

基于 SCMA 系统的多用户检测消息传递算法

张雪婉, 葛文萍, 吴 雄

(新疆大学 信息科学与工程学院, 乌鲁木齐 830046)

摘 要: 针对现有的基于并行策略和串行策略的消息传递算法, 以及基于对数域的并行 MAX-Log 消息传递算法, 存在算法复杂度和检测性能缺乏对比分析的问题, 对以上 3 种算法的实现原理进行阐述, 结合串行 MPA 算法和并行 MAX-Log MPA 算法的优点, 提出一种基于对数域的串行 MAX-Log MPA 算法。把已更新的消息传递给后面的节点, 从而更加充分地利用新信息, 加快算法的收敛速度, 并且通过收敛所需要迭代次数的减少来进一步降低计算复杂度。仿真结果表明, 与基于并行策略的 MPA 算法相比, 该算法收敛速度快, 算法复杂度低。

关键词: 非正交多址接入; 稀疏码多址接入; 多用户检测; 消息传递算法; 并行策略; 串行策略; 最大似然算法

中文引用格式: 张雪婉, 葛文萍, 吴 雄. 基于 SCMA 系统的多用户检测消息传递算法[J]. 计算机工程, 2018, 44(5): 88-93.

英文引用格式: ZHANG Xuewan, GE Wenping, WU Xiong. Message Passing Algorithm for Multiuser Detection Based on SCMA System[J]. Computer Engineering, 2018, 44(5): 88-93.

Message Passing Algorithm for Multiuser Detection Based on SCMA System

ZHANG Xuewan, GE Wenping, WU Xiong

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

[Abstract] Aiming at the existing Message Passing Algorithm (MPA) based on parallel strategy and serial strategy, and the parallel MAX-Log MPA based on log domain, there is a lack of comparative analysis of algorithm complexity and detection performance, the implementation principle of the above 3 algorithms is expounded. Combined with the advantages of serial MPA algorithm and parallel MAX-Log MPA algorithm, a serial MAX-Log MPA algorithm based on logarithmic domain is proposed. The updated messages are passed to the later nodes to make full use of the new information and speed up the convergence of the algorithm. And the computational complexity is further reduced by the reduction of the number of iterations required for convergence. Simulation results show that, compared with the MPA algorithm based on parallel strategy, the proposed algorithm has fast convergence speed and low algorithm complexity.

[Key words] non-orthogonal multiple access; Sparse Code Multiple Access (SCMA); multiuser detection; Message Passing Algorithm (MPA); parallel strategy; serial strategy; Maximum Likelihood (ML) algorithm

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0046425

0 概述

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^[1]。在众多非正交多址技术中^[2], 稀疏码多址接入 (Sparse Code Multiple Access, SCMA)^[3] 作为第五代 (5G) 移动通信系统的候选技术之一, 引起了众多研究者的注意。由低密度信号 (Low Density Signal, LDS)^[4-6] 演进而来的 SCMA, 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^[7], 用以解决海量连接的系统过载情况^[8-9]。与 OFDMA 相比, SCMA 可以实现 150%、200%, 甚至

更多的设备连接数^[10]。

目前, 如何降低 SCMA 系统解码的复杂度是 SCMA 面临的重要挑战之一^[11]。在文献[7]中基于 SCMA 码本的稀疏性提到并行 MPA 算法。在此基础上, 文献[8]提出一种基于对数域的并行 MAX-LogMPA 算法, 该算法虽然检测性能不如并行 MPA 算法, 但却大大降低了算法的复杂度, 硬件实现更加容易。文献[12]对并行 MPA 算法进行了详细的阐述以及仿真验证, 证明了其是一种低复杂度且性能可以逼近最优检测器的优良算法。另外, 文献[13-14]也提出一种串行的 MPA 算法, 该算法与并行 MPA 算法相比, 加快了检测器的收敛速度, 算法复杂度也有所降低。

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金 (2012211A013); 新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目 (XJGR12017019)。

作者简介: 张雪婉 (1991—), 男, 硕士研究生, 主研方向为无线通信技术; 葛文萍 (通信作者), 教授; 吴 雄, 硕士研究生。

收稿日期: 2017-03-20 **修回日期:** 2017-05-12 **E-mail:** wenpingge@sohu.com

针对以上不同策略的 MPA 多用户检测算法,本文结合串行 MPA 算法收敛速度快和并行 MAX-Log MPA 算法复杂度较低的优点,提出一种基于对数域的串行 MAX-LogMPA 算法。该算法可加快收敛速度,在保证 BER 性能的前提下其算法复杂度达到最低。

另外,考虑到现有研究大都采用基于并行 MPA 算法对 SCMA 系统进行多用户检测,还没有相关工作来对以上不同策略的 MPA 算法进行统一的性能比较和总结,本文对以上不同策略的 MPA 算法进行详细论述,并与最大似然 (Maximum Likelihood, ML) 算法进行性能比较。

1 上行 SCMA 系统模型

假定一个上行多用户 SCMA 通信系统, J 个用户共享 N 个正交时频资源 $K (J > K)$, 并传输数据给同一个基站, 其过载因子定义为 $\lambda = J/K$ 。 $J = 6, K = 4$ 的上行 SCMA 系统模型如图 1 所示。

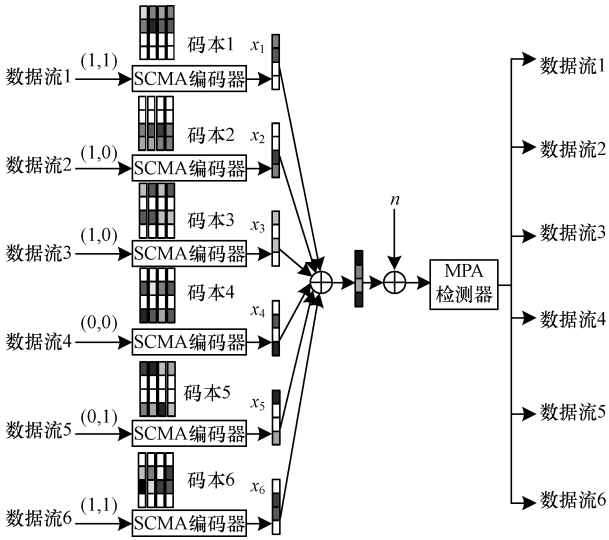


图 1 上行 SCMA 通信系统模型

SCMA 编码器定义为 $f: B^{\text{lbM}} \rightarrow X, x = f(b)$, 其中 $X \in C^k$, 基数 $|X| = M$ 。 K 维复数码字 x 是具有 $N < K$ 个非零元的稀疏向量。假设 c 表示在星座集 $c \subset C$ 内定义的 N 维星座点, 使得 $B^{\text{lbM}} \rightarrow c, c = g(b)$ 。因此, SCMA 的编码器可以定义为 $f = Vg$, 其中二进制映射矩阵 $V \in B^{K \times N}$ 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 V_j , 并且该集由二进制指示符向量 $f_j = \text{diag}(V_j V_j^T)$ 的非零元素的索引确定。SCMA 码可以用因子图矩阵 $F = (f_1, f_2, \dots, f_J)$ 来表示。当且仅当 $F_{kj} = 1$ 时, 用户节点 U_j 到资源节点 C_k 连接。SCMA 因子图及其矩阵 F 之间的对应关系如图 2 所示。

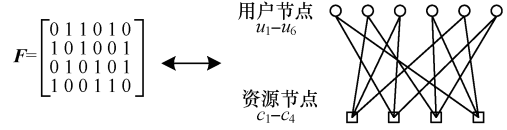


图 2 矩阵 F 及因子图的对应关系

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:

$$y = \sum_{j=1}^J \text{diag}(h_j) x_j + n = \sum_{j=1}^J \text{diag}(h_j) V_j g_j(b_j) + n \quad (1)$$

其中, $x_j = [x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{kj}]^T$ 表示第 j 个用户发送的码字, $h_j = [h_{1j}, h_{2j}, \dots, h_{kj}]^T$ 表示第 j 个用户的信道向量, n 为高斯白噪声且 $n \sim cN(0, \sigma^2 I)$ 。

时频资源 k 处接收到的信号为:

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

由于码字 x_j 是稀疏的, 因此在时频资源 k 处仅有较少的码字冲突。

给定 y 为接收信号, 并假定基站已经获取了信道矩阵 $H = (h_1, h_2, \dots, h_J)$, 则针对于 $X = (x_1, x_2, \dots, x_J)$ 的联合最大后验概率检测可以表示为:

$$\hat{X} = \arg \max_{X \in (\times_{j=1}^J x_j)} p(X|y) \quad (3)$$

其中, $(\times_{j=1}^J) x_j = x_1 \times x_2 \times \dots \times x_J$ 。因为后验概率:

$$p(x|y_j, H_j) = p(x) \cdot \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|y_j - H_j x\|^2\right) \quad (4)$$

如果假设每个码字的发射概率都相等, 那么最大后验概率检测 MAP 就简化成最大释然检测 ML:

$$\hat{X} = \arg \min_{X \in (\times_{j=1}^J x_j)} \|y_j - H_j x\|^2 \quad (5)$$

ML 算法利用穷举法搜索所有用户以及各自码本的可能组合, 所以算法复杂度极高, 这就限制了其在实际通信系统的应用^[14]。

2 消息传递算法

由于 SCMA 通信系统的码字稀疏性特点, 基于和积算法^[15]原理, 次优的基于迭代的低复杂度的 MPA 算法被提出^[7]。作为 SCMA 系统中主流的多用户检测算法, MPA 算法具有无法替代的优势。

2.1 并行 MPA

并行 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 2 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 $P_{C_k \rightarrow U_j}^1(x_j)$ 。在该阶段, 所有资源节点的更新互不影响, 因此可以全并行地进行更新; 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 $P'_{U_j \rightarrow C_k}(x_j)$ 。在该阶段,所有用户节点的更新同样互不影响,也可以全并行地进行更新。 t 表示迭代次数。当 $k=2, j=3$ 时,求解 $P'_{C_2 \rightarrow U_3}(x_j)$ 、 $P'_{U_3 \rightarrow C_2}(x_j)$ 的过程如图 3 所示。

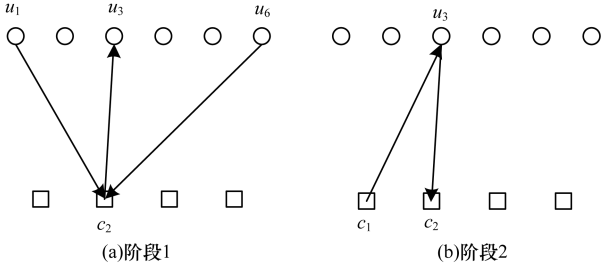


图 3 并行 MPA 算法的消息传递过程

并行 MPA 一次迭代过程中的 2 个阶段可以分别用数学公式表示为：

$$P'_{C_k \rightarrow U_j}(x_j) = \sum_{x_j} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|y_k - \sum_{v \in \varepsilon_k} h_{kv} x_{kv}\|^2\right) \times \prod_{l \in \varepsilon_k' \setminus \{j\}} P'_{U_l \rightarrow C_k}(x_l) \right\} \quad (6)$$

$$P'_{U_j \rightarrow C_k}(x_j) = \prod_{m \in \zeta_j' \setminus \{k\}} P'_{C_m \rightarrow U_j}(x_j) \quad (7)$$

其中, t 为迭代次数, ε_k 与 ζ_j 分别表示稀疏码矩阵 F 第 k 行的非零位置集与第 j 列的非零位置集。

并行 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表示为：

$$P(x_j) = \prod_{k \in \zeta_j} P'_{C_k \rightarrow U_j}(x_j) \quad (8)$$

得到每个用户各自的码字概率以后,接下来就需要算出对数似然比(Log Likelihood Rate, LLR),每一个 bit 的 $LLR(b_{j,m})$ 可表示为：

$$LLR(b_{j,m}) = \log_a \left[\sum_{x_j: b_{j,m}=1} P(x_j) \right] - \log_a \left[\sum_{x_j: b_{j,m}=0} P(x_j) \right] \quad (9)$$

其中, $m=1,2,\dots,\text{lb}^{(Q)}$, Q 为使用的调制进制数。

最后,判决 $LLR(b_{j,m})$ 得到 $b_{j,m}$,判决表达式：

$$b_{j,m} = \begin{cases} 1, & LLR(b_{j,m}) \geq 0 \\ 0, & LLR(b_{j,m}) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

与 ML 算法相比,该算法由于利用了 SCMA 的稀疏性这一特点,节点之间的信息在递送过程时,只考虑与自身相连的节点,因此算法复杂度有所减低,性能接近 ML 算法。但该算法收敛速度较慢。

2.2 串行 MPA

由式(7)和式(8), $P'_{U_j \rightarrow C_k}(x_j)$ 可以由 $P'_{C_k \rightarrow U_j}(x_j)$ 与 $P'^{-1}(x_j)$ 得到,即：

$$\frac{P'^{-1}(x_j)}{P'_{C_k \rightarrow U_j}(x_j)} = \prod_{m \in \zeta_j' \setminus \{k\}} P'_{C_m \rightarrow U_j}(x_j) = P'_{U_j \rightarrow C_k}(x_j) \quad (11)$$

由式(11)可以看出,用户节点的计算可以由资源节点计算得出,即资源节点与用户节点的计算公式可以合二为一。

该算法顺序更新资源节点消息过程中,每次资源节点消息 $P'_{C_k \rightarrow U_j}(x_j)$ 的更新,都及时去更新相对应用户的码字消息 $P'^{-1}(x_j)$,即：

$$[P'^{-1}(x_j)]^{\text{new}} = \frac{[P'^{-1}(x_j)]^{\text{old}}}{P'_{C_k \rightarrow U_j}(x_j)} P'_{C_k \rightarrow U_j}(x_j) \quad (12)$$

其中, $[\cdot]^{\text{old}}$ 与 $[\cdot]^{\text{new}}$ 分别表示更新前后的消息。显然 $P'^{-1}(x_j)$ 的置信度, $[P'^{-1}(x_j)]^{\text{new}}$ 比 $[P'^{-1}(x_j)]^{\text{old}}$ 更准确。例如 $k=1, k=2$ 时,串行 MPA 算法的迭代过程如图 4 所示。因为用户 u_3 对应于 2 个资源节点,在 $k=1$ 计算完以后,由式(12)可知,用户 u_3 的置信度也随之改变,当进行下次计算,即 $k=2$ 时,参与运算的用户 u_3 已经是更新后的新消息。所以该算法在每次计算时同时伴随用户码字消息的更新,为下一步的计算提供了更加可靠的置信度。

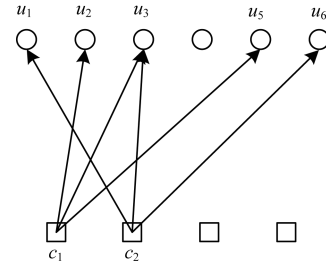


图 4 串行 MPA 算法的信息传递过程

由式(12)得到的 $P'^{-1}(x_j)$ 更新后的信息可以用于更新 $P'_{U_j \rightarrow C_k}(x_j)$,以便于下一次消息的更新,即：

$$P'_{U_j \rightarrow C_k}(x_j) = \frac{[P'^{-1}(x_j)]^{\text{new}}}{P'_{C_k \rightarrow U_j}(x_j)} \quad (13)$$

综合式(6)和式(13),可以得到串行 MPA 多用户检测算法的资源节点消息更新公式为：

$$P'_{C_k \rightarrow U_j}(x_j) = \sum_{x_j} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|y_k - \sum_{v \in \varepsilon_k} h_{kv} x_{kv}\|^2\right) \times \frac{[P'^{-1}(x_i)]^{\text{new}}}{P'_{C_k \rightarrow U_i}(x_j)} \times \prod_{l \in \varepsilon_k' \setminus \{i,j\}} \frac{[P'^{-1}(x_l)]^{\text{old}}}{P'_{C_k \rightarrow U_l}(x_l)} \right\} \quad (14)$$

其中, $i \neq j, i \in \varepsilon_k, j \in \varepsilon_k$ 。

串行 MPA 多用户检测算法在每轮迭代过程中,更新后的消息马上传递给后面的节点,而不必等到下一轮迭代过程。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越可靠。这样一来,串行 MPA 进行一次迭代相当于并行 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,串行 MPA 在误码率性能上的优势更能得到体现。

2.3 并行 MAX-Log MPA

由于 $\exp(\cdot)$ 以及连乘计算的复杂性,通过取对数的运算,并采用 $\max$ 近似计算资源节点的信息更新,可以大幅度地降低计算的复杂度。该算法的计算公式如下:

因为:

$$\log_a \left(\sum_{i=1}^N \exp(f_i) \right) \approx \max_{i=1,2,\dots,N} \{f_1, f_2, \dots, f_N\} \quad (15)$$

所以,式(6)和式(7)可以改写为:

$$P'_{C_k \rightarrow U_j}(x_j) = \max_{x_j} \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \|y_k - \sum_{v \in \mathcal{E}_k} h_{kv} x_{kv}\|^2 + \sum_{l \in \mathcal{E}_k' \setminus \{j\}} P'_{U_l \rightarrow C_k}(x_j) \right\} \quad (16)$$

$$P'_{U_j \rightarrow C_k}(x_j) = \sum_{m \in \mathcal{E}_j' \setminus \{k\}} P'_{C_m \rightarrow U_j}(x_j) \quad (17)$$

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:

$$P(x_j) = \sum_{k \in \mathcal{E}_j} P'_{C_k \rightarrow U_j}(x_j) \quad (18)$$

从式(15)和式(16)可以看出,节点在迭代更新的过程中,由于采用了 $\max$ 的近似计算,必将造成一部分的信息丢失,因此该算法的性能一定不如前2种算法。另外,从式(16)~式(18)可以发现,通过取对数运算,把乘法转化为加法,在实际计算时,乘法器将减少,加法器增加,这样将使算法复杂度降低。所以,该算法是以牺牲检测性能来降低运算复杂度,在误码率可以容忍的情况下,运算复杂度使硬件的实现变得更加容易。

2.4 串行 MAX-Log MPA

由 2.2 节对串行 MPA 的分析和 2.3 节对并行 MAX-Log MPA 的分析可知,串行 MPA 算法具有收敛速度快的优点,MAX-Log 运算可以降低复杂度。为了进一步降低运算复杂度,本文提出一种串行 MAX-Log MPA 算法。

对式(13)和式(14)取 MAX-Log 运算,可以得到串行 MAX-Log MPA 多用户检测算法用户码字和资源节点消息更新公式:

$$P'_{U_j \rightarrow C_k}(x_j) = [P'^{-1}(x_j)]^{\text{new}} - P'^{-1}_{C_k \rightarrow U_j}(x_j) \quad (19)$$

$$P'_{C_k \rightarrow U_j}(x_j) = \max_{x_j} \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \|y_k - \sum_{v \in \mathcal{E}_k} h_{kv} x_{kv}\|^2 + ([P'^{-1}(x_i)]^{\text{new}} - P'^{-1}_{C_k \rightarrow U_i}(x_i)) + \sum_{l \in \mathcal{E}_k' \setminus \{i,j\}} ([P'^{-1}(x_l)]^{\text{old}} - P'^{-1}_{C_k \rightarrow U_l}(x_l)) \right\} \quad (20)$$

该算法由于继承了串行策略在收敛速度方面的优势,在每轮迭代过程中,更新后的消息能立刻传递给后面的节点,用于下一资源节点的消息更新,而不必像并行 MAX-Log MPA 必须等到下一轮迭代过程,并且越靠后计算的资源节点消息更新越可靠。这样平均下来,串行 MAX-Log MPA 进行一次迭代相当于并行 MAX-Log MPA 多次迭代的效果,在迭代次数较少时,串行 MAX-Log MPA 比并行 MAX-Log MPA 在误码率性能上更有优势。

3 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计算过程和迭代次数^[8,13-14]。与并行 MAX-Log MPA 相比,本文算法是通过收敛所需要迭代次数的减少来进一步降低计算复杂度。

以算法达到收敛所涉及的乘法器、加法器、 $\exp$ 运算数目为标准分析复杂度。由理论分析可知,串行 MPA 比并行 MPA 在收敛速度上更有优势,在算法达到收敛,整个多用户检测过程所需的加法器、乘法器会相应减少。同理,算法达到收敛,串行 MAX-Log MPA 比并行 MAX-Log MPA 所需的加法器、乘法器也会减少。另外,由文献[10]可知,并、串 MPA 中的 $\exp(\cdot)$ 运算会增加大量的计算复杂度和消耗不少的存储空间。由此可知,串行 MAX-Log MPA 既加快了收敛速度,又采用 MAX-Log 运算消除了 $\exp(\cdot)$ 运算,其复杂度进一步降低。

另外,为了对以上基于不同策略的 MPA 算法进行复杂度分析,列出 5 种算法的复杂度,如表 1 所示。式中 d_f 表示作用于资源节点的用户数, d_v 表示作用于用户节点的时频资源数。

表 1 不同策略实现的 MPA 算法以及最优 ML 算法运算复杂度

算法	加法器数目	乘法器数目	$\exp$ 运算数目	MAX 运算数目
ML	$KM^J(d_f - 1) + KM^J$	$KM^J d_f$	0	0
并行 MPA	$t_{\max} K d_f (M^{d_f} d_f + 4)$	$t_{\max} K d_f M^{d_f} (2d_f - 1)$	$t_{\max} K d_f M^{d_f}$	0
串行 MPA	$t_{\max} K d_f (M^{d_f} d_f + 4)$	$t_{\max} K \{d_f [M^{d_f} (2d_f - 1) + 2M] + d_f\}$	$t_{\max} K d_f M^{d_f}$	0
并行 MAX-Log MPA	$t_{\max} K d_f M^{d_f} (2d_f - 1)$	$t_{\max} K (d_f)^2 M^{d_f}$	0	$t_{\max} K d_f (2M)$
串行 MAX-Log MPA	$t_{\max} K \{d_f [M^{d_f} (2d_f - 1) + 2M] + d_f\}$	$t_{\max} K [d_f (M^{d_f} d_f)]$	0	$t_{\max} K d_f (2M)$

4 仿真分析

为了验证本文所提算法在上行 SCMA 通信系统的性能和分析基于不同策略实现的 MPA 算法的性

能,将以上算法进行比较仿真实验。仿真参数为用户数 $J=6$ 、扩频因子 $K=4$ 、码本尺寸 $M=4$ 、过载率 $\lambda=150\%$ 、信道类型为加性高斯白噪声 AWGN。

4.1 收敛速度

图 5 是信噪比为 12 dB 时,4 种采用不同策略实现的 MPA 算法的收敛情况。由图 5 可以看出,串行 MPA 和串行 MAX-Log MPA 多用户检测算法(3 次达到收敛),其收敛速度比起并行 MPA 和并行 MAX-Log MPA 多用户检测算法(6 次达到收敛)快上 1 倍。在迭代次数较小(1 次、2 次与 3 次)的情况下,串行 MPA 和串行 MAX-Log MPA 的误码率性能明显优于并行 MPA 和并行 MAX-Log MPA,这是因为串行 MPA 和串行 MAX-Log MPA 可以立即把已更新的消息传递给后面的节点,而不像并行 MPA 和并行 MAX-Log MPA 那样必须等到下一轮的迭代,这就使得采用串行策略的算法可以更加充分地利用新信息,从而加快算法的收敛速度。另外,无论是并行 MPA、串行 MPA,还是并行 MAX-Log MPA、串行 MAX-Log MPA,在算法最终达到收敛后,并、串行 MPA 的最终误码率性能一致,并、串行 MAX-Log MPA 的最终误码率性能一致。这是因为无论哪种策略最终都能充分利用已更新的消息。

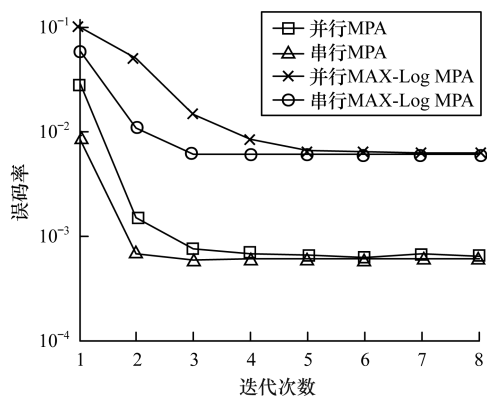


图 5 4 种不同策略的 MPA 算法收敛速度

并、串 MAX-Log MPA 与并、串 MPA 相比,其误码率性能降低了约一个数量级。这是因为并、串 MAX-Log MPA 采用 MAX 近似计算节点之间的消息更新,会造成一部分信息的丢失,置信度降低,所以在最终算法到达收敛后,其误码率性能也会降低。由此可以看出,本文算法误码率性能与并行 MAX-Log MPA 相当,但由于继承了串行策略使其收敛速度加快了近 1 倍。

4.2 误码率性能对比

图 6 为 4 种不同策略的 MPA 算法以及最优 ML 算法误码率性能的比较,图中误码率性能是不同策略的 MPA 算法达到收敛以后的误码率性能。由图 6 可知,并、串行 MAX-Log MPA 两者收敛后的误码率性能一样,且随信噪比的增大,误码率呈线性下降的趋势。并、串 MPA 两者的误码率性能较好,且误码率性能也完全一致,随信噪比的增大,误码率呈指数

下降的趋势。最优 ML 算法的误码率性能,在信噪比小于 2 dB 时还不如并、串 MAX-Log MPA,信噪比小于 4 dB。在信噪比大于 4 dB 时,ML 算法的误码率优势开始显现出来,在所有算法中误码率性能最优。所以说,在环境很差的条件下,ML 算法并不是最优的。另外,并、串行 MPA 算法的误码率性能与最优 ML 算法的误码率性能相近。

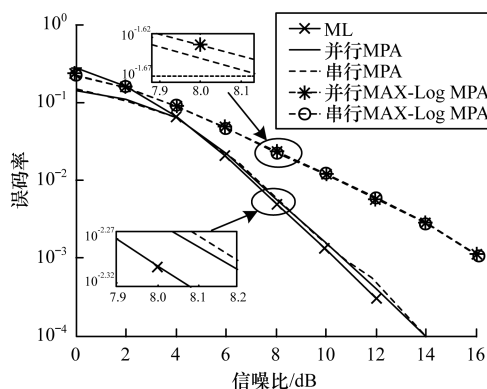


图 6 4 种不同策略的算法误码率性能比较

4.3 算法复杂度对比

结合算法复杂度分析和 3 次迭代串行 MPA、串行 MAX-Log MPA,6 次迭代并行 MPA、并行 MAX-Log MPA,可以得到图 7。从图中可知,最优 ML 算法复杂度最高,硬件难以实现。针对并、串 MPA 算法,由于串行 MPA 算法的收敛速度快,算法的复杂度相对于并行 MPA 算法更低。虽然并、串 MPA 算法的复杂度比 ML 算法降低了 2 倍~3 倍,但算法复杂度依然保持在 10^4 的数量级,硬件实现并不容易。并、串 MAX-Log MPA 虽然误码率性能有所降低,但其算法复杂度却是最低的,除了加法器和乘法器以外,也不存在特别复杂的函数运算。另外,对比这 5 种算法,本文提出的基于对数域的串行 MAX-Log MPA 算法不但继承了 MAX-Log 运算低复杂度的特点,又继承了串行策略收敛速度快的特性,其算法复杂度比并行 MAX-Log MPA 更低,是 5 种算法中最低的,硬件实现也更加容易。

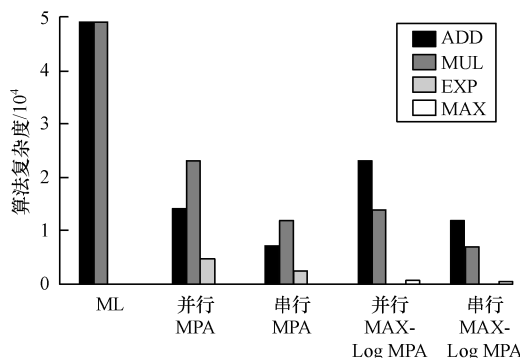


图 7 不同策略的算法运算复杂度对比

5 结束语

本文对采用不同策略的 MPA 算法进行阐述,并结合串行 MPA 算法和 MAX-Log 运算两者之间的优点,提出一种串行 MAX-LogMPA 算法。通过对收敛速度、误码率性能、算法复杂度 3 个方面的仿真实验对比,可以发现:采用串行 MPA 与并行 MPA 的误码率性能一样;并、串 MAX-Log MPA 两者的误码率性能相对较差,算法复杂度低,硬件实现容易。综合来看,串行 MPA 算法比并行 MPA 多用户检测算法更优。串行 MAX-LogMPA 算法的算法复杂度进一步降低,硬件实现更加容易。

参考文献

- [1] SOLDANI D, 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.
- [2] WANG Bichai, WANG Kun, LU Zhaohua, et al. Comparison study of non-orthogonal multiple access schemes for 5G[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [3] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse code multiple access [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013: 332-336.
- [4] 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.
- [5] BEEK J V D, POPOVIC B M. Multiple access with low-density signatures [C]//Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2009: 1-6.
- [6] RAZAVI R, HOSHYAR R, IMRAN M A, et al. Information theoretic analysis of LDS scheme [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(8): 798-800.
- [7] TAHERZADEH M, NIKOPOUR H, BAYESTECH A, et al. SCMA codebook design [C]//Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 14-17.
- [8] ZHANG Shunqing, XU Xiuqiang, LU Lei, et al. Sparse code multiple access: an energy efficient uplink approach for 5G wireless systems [C]//Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 4782-4787.
- [9] AU K, ZHANG Liqing, NIKOPOUR H, et al. Uplink contention based SCMA for 5G radio systems [C]//Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 900-905.
- [10] LU Lei, CHEN Yan, GUO Wenting, et al. Prototype for 5G new air interface technology SCMA and performance evaluation [J]. China Communications, 2015, 12 (s1): 38-48.
- [11] DU Yang, DONG Binhong, CHEN Zhi. Joint sparse graph-detector design for downlink MIMO-SCMA system [J]. IEEE Journals & Magazines, 2017, 6(1): 14-17.
- [12] WU Yiqun, ZHANG Shunqing, CHEN Yan. Iterative multiuser receiver in sparse code multiple access systems [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 2918-2923.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] KSCHISCHANG F R, FREY B J, LOELIGER H A. Factor graphs and the sum-product algorithm [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(2): 498-519.
- [12] HE S B, CHEN J M, JIANG F C, et al. Energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks [C]//Proceedings of INFOCOM'11. Washington D. C., USA: IEEE Computer Society, 2011: 2006-2014.
- [13] LIN T L, LI S L, CHANG H Y. A power balance aware wireless charger deployment method for complete coverage in wireless rechargeable sensor networks [J]. Energies, 2016, 9(9): 695-708.
- [14] PANG Y, LU Z, PAN M, et al. Charging coverage for energy replenishment in wireless sensor networks [J]. IEEE International Conference on Networking, 2014, 43(3): 251-254.
- [15] 王继强. 集合覆盖问题的模型与算法 [J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(17): 15-17.
- [16] DU D Z, KO K I, HU X. Design and analysis of approximation algorithms [M]. Berlin, Germany: Springer, 2011: 123-136.
- [17] WELZL E. Smallest enclosing disks (balls and ellipsoids) [M]//MAURER H. New Results and New Trends in Computer Science. Berlin, Germany: Springer, 1991: 359-370.

编辑 顾逸斐

编辑 金胡考

(上接第 87 页)