

基于串行策略的 SCMA 多用户检测算法

杜 洋* 董彬虹 王显俊 党冠斌 高鹏宇
(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 611731)

摘要: 稀疏码多址接入(SCMA)作为一个前景广阔的 5 G 无线空口技术, 能够满足海量连接的需求。针对现有 SCMA 通信系统都是基于并行策略的消息传递算法(MPA)进行多用户检测, 存在信息收敛速度不理想的问题, 该文提出一种串行策略的多用户检测算法。该算法以资源节点为序, 按串行方式依次进行消息更新与传递, 保证更新的消息能够立即进入当前迭代过程, 改善了消息传递的收敛速度, 相比并行策略的多用户检测算法, 降低了算法复杂度; 同时, 充分利用消息间相互关联的特点, 融合消息传递步骤, 降低了存储器的要求。理论与仿真结果表明, 该算法在误比特率(BER)性能与算法复杂度之间可以达到较理想的平衡。

关键词: 稀疏码多址接入; 多用户检测; 消息传递算法; 串行策略

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)08-1888-06

DOI: 10.11999/JEIT151259

Multiuser Detection Scheme for SCMA Systems Based on Serial Strategy

DU Yang DONG Binhong WANG Xianjun DANG Guanbin GAO Pengyu
(National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic
Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Sparse Code Multiple Access (SCMA) is a promising air-interface technology for 5 G wireless communication networks, which can enable massive connectivity. The existing multiuser detection schemes are based on a parallel message updating for Message Passing Algorithm (MPA), thus it is not efficient in terms of convergence. In this paper, an efficient multiuser detection scheme for uplink SCMA is proposed based on serial updating of function nodes' messages. Compared to the existing detection schemes, the proposed scheme accelerates the convergence due to that the updated messages can join the belief propagation immediately in current iteration, which avoids being used in the next iteration. Furthermore, the proposed scheme can reduce the storage burden, which fuses message passing process on the basis of the relationship between messages. Numerical results show that the proposed scheme can offer a good trade-off between complexity and Bit Error Rate (BER) performance.

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

1 引言

目前, 全球第 4 代(4 G)移动通信网络建设方兴未艾, 面向 2020 年及未来的第 5 代(5 G)移动通信的研究已在全世界范围内开启^[1]。与 4 G 相比, 5 G 需

提供更高的频谱效率以及更多的用户连接数。为解决这些需求, 5 G 就需要高效的多址接入技术, 而这些多址接入技术正经历着从正交多址到非正交多址技术的演变^[2,3]。

码分多址接入(Code Division Multiple Access, CDMA)^[4,5]是当前以及未来物理层中一类极具潜力的空口技术。作为一种特殊的 CDMA, 低密度信号(Low Density Signature, LDS)的 CDMA 技术已经被提出来, 用以解决海量连接的系统过载情况^[6-8]。最近几年, LDS-CDMA 技术进一步发展, 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, 演进为性能更好的稀疏码多址接入(Sparse Code Multiple

收稿日期: 2015-11-09; 改回日期: 2016-03-28; 网络出版: 2016-05-09

*通信作者: 杜洋 yangdu1988@gmail.com

基金项目: 华为创新研究计划(YB2015040056), 国家自然科学基金(61201126), 新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0058), 四川省青年科技基金(2012JQ0020), 国家级重点实验室基金(150C02006)

Foundation Items: Huawei HIRP Project (YB2015040056), The National Natural Science Foundation of China (61201126), New Century Excellent Talents in University (NCET-11-0058), Sichuan Youth Science and Technology Fund (2012JQ0020), Open Research Fund of the National Laboratory (150C02006)

Access, SCMA) 技术^[9-11]。然而, SCMA 要正式成为 5 G 选用的空口技术, 有两个关键技术亟需解决, 即性能优异的稀疏码本设计与高效的多用户检测。前者已经作为一个优化问题在文献[12]中进行了次优多阶段设计。因此, 本文研究重点是高效的多用户检测技术。

文献[13,14]基于 SCMA 码本的稀疏性, 提出了一种基于消息传递算法(Message Passing Algorithm, MPA)^[6,15]的次优多用户检测算法, 用以有效地接近联合最优的最大后验概率算法的性能。文献[16]基于部分边缘化的方法, 提出了一种改进的 MPA 多用户检测算法, 在牺牲一定误比特率(Bit Error Rate, BER)性能的条件下, 算法复杂度得到降低。综上所述, 现有 SCMA 多用户检测算法的研究都是基于并行策略, 即每轮迭代过程中, 所有资源节点先同时进行消息更新, 然后所有用户节点同时进行消息更新。这种策略的多用户检测算法, 更新的消息只能等到下轮迭代过程才能传递出去, 消息传递的收敛性并非最佳, 因此, 并不一定是最优算法。

针对上述问题, 本文基于 SCMA 因子图中资源节点消息的串行更新, 提出了一种高效的多用户检测算法。具体说, 本文算法不同于现有算法, 每轮迭代过程中已更新的消息可以马上得到传递, 从而改进了消息的收敛速度, 提高了 BER 性能, 降低了算法复杂度。除此之外, 本文算法在迭代过程中把中间变量直接融入资源节点消息更新过程中, 节省了部分存储空间。理论分析与仿真结果表明, 本文算法在 BER 性能与复杂度上提供一个较好的平衡。

本文内容安排如下: 第 2 节给出了 SCMA 系统

模型; 第 3 节详细阐述了新提出的基于串行策略的多用户检测算法; 第 4 节给出仿真验证结果; 最后总结全文。

2 系统模型

2.1 上行 SCMA 系统概述

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, 其过载因子定义为 $\lambda = J/K$ 。6 个用户共享 4 个正交时频资源的上行 SCMA 模型如图 1 所示。SCMA 编码器定义为 $f: \mathbb{B}^{\log_2 M} \rightarrow \mathcal{X}$, $\mathbf{x} = f(\mathbf{b})$, 其中 $\mathcal{X} \subset \mathbb{C}^K$, 基数 $|\mathcal{X}| = M$ 。 K 维复数码字 \mathbf{x} 是具有 $N < K$ 个非零元的稀疏向量。

假设 \mathbf{c} 表示在星座集 $\mathbf{c} \subset \mathbb{C}$ 内定义的 N 维星座点, 使得 $\mathbb{B}^{\log_2 M} \rightarrow \mathbf{c}$, $\mathbf{c} = g(\mathbf{b})$ 。因此, SCMA 的编码器可以定义为 $f = \mathbf{V}g$, 其中二进制映射矩阵 $\mathbf{V} \in \mathbb{B}^{K \times N}$ 简单地将星座点的 N 维映射到 K 维 SCMA 码字。第 j 个用户占据的资源集取决于映射矩阵 \mathbf{V}_j , 并且该集由二进制指示符向量 $\mathbf{f}_j = \text{diag}(\mathbf{V}_j \mathbf{V}_j^T)$ 的非零元素的索引确定。SCMA 码的总结构可以定义为 $\mathbf{F} = (\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_J)$ 的因子图矩阵来表示。当且仅当 $\mathbf{F}_{k,j} = 1$ 时, 用户节点 u_j 到资源节点 c_k 连接。一个 SCMA 因子图及其矩阵对应关系的例子如图 2 所示。

假定全部用户时间同步, 基站接收到的信号为全部用户信号叠加, 可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \sum_{j=1}^J \text{diag}(\mathbf{h}_j) \mathbf{x}_j + \mathbf{n} \\ &= \sum_{j=1}^J \text{diag}(\mathbf{h}_j) \mathbf{V}_j g_j(\mathbf{b}_j) + \mathbf{n} \end{aligned} \quad (1)$$

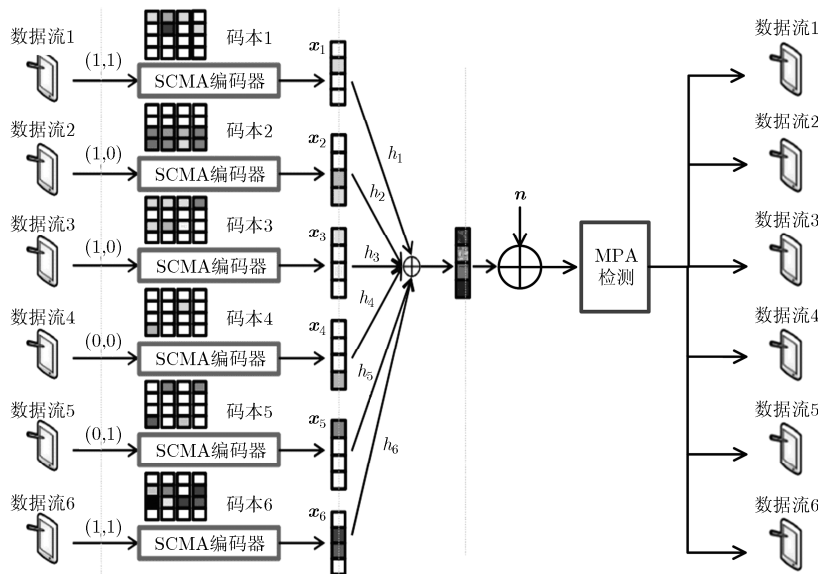


图 1 上行 SCMA 通信系统模型($J=6, K=4, \lambda = 150\%$)

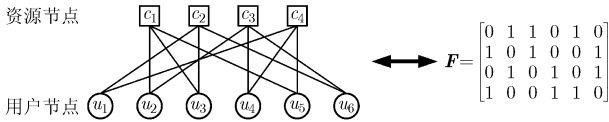


图 2 SCMA 码的因子图及其矩阵

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} 为高斯白噪声且 $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I})$ 。

时频资源 k 处接收到的信号为

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

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。

给定 \mathbf{y} 为接收信号, 并假定基站已经获取了信道矩阵 $\mathbf{H} = (\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_J)$, 则针对于 $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_j)$ 的联合最优最大后验概率检测可以表示为

$$\hat{\mathbf{X}} = \arg \max_{\mathbf{X} \in (\mathcal{X}_{j=1}^J) \mathcal{X}_j} p(\mathbf{X} | \mathbf{y}) \quad (3)$$

式中, $(\times_{j=1}^J) \mathcal{X}_j = \mathcal{X}_1 \times \dots \times \mathcal{X}_j$ 。

MAP 算法需要穷尽搜索所有的用户以及各自码本的可能组合, 因此复杂度极高, 且随着用户数 J 的增加而呈指数级增长, 这就限制了其在实际通信系统中的运用。

2.2 原始消息传递算法

置信度传播算法是一种利用因子图模型来求解概率推理问题的有效技术, 并且它非常适合于低密度的因子图中进行迭代运算。因此, 根据 SCMA 通信系统码字的稀疏特性, 基于置信度传播算法的原则, 提出一种次优的基于码字 MPA 多用户检测算法, 即原始 MPA 算法。

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, 每一次迭代过程包括两个步骤(如图 3), 即步骤 1, 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 $M_{c_k \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j)$; 步骤 2, 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 $M_{u_j \rightarrow c_k}^t(\mathbf{x}_j)$ 。

原始 MPA 一次迭代过程中的两个步骤可以分别用数学公式表示为

$$M_{c_k \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j) = \sum_{-\mathbf{x}_j} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left(-\frac{1}{2\sigma^2} \left\| y_k - \sum_{v \in \xi_k} \mathbf{h}_{k,v} \mathbf{x}_{k,v} \right\|^2 \right) \cdot \prod_{l \in \xi_k / \{j\}} M_{u_l \rightarrow c_k}^{t-1}(\mathbf{x}_j) \right\} \quad (4)$$

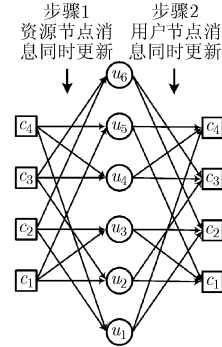


图 3 原始 MPA 算法一次迭代过程示意图

$$M_{u_j \rightarrow c_k}^t(\mathbf{x}_j) = \prod_{m \in \xi_j / \{k\}} M_{c_m \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j) \quad (5)$$

式中, t 为迭代次数, ξ_k 与 ξ_j 分别表示稀疏矩阵 \mathbf{F} 第 k 行的非零位置集与第 j 列的非零位置集。

原始 MPA 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由式(6)估计。

$$Q(\mathbf{x}_j) = \prod_{k \in \xi_j} M_{c_k \rightarrow u_j}^{t_{\max}}(\mathbf{x}_j) \quad (6)$$

3 本文提出的多用户检测算法

原始 MPA 是现阶段 SCMA 通信系统普遍采用多用户检测算法, 虽然它可以有效地接近 MAP 算法的性能, 但不一定是最优的算法。原始 MPA 的消息传输机制是采用并行策略, 在每轮迭代过程中, 所有的资源节点与用户节点都是同时处理与传递消息。这在实际工程应用中, 不仅会占用大量的硬件资源, 而且还需要大容量的存储器保存中间变量。另外, 原始 MPA 的消息传递的收敛性并非最佳, 需要多次迭代才能正确检测, 故它有一定的检测复杂度。

3.1 基于串行策略的多用户检测算法

为了解决上述问题, 本节提出一种基于串行策略的 MPA 多用户检测算法, 它能够在 BER 性能与复杂度之间取得更好的平衡。本文算法对资源节点按照串行的方式进行信息的更新, 其一次迭代过程如图 4 所示。这种处理方法保证了已更新的消息可以及时得到传递, 而不像原始 MPA 那样, 更新的消息只能等到下轮迭代过程才能传递出去, 从而改进了消息的收敛特性。

根据式(5)与式(6), $M_{u_j \rightarrow c_k}^{t-1}(\mathbf{x}_j)$ 可以由 $M_{c_k \rightarrow u_j}^{t-1}(\mathbf{x}_j)$ 与 $Q^{t-1}(\mathbf{x}_j)$ 计算, 即

$$M_{u_j \rightarrow c_k}^{t-1}(\mathbf{x}_j) = \frac{Q^{t-1}(\mathbf{x}_j)}{M_{c_k \rightarrow u_j}^{t-1}(\mathbf{x}_j)} \quad (7)$$

从式(7)可以看出, 迭代过程中, 用户节点 $M_{u_j \rightarrow c_k}^{t-1}(\mathbf{x}_j)$ 的计算可以融入到资源节点消息更新这一步骤中,

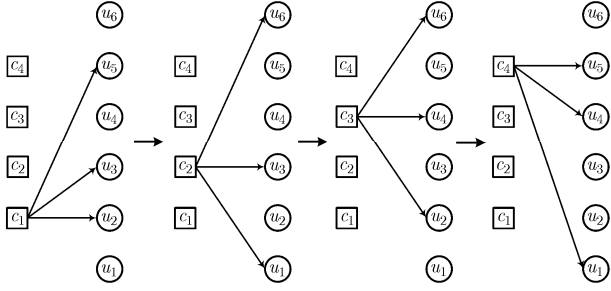


图 4 本文算法一次迭代过程示意图

即资源节点与用户节点的消息更新过程可以合为一体，统一表达。如图 4 所示，本文算法一次迭代过程中不再包含用户节点消息更新这一操作，而只有资源节点消息更新这一操作。这为基于资源节点的串行消息传递奠定了基础，同时，可减少中间变量的存储，从而节省部分存储空间。

本文算法顺序更新资源节点消息过程中，每次资源节点消息 $M_{c_k \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j)$ 的更新，都及时去更新相对应用户的码字消息 $Q^{t-1}(\mathbf{x}_j)$ ，即

$$[Q^{t-1}(\mathbf{x}_j)]^{\text{new}} = \frac{[Q^{t-1}(\mathbf{x}_j)]^{\text{old}} M_{c_k \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j)}{M_{c_k \rightarrow u_j}^{t-1}(\mathbf{x}_j)} \quad (8)$$

式中， $[\cdot]^{\text{old}}$ 与 $[\cdot]^{\text{new}}$ 分别表示更新前后的消息。显然，对于 $Q^{t-1}(\mathbf{x}_j)$ 的置信度， $[Q^{t-1}(\mathbf{x}_j)]^{\text{new}}$ 比 $[Q^{t-1}(\mathbf{x}_j)]^{\text{old}}$ 更准确。

由式(8)得到的 $Q^{t-1}(\mathbf{x}_j)$ 更新后的信息可以用于更新 $M_{u_j \rightarrow c_k}^{t-1}(\mathbf{x}_j)$ ，以便于下一个消息的更新，即

$$M_{u_j \rightarrow c_k}^{t-1}(\mathbf{x}_j) = \frac{[Q^{t-1}(\mathbf{x}_j)]^{\text{new}}}{M_{c_k \rightarrow u_j}^{t-1}(\mathbf{x}_j)} \quad (9)$$

综合式(4)与式(9)，可以得到基于串行策略的 MPA 多用户检测算法的资源节点消息更新公式为

$$M_{c_k \rightarrow u_i}^t(\mathbf{x}_i) = \sum_{-\mathbf{x}_i} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left\| y_k - \sum_{v \in \xi_k} h_{k,v} x_{k,v} \right\|^2 \right] \cdot \frac{[Q^{t-1}(\mathbf{x}_j)]^{\text{new}}}{M_{c_k \rightarrow u_j}^{t-1}(\mathbf{x}_j)} \prod_{l \in \xi_k / \{i,j\}} \frac{[Q^{t-1}(\mathbf{x}_l)]^{\text{old}}}{M_{c_k \rightarrow u_l}^{t-1}(\mathbf{x}_l)} \right\} \quad (10)$$

式中， $i \neq j, i \in \xi_k$ 和 $j \in \xi_k$ 。

基于串行策略的 MPA 多用户检测算法的具体过程如表 1 所示。

基于串行策略的 MPA 多用户检测算法在每轮迭代过程中，更新的消息马上就可以传递给后面的节点，而不必等到下轮迭代过程。显然，这种串行策略对消息的更新是异步的，并且越靠后处理的资源节点消息更新就越可靠。这样平均下来，基于串行策略的 MPA 多用户检测算法进行一次迭代相当

表 1 基于串行策略的 MPA 多用户检测算法

输入: $\mathbf{y}, \mathbf{H}, \sigma^2, t_{\max}$
输出: \mathbf{b}_j
初始化:
(1) for all $k = 1, 2, \dots, K$ and $j = 1, 2, \dots, J$ do
(2) $Q^0(\mathbf{x}_j) = 1/M, M_{c_k \rightarrow u_j}^0(\mathbf{x}_j) = 1/M$
(3) end for
信息迭代更新:
(4) while $t \leq t_{\max}$ do
(5) for all $k = 1, 2, \dots, K$ do
(6) $M_{\text{all}}(\mathbf{x}_j) = \sum_{j \in \xi_k} \frac{Q^{t-1}(\mathbf{x}_j)}{M_{c_k \rightarrow u_j}^{t-1}(\mathbf{x}_j)}$
(7) for all $j \in \xi_k$ do
(8) $M_{\text{temp}}(\mathbf{x}_j) = \frac{Q^{t-1}(\mathbf{x}_j)}{M_{c_k \rightarrow u_j}^{t-1}(\mathbf{x}_j)}$
$M_{c_k \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j) = \sum_{-\mathbf{x}_j} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left\ y_k - \sum_{v \in \xi_k} h_{k,v} x_{k,v} \right\ ^2 \right] \cdot \frac{M_{\text{all}}(\mathbf{x}_j)}{M_{\text{temp}}(\mathbf{x}_j)} \right\}$
$Q^{t-1}(\mathbf{x}_j) = M_{\text{temp}}(\mathbf{x}_j) M_{c_k \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j)$
(9) end for
(10) end for
(11) $t = t + 1$
(12) end while
(13) for all j do
(14) $Q(\mathbf{x}_j) = \prod_{n \in \xi_j} M_{c_n \rightarrow u_j}^{t_{\max}}(\mathbf{x}_j)$
(15) end for

于原始 MPA 多次迭代的效果，改善了消息收敛特性。显然，在较少迭代次数时，本文算法在 BER 性能上的优势更能得到体现。但由于本文算法的消息更新采用串行策略，所需迭代次数减少，每轮迭代所需时间却增长，即会产生一定程度的时延。

3.2 复杂度分析

SCMA 多用户检测算法的复杂度主要体现在迭代过程与迭代次数。本文算法是通过收敛所需迭代次数的减少来降低计算复杂度。

本文复杂度将以算法中所涉及的乘法器数目为标准进行分析，因此本文算法复杂度为

$$C_p = t_{\max} K \left\{ d_f \left[M^{d_f} (d_f + 4) + 2M \right] + d_f \right\} \quad (11)$$

式中， d_f 表示作用于资源节点的用户数。

同理，原始 MPA 与 PM-based MPA 的复杂度分别如式(12)与式(13)计算。

$$C_o = t_{\max} K d_f M^{d_f} (2d_f + 1) + t_{\max} J d_v M (d_v - 2) \quad (12)$$

式中， d_v 表示作用于用户节点的时频资源数。

$$C_{PM} = t_{\max} J d_v M (d_f - 2) + m K d_f M^{d_f} (2d_f + 1) + (t_{\max} - m) R_s d_f M^{d_f - R_s/d_v} (2d_f + 1) + (t_{\max} - m) (K - R_s) d_f M^{d_f} (2d_f + 1) \quad (13)$$

式中， m 与 R_s 表示 PM-based MPA 的指定参数。

4 仿真结果

为了验证本文所提基于串行策略的 MPA 多用户检测算法在上行 SCMA 通信系统的性能，分别将其与原始 MPA 以及 PM-based MPA 进行了比较仿真实验。在仿真中，各参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真参数

参数	取值
码本大小 M	4
用户数 J	6
扩频因子 K	4
过载因子 λ	150%
信道模型	AWGN

4.1 收敛速度

图5为显示了本文算法、原始MPA与PM-based MPA的收敛情况。由图5可知，PM-based MPA的BER性能在相同迭代次数下，都远差于本文算法。同时，从图5可以看出，本文算法在较小迭代次数(即1, 2与3次)情况下，本文算法的BER性能明显优于原始MPA。这是因为本文算法可以立即把已更新的消息传递给后面的节点，而不像原始MPA那样必须等到下一轮迭代，这就使得本文算法可以更加充分地利用新鲜信息，从而收敛速度加快。从图5也可以看出，随着迭代次数的增加，本文算法与原始MPA在BER性能上的差距越来越小，并且最终达到稳定，趋于相同值。这是因为两种算法最终都能充分利用

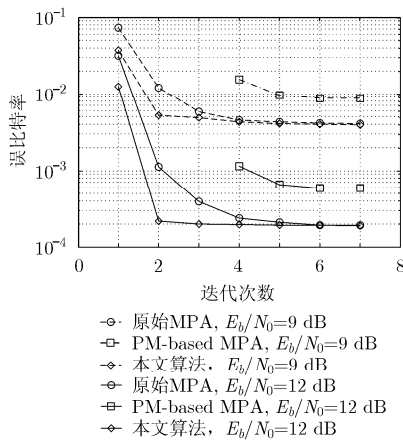


图 5 各种算法的收敛速度

了已更新的消息。值得注意的是，本文算法2次迭代的BER性能几乎可以无差别地达到其最佳性能，这说明了本文算法的收敛性很快。

4.2 BER 性能

图 6 为显示了本文算法、原始 MPA 与 PM-based MPA 的 BER 性能对比情况。从图 6 可以看出，在相同迭代次数下，本文算法的 BER 性能都优于原始 MPA。在 $E_b/N_0 = 12$ dB 时，2 次迭代原始 MPA 的 BER 值为 1.2×10^{-3} ，而本文算法 2 次迭代的 BER 值为 3.5×10^{-4} ，性能好了一个数量级。从图 6 也可以看出，在 $BER = 1.0 \times 10^{-3}$ 时，相对于 6 次迭代的 PM-based MPA，本文算法 2 次迭代就有 0.7 dB 增益。同时，我们可以由图 6 得到，本文算法 2 次迭代的 BER 性能就优于 6 次迭代的 PM-based MPA，并且几乎无差别地达到原始 MPA 的 6 次迭代的性能。

4.3 复杂度对比

结合3.2节的复杂度分析，可以得出4.2节中提及的2次迭代本文算法、6次迭代原始MPA以及6次迭代PM-based MPA的乘法器数目分别为10968, 32256, 26208。相对于原始MPA，本文算法在可忽略BER性能损失下，节约了66.0%的乘法器。同时，与PM-based MPA对比，本文算法不仅BER性能有较大增益，并且节约了58.2%的乘法器。因此，本文算法在BER性能与复杂度上提供了很好的平衡。

5 结束语

本文针对上行 SCMA 通信系统，以因子图中的资源节点消息串行更新为基础，提出了一种信息收敛速度快的多用户检测算法。相对于原始 MPA 与 PM-based MPA，本文算法在算法复杂度明显降低情况下，还能取得较理想的 BER 性能，并且节省了部分存储空间。因此，本文算法是一种实用价值较高的上行 SCMA 多用户检测算法。

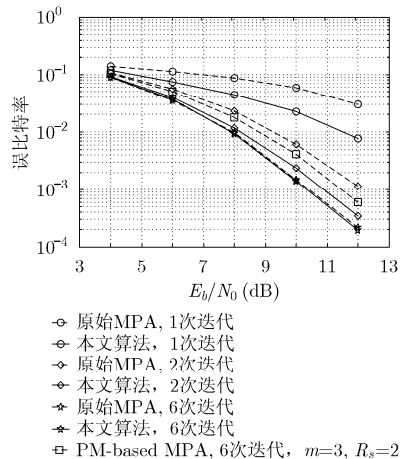


图 6 各种算法的BER性能对比

参 考 文 献

- [1] THOMPSON J, GE X, WU H C, *et al.* 5 G wireless communication systems: prospects and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(2): 62–64. doi: 10.1109/MCOM.2014.6815889.
- [2] WANG P, XIAO J, and LI P. Comparison of orthogonal and nonorthogonal approaches to future wireless cellular systems [J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2006, 52(3): 4–11. doi: 10.1109/MVT.2006.307294.
- [3] DAI L L, WANG B C, YUAN Y F, *et al.* Non-orthogonal multiple access for 5 G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(9): 74–81. doi: 10.1109/MCOM.2015.7263349.
- [4] 许耀华, 胡艳军. 基于拟生态优化算法的 CDMA 多用户检测方法[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(11): 2111–2115.
XU Y H and HU Y J. Research of ecologic system optimization algorithms for multi-user detection in CDMA communication systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(11): 2111–2115.
- [5] 王宇, 李少谦, 李乐民. 多业务蜂窝 CDMA 系统的干扰与容量分析[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(12): 1785–1792.
WANG Y, LI S Q, and LI L M. Interference and capacity analysis for multi-service cellular CDMA systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2002, 24(12): 1785–1792.
- [6] 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.
- [7] BEEK J V D and BALIGH B M. Multiple access with low-density signatures[C]. IEEE Global Telecommunications Conference, Honolulu, USA, 2009: 1–6. doi: 10.1109/GLOCOM.2009.5425243.
- [8] 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.
- [9] NIKOPOUR H and BALIGH H. Sparse code multiple access [C]. IEEE Personal Indoor and Mobile Radio Communications, London, UK, 2013: 332–336. doi: 10.1109/PIMRC.2013.6666156.
- [10] 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.
- [11] AU K, ZHANG L Q, NIKOPOUR H, *et al.* Uplink contention based SCMA for 5 G radio systems[C]. IEEE Global Telecommunications Conference Workshops, Austin, USA, 2014: 900–905. doi: 10.1109/GLOCOMW.2014.7063547.
- [12] 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.
- [13] WANG B, WANG K, LU Z, *et al.* Comparison study of non-orthogonal multiple access schemes for 5 G[C]. IEEE Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, Ghent, BEL, 2015: 1–5. doi: 10.1109/BMSB.2015.7177186.
- [14] WU Y, ZHANG S, and CHEN Y. Iterative multiuser receiver in sparse code multiple access[C]. IEEE International Conference on Communications, London, UK, 2015: 2918–2923. doi: 10.1109/ICC.2015.7248770.
- [15] KSCHISCHANG F, FREY B, 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.
- [16] MU H, MA Z, ALHAJI M, *et al.* A fixed low complexity message pass detector for up-link SCMA system[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2015, 4(6): 585–588. doi: 10.1109/LWC.2015.2469668.
- 杜 洋: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为面向第 5 代移动通信的新型多址技术及无线通信抗干扰技术。
- 董彬虹: 女, 1972 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为无线通信关键技术研究。
- 王显俊: 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。