量 \mathbf{f}_j 的个数最多为 $C_4^2 = 6$, \mathbf{f}_1 与 \mathbf{f}_6 、 \mathbf{f}_2 与 \mathbf{f}_5 、 \mathbf{f}_3 与 \mathbf{f}_4 都是两两相互正交的列向量, 则它们可以两两进行分组, 一共可以分成 $C_3^1 = 3$ 组, 与它们相对应的用户也可两两进行分组, 即 u_1 与 u_6 为一组, u_2 与 u_5 为一组, u_3 与 u_4 为一组, 一共分为 3 个用户组, 组内的用户相互正交。

在正交用户分组的基础上, 正交用户分组剔除策略的过程如下。在每次迭代过后随机的选择

一个正交用户组，对组内所有用户直接译码并剔除。若是正交完全用户分组，通过式(9)或式(10)可知，经过正交用户分组后，每个正交用户组内所有用户的译码优势之和是一样的，即正交用户组之间并没有译码优势问题，所以可以随机检测并剔除任意一个正交用户组。基于正交用户分组剔除的 RM-MPA 算法的具体步骤和基于译码优势用户排序剔除的 RM-MPA 算法的具体步骤相似，不同于译码优势用户排序剔除的是，正交用户分组剔除不用执行算法的第 2)步，而且第 4)步中也不是剔除前 n 个译码优势用户，而是随机的剔除任一个正交用户组里所有的用户。图 3 是一个基于正交用户分组剔除的 RM-MPA 算法每次迭代的因子。

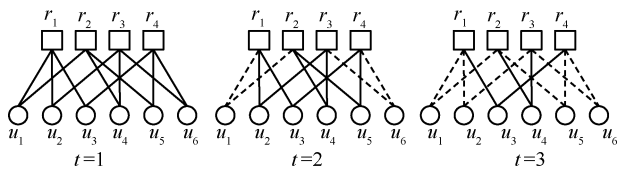


图 3 基于正交用户分组剔除的 RM-MPA 算法因子

图 3 是一个拥有 4 个功能节点，6 个变量节点的 RM-MPA 算法因子。RM-MPA 译码算法的消息传递是沿着功能节点与变量节点间的实线传递的，实线越多要传递的消息越多，计算量也就越大。从图 3 中可看出，执行用户剔除操作之后，随着迭代次数 t 的增加，因子图中功能节点与变量节点之间的实线也相应的减少，所以随着迭代次数的增加，基于正交用户分组剔除的 RM-MPA 译码算法每次迭代的复杂度依次降低。

4.3 复杂度分析

从 PMPA 与 SMPA 的译码过程中可知，这 2 种算法的复杂度主要来自功能节点的更新，变量节点与后验概率的更新占整个算法复杂度的比重很小，所以本文主要从功能节点更新的复杂度上进行分析。在每次迭代中 PMPA 与 SMPA 在复杂度上唯一不同的是：SMPA 的用户码字后验概率的更新是 PMPA 中的 d_f 倍，而后验概率的更新只需要少数几个加法运算。表 1 是几种算法每一次迭代中功能节点更新的复杂度比较。

如表 1 所示，RM-MPA-URS 与 RM-MPA-OUGR 分别表示基于译码优势用户排序剔除的 RM-MPA 算法与基于正交用户分组剔除的 RM-MPA 算法， n 表示每次剔除的用户数。RM-MPA-OUGR 每次迭代

的复杂度随着迭代次数的每次增加都相应减少一个数量级，而 RM-MPA-URS 的复杂度与多个参数有关，即 $O^t = f(t, d_f, K, N, M, J)$ 。式(11)和式(12)分别表示进行 t_{\max} 次迭代后，SMPA 算法与 RM-MPA-OUGR 的复杂度。

表 1 复杂度比较

迭代次数	PMPA & SMPA	RM-MPA-URS ($1 \leq n \leq \frac{K}{N}$)	RM-MPA-OUGR ($n = \frac{K}{N}$)
第 1 次迭代	KM^{d_f}	$O^1 = KM^{d_f}$	KM^{d_f}
第 2 次迭代	KM^{d_f}	$KM^{d_f-1} < O^2 < KM^{d_f}$	KM^{d_f-1}
第 3 次迭代	KM^{d_f}	$KM^{d_f-2} < O^3 < O^2$	KM^{d_f-2}
第 t 次迭代	KM^{d_f}	$KM^{d_f-(t-1)} < O^t < O^{t-1}$	$KM^{d_f-(t-1)}$

$$C_{\text{SMPA}} \approx t_{\max} KM^{d_f} \quad (11)$$

$$C_{\text{RM-MPA-OUGR}} \approx K \left(M^{d_f} + M^{d_f-1} + \dots + M^{d_f-(t_{\max}-1)} \right) \quad (12)$$

从式(11)与式(12)的比较中可以发现， t_{\max} 、 M 与 d_f 越大，RM-MPA-OUGR 复杂度增加得越少，而 RM-MPA-URS 的复杂度则介于这两者中间，可权衡复杂度与译码性能，选择适当的剔除策略配合 RM-MPA 译码算法。

5 仿真与分析

因为译码算法的收敛速率对迭代剔除机制的影响很大，特别是第一次迭代后用户译码的可靠性越高越好。所以本文先比较了 PMPA、SMPA 与 RM-MPA 算法的收敛性能，并对它们的译码性能进行比较分析。最后给出不同剔除策略下的 RM-MPA 算法的性能比较，同时也对基于正交用户组剔除策略下串行消息传播机制的 RM-MPA 和并行消息传播机制的 RM-PMPA 的性能进行比较，仿真的参数及其取值如表 2 所示。

表 2 仿真参数及其取值

参数	值
用户数 J	6
时频资源块数 K	4
码本长度 M	4
每个用户占用时频资源块数 N, d_c	2
每个时频资源块上叠加的用户数 d_f	3

图 4 是算法在不同信噪比 (SNR, signal to noise ratio) 下收敛速率的比较, 纵轴为误符号率 (SER, symbol error rate), RM-MPA-URS₁ 表示每次剔除前 $n=1$ 个译码优势用户的 RM-MPA 算法。因为仿真的用户数 $J=6$, 在 6 次迭代后, RM-MPA-URS₁ 中所有的用户已被译码, 所以只给出前 6 次迭代的 RM-MPA-URS₁ 算法的收敛曲线。

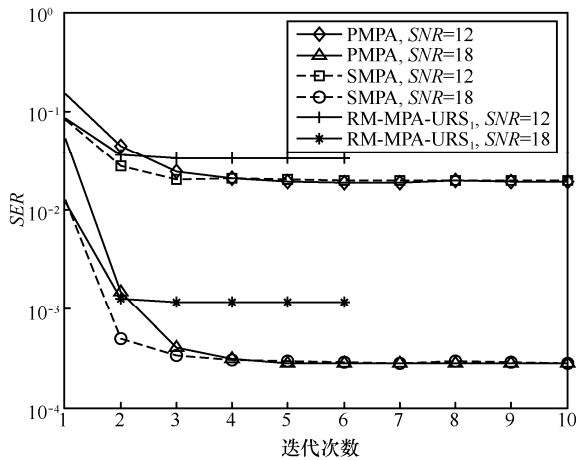


图 4 算法收敛速率比较

从图 4 中可以看出, PMPA 算法要在迭代次数达到 5 次之后 SER 才趋于稳定, 而 SMPA 与 RM-MPA 算法只需要 3 次迭代, 即采用串行消息传播机制的 RM-MPA 算法的收敛速率与 SMPA 算法的收敛速率一样, 而且比 PMPA 算法的收敛速率更快。在迭代次数为 1 时, SMPA 算法与 RM-MPA 算法的 SER 一样且比 PMPA 算法的 SER 低很多, 所以 RM-MPA 算法采用与 SMPA 算法一样的串行消息传播机制效果更佳, 而且采用串行消息传播机制的 RM-MPA 算法中存在译码优势用户, 使每次迭代后 RM-MPA 算法中被剔除用户的译码准确率更高。

图 5 是 PMPA 算法和 SMPA 算法在不同迭代次数下的 SER 性能比较, 在迭代次数一样时, SMPA 算法的 SER 要比 PMPA 算法低, 并且迭代次数为 3 的 SMPA 算法已经很接近迭代次数为 5 的 PMPA 算法。从图 5 也可看出, 迭代次数越低, SMPA 算法的优势就越明显, 特别是一次迭代时 SMPA 的 SER 比 PMPA 的要低很多, 说明了 RM-MPA 算法采用串行消息传播机制更有优势。因为 RM-MPA 算法必须要保证每次迭代后被剔除用户的译码可靠性, 特别是第一次迭代后剔除的用户的译码可靠性直接决定了整个算法的译码性能, 而 PMPA 在第一次

迭代后的译码性能比 SMPA 算法的差很多, 而且并行消息传播机制中所有用户的译码优势是一样的, 不存在译码优势用户。

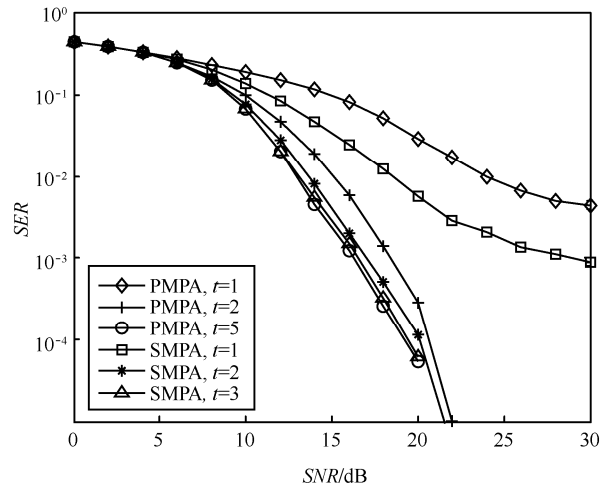


图 5 PMPA 算法与 SMPA 算法译码性能比较

图 6 是不同剔除策略的 RM-MPA 译码算法性能比较, URS₁ (user remove strategy 1)、URS₂ 和 OUGR (orthogonal user group removed) 分别表示用户剔除策略 1、策略 2 和正交用户分组剔除策略。URS₁ 表示每次剔除前一个译码优势用户, 即 $n=1$, URS₂ 表示每次剔除前 $n = \frac{K}{N} = 2$ 个译码优势用户, URS₁ 和 URS₂ 都属于译码优势用户排序剔除策略。OUGR 表示每次剔除一个正交用户组, 这里, 每个正交用户组里有 $n = \frac{K}{N} = 2$ 个用户, 把 URS₂ 每次剔除的用户数设置成与 OUGR 相同, 主要是为了方便与 OUGR 进行对比。将迭代次数都设置为 3 是因为由

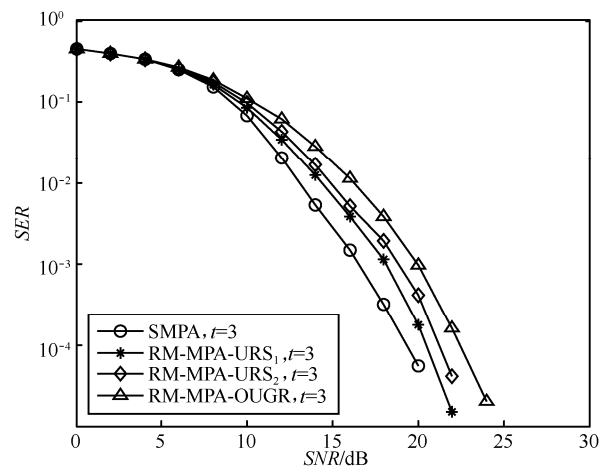


图 6 不同剔除策略的 RM-MPA 译码算法性能比较

图4可知, 迭代次数为3时 RM-MPA 算法已收敛。从图6中可看出: 在译码优势用户排序剔除策略中, 每次剔除的用户数越多, 其 *SER* 就越大, 而且 $n = \frac{K}{N}$ 的译码优势用户排序剔除策略的性能要比正交用户分组剔除策略的性能好, 因为在剔除用户数相同的情况下, 前者剔除用户的总译码可靠性要比后者高, 但后者的复杂度更容易分析且远远低于前者, 这是正交用户分组剔除策略的优势所在。所以可以在这2种剔除策略和参数 n 的取值中进行选择, 来达到复杂度与性能之间的平衡。

图7是在正交用户分组剔除策略下的 RM-MPA 与 RM-PMPA 算法性能比较, RM-PMPA 表示采用并行消息传播机制的 RM-MPA 算法。从图7中可看出, 迭代次数为3时, SMPA 算法的 *SER* 要低于 PMPA 算法, SMPA 算法在收敛速度上有优势。但 SMPA 算法失去了 PMPA 算法能使用多个处理并行处理的优势, 会有一定的译码时延。而在 RM-MPA 译码算法中, 迭代次数每增加一次, 其复杂度便降低一个数量级, 降低了译码时延的同时其译码可靠性也能够得到保证。如图7所示, 在正交用户分组剔除策略下, RM-MPA 算法的译码性能仍能得到保障, 但 RM-PMPA 的译码性能则很差, 验证了 RM-PMPA 算法要在迭代次数达到一定次数后才能进行用户的译码和剔除操作, 也说明 RM-MPA 算法更适于采用串行消息传播机制, 即迭代剔除机制更适于与收敛速度快的译码算法结合, 才能更好地降低复杂度的同时有效保证译码性能。

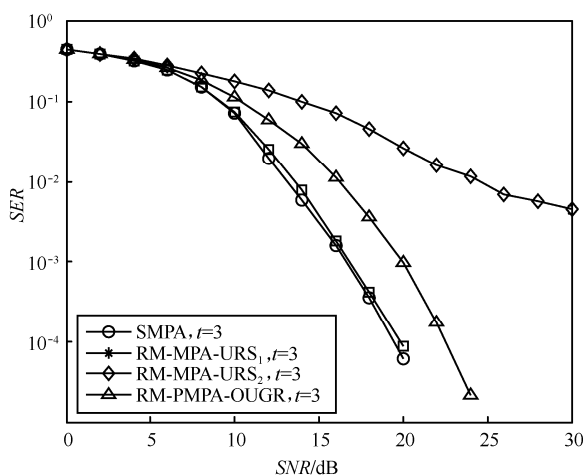


图7 译码性能比较

6 结束语

针对 SCMA 系统中译码算法复杂度过高问题, 本文提出了 RM-MPA 算法, 此算法宜采用串行消息传播机制, 加快其收敛速度, 在此基础上提出了译码优势用户排序剔除和正交用户组剔除2种迭代剔除策略, 前者的译码性能更好, 但其复杂度也比后者高。将 SCMA 技术与大规模 MIMO 相结合, 进一步提高系统的频谱效率, 在此系统下的低复杂度多用户检测是下一步研究的主要内容。

参考文献:

- [1] 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.
ZHANG P, TAO Y Z, ZHANG Z. Survey of several key technologies for 5G[J]. Journal on Communications, 2016, 37(7):15-29.
- [2] DAI L, WANG B, YUAN Y, et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9):74-81.
- [3] 张长青. 面向 5G 的非正交多址接入技术的比较[J]. 电信网技术, 2015(11):42-49.
ZHANG Z Q. Comparison of the non-orthogonal multiple access technologies for 5G[J]. Journal of Telecommunications Network Technology, 2015(11):42-49.
- [4] 刘德良, 黄强, 徐大专. 基于迭代分组均衡的 SC-FDMA-IDMA 非正交多址接入系统[J]. 通信学报, 2014, 35(8):48-55.
LIU D L, HUANG Q, XU D Z. Non-orthogonal multiple-access system SC-FDMA-IDMA with iterative block equalization[J]. Journal on Communications, 2014, 35(8):48-55.
- [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] TONG W, MA J, HUAWEI P Z. Enabling technologies for 5G air-interface with emphasis on spectral efficiency in the presence of very large number of links[C]//Communications. 2016:184-187.
- [7] WANG B, WANG K, LU Z, et al. Comparison study of non-orthogonal multiple access schemes for 5G[C]//International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. 2015: 1-5.
- [8] LEI L U, CHEN Y, GUO W, et al. Prototype for 5G new air interface technology SCMA and performance evaluation[J]. China Communications, 2016, 12(Supplement):38-48.
- [9] 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, 2017, 4(6):585-588.
- [10] ZOU J, ZHAO H, ZHAO W. Low-complexity interference cancellation receiver for sparse code multiple access[C]//International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies. 2016:277-282.

- [11] BAYESTEH A, NIKOPOUR H, TAHERZADEH M, et al. Low complexity techniques for SCMA detection[C]//GLOBECOM Workshops. 2016:1-6.
- [12] WEI D, HAN Y, ZHANG S, et al. Weighted message passing algorithm for SCMA[C]// International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. 2015:1-5.
- [13] 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.
DU Y, DONG B H, WANG X J, et al. Multiuser detection scheme for SCMA systems based on serial strategy[J]. Journal of Electronics and Information, 2016, 38(8):1888-1893.
- [14] YANG L, LIU Y, SIU Y. Low complexity message passing algorithm for SCMA system[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(12): 2466-2469.
- [15] WANG Y, LI C, HUANG Y, et al. Energy-efficient optimization for downlink massive MIMO FDD systems with transmit-side channel correlation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(9):7228-7243.
- [16] LIN Y, WANG Y, LI C, et al. Joint design of user association and power allocation with proportional fairness in massive MIMO HetNets[J]. IEEE Access, 2017, 5(99):6560-6569.
- [17] 刘亚辉. 稀疏码多址接入技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
LIU Y H. Sparse code multiple access technology research[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [18] 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.
- [19] WANG J, ZHAO H, PENG Y, et al. A novel codeword grouped SCMA[C]//International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies. 2015:753-758.

[作者简介]



朱翠涛 (1967-), 男, 湖北郧县人, 博士, 中南民族大学教授、研究生导师, 主要研究方向为无线通信、压缩感知、最优化理论等。



韦宁 (1993-), 男, 壮族, 广西百色人, 中南民族大学硕士生, 主要研究方向为非正交多址通信系统。

汪汉新 (1966-), 男, 湖北武汉人, 中南民族大学副教授, 主要研究方向为认知无线网络等。

李中捷 (1974-), 男, 湖北武汉人, 博士, 中南民族大学副教授, 主要研究方向为异构网络干扰模型等。