

基于子图的边缘串行消息传递算法

贾志豪, 孙 君

(南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 江苏南京 210003)

摘 要: 稀疏码分多址接入(Sparse Code Multiple Access, SCMA)作为一种重要的码域非正交多址技术, 能够满足 5G 通信的海量机器接入需求, 但是接收端采用的消息传递算法(Message Passing Algorithm, MPA)存在收敛速度慢、计算复杂度较高的问题. 本文提出一种基于子图的边缘串行消息传递算法(SE-MPA), 将原始因子图划分为多个不同子图, 在子图的基础上优化消息更新顺序, 利用边缘串行更新序列集, 被更新的用户节点消息立刻用来更新相连的资源节点. 仿真结果表明, 该算法在少量系统 BER 性能损失条件下, 能够有效加快消息收敛速度, 降低计算复杂度.

关键词: 稀疏码分多址接入; 消息传递算法; 子图; 边缘串行; 收敛速度; 计算复杂度

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2021)11-2146-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20200598

Edge Serial Message Passing Algorithm Based on Subgraph

JIA Zhi-hao, SUN Jun

(Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract: As an important code domain non orthogonal multiple access technology, sparse code division multiple access (SCMA) can meet the requirements of 5G communication for massive machine access. However, the message passing algorithm (MPA) adopted by the receiver has the problems of slow convergence speed and high computational complexity. This paper proposes an edge serial message passing algorithm based on subgraph (SE-MPA). The original factor graph is divided into several different subgraphs. Based on the subgraph, the message update sequence is optimized, and the edge serial update sequence set is adopted. The updated user node messages are used to update the connected resource nodes immediately. Simulation results show that the algorithm can effectively speed up the message convergence and reduce the computational complexity in the case of a small amount of BER performance loss.

Key words: sparse code multiple access; message passing algorithm; subgraph; edge serial; convergence rate; computational complexity

1 引言

在互联网浪潮和数字化时代的推动下, 未来移动终端数量出现急剧性增长, 面对未来的多样化场景需求, 传统正交多址技术将无法适应第五代移动通信系统(5th Generation Mobile Networks, 5G)中的大规模连接场景^[1], 非正交多址技术应运而生, 其中稀疏码分多址接入(Sparse Code Multiple Access, SCMA)作为 5G 非正交多址技术的重要候选方案^[2], 受到了国内外广泛关注, 在相同的资源映射以及系统负载条件下, 相比于其他非正交多址技术, SCMA 能够提供更好的链路性能.

在 SCMA 上行链路系统中, 通过合理的码本设

计^[3,4], 发送端将比特数据直接映射为复数域多维码字, 多个用户的码字在信道上叠加传输, 由于不同用户码字的叠加, 接收端的信号检测变得十分困难, 作为 SCMA 系统中的关键性技术, 接收端可以通过最优的最大后验概率算法(Maximum A Posteriori, MAP)分离叠加的用户码字, 但是复杂度非常高, 在实际条件下无法得到应用, 消息传递算法(Message Passing Algorithm, MPA)作为接近最优的 SCMA 多用户检测方案, 利用码字的稀疏特征, 能够有效接近 MAP 算法的检测性能, 并且大幅度降低检测复杂度, 但是随着接入用户数目不断增多, MPA 算法仍然具有较高的计算复杂度. 针对此

收稿日期: 2020-06-22; 修回日期: 2021-03-09; 责任编辑: 李勇锋

基金项目: 国家自然科学基金(No.61771255); 中科院重点实验室开放课题(No.20190904); 江苏省自然科学基金(No.BK20191378); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(No.18KJB510034)

问题,国内外专家学者们在MPA算法的基础上提出了一系列改进算法.文献[5]提出了一种部分边缘化的消息传递算法(PM-MPA),在一定迭代次数后,随机确定部分用户的码字信息,以牺牲系统BER性能为代价,降低了计算复杂度.文献[6]提出了一种边缘选择的消息传递算法,基于信道质量删除部分边缘分支,简化原始因子图结构,通过均值方差反馈的方式来补偿信息损失,可以有效降低检测复杂度.文献[7]提出了一种串行更新策略的算法,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,降低了算法复杂度.文献[8]提出一种基于剔除的检测算法,每轮迭代后,剔除译码优势高的用户,使其不再参与后续迭代,依次降低迭代复杂度.文献[9]中改进的串行调度方案,根据可用消息更新的数量来选择用户节点更新调度的顺序.文献[10]提出一种动态消息传递算法,通过计算用户节点可靠性,仅在因子图的子图中传播消息,从而降低复杂度.文献[11]提出一种边缘串行消息传递算法,优化原有消息的更新策略,通过边缘串行的更新方式,进一步加快了消息的收敛速度.文献[12]提出一种动态因子图的消息传递算法,每次迭代结束后选择相同数量的分支不再参与后续迭代更新,以降低计算复杂度.文献[13]提出了改进的部分边缘化MPA算法,一定迭代次数后,优先选择收敛程度较高的用户

进行判决以提升系统性能.文献[14]提出一种基于子图的消息传递算法(P-MPA),对因子图进行简单的删支操作,使消息在子图中迭代更新,可以有效降低计算复杂度.本文提出了一种基于子图的边缘串行消息传递算法(SE-MPA),将因子图通过删支规则转换为多个不同的子图,在子图的基础上进行优化,采用边缘串行的方式更新因子图上的边缘分支,达到最大迭代次数后进行用户码字联合判决,本文提出的算法能够有效加快消息收敛速度,降低计算复杂度.

2 系统模型

2.1 SCMA上行链路系统

在SCMA上行链路通信系统中,如图1,信号从用户端发送到基站端, J 个用户共享 K 个资源块,用户发送比特数据被码本直接映射成 K 维稀疏码字向量,多路复用的信号经过同步后,在基站端接收信号可以表示为:

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

其中 $\mathbf{x}_j = (x_{1,j}, \dots, x_{K,j})^T$ 表示用户 j 的码字向量, $\mathbf{h}_j = (h_{1,j}, \dots, h_{K,j})^T$ 表示用户 j 的信道向量, $\text{diag}(\mathbf{h}_j)$ 表示以向量 \mathbf{h}_j 为元素构造的对角矩阵, \mathbf{n} 表示高斯噪声且 $\mathbf{n} \sim N(0, \delta^2 \mathbf{I})$.

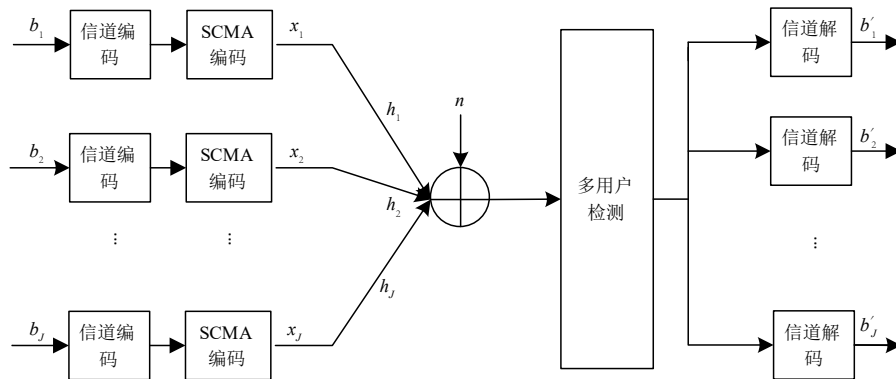


图1 SCMA上行链路系统模型

SCMA系统中因子图用来描述用户与资源块之间的连接关系,如图2所示,在因子图中包含资源节点(RN)与用户节点(UN),两者之间的连线称为边缘分支,可以表示信息的传播过程.

2.2 原始消息传递算法

原始消息传递算法(MPA)本质上是一种置信传播检测算法,作为接近最优的SCMA多用户检测方案,接收端MPA算法用因子图模型计算回归概率推理问题,从初始化先验概率开始,每一次迭代都会分为两步:资

源节点到用户节点消息值的更新,用户节点到资源节点消息值的更新,两部分更新过程相互依赖,达到最大迭代次数后,根据多次迭代后的结果对用户码字进行判决输出.MPA算法具体可分为以下四个步骤:

步骤1:初始化参数,假设各个用户发送码字的概率相同:

$$I_{R_k \rightarrow U_j}^0(\mathbf{x}_j) = \frac{1}{M} \quad (2)$$

步骤2:资源节点到用户节点的更新,所有资源节

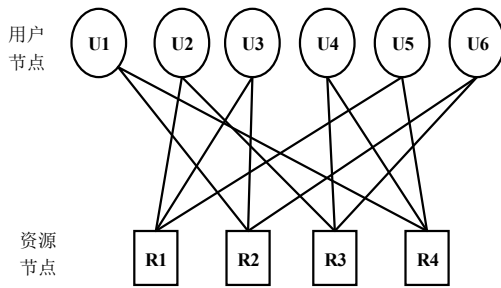


图2 SCMA系统因子图

点以相连用户节点传递的消息作为先验信息,更新因子图中的用户节点, ζ_k/j 表示除节点 j 以外与资源节点 k 相连的用户节点集合:

$$I_{R_k \rightarrow U_j}^i(\mathbf{x}_j) = \sum_{-x_j} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \left\| \mathbf{y}_k - \sum_{j \in \zeta_k} \mathbf{h}_{k,j} \mathbf{x}_{k,j} \right\|^2 \right\} \cdot \prod_{l \in \zeta_l/j} I_{U_l \rightarrow R_k}^i(\mathbf{x}_j) \quad (3)$$

步骤3:用户节点到资源节点更新,所有用户节点合并资源节点传递的消息,更新因子图中的资源节点, ζ_j/k 表示除节点 k 之外所有与用户节点 j 相连的资源节点集合:

$$I_{U_j \rightarrow R_k}^i(\mathbf{x}_j) = \prod_{p \in \zeta_j/k} I_{R_p \rightarrow U_j}^i(\mathbf{x}_j) \quad (4)$$

步骤4:重复步骤2和步骤3迭代操作,达到最大迭代次数 T_{\max} ,则计算得到用户码字的概率信息 $Q(\mathbf{x}_j)$:

$$Q(\mathbf{x}_j) = \prod_{k \in \zeta_j} I_{R_k \rightarrow U_j}^{T_{\max}}(\mathbf{x}_j) \quad (5)$$

3 本文提出的算法

3.1 划分子图

在MPA算法更新过程中,消息沿边缘分支传递,其计算复杂度主要集中在资源节点的更新,通过删减分支的方式将原始因子图划分为多个不同子图,在子图上进行消息的迭代更新,可以减少资源节点的更新,降低计算复杂度^[15,16].其中子图中删除的分支资

源节点则不再对用户节点更新,但仍然可以利用用户节点的初始化信息.为了能够有效恢复用户信息,每个子图中应包含所有的资源节点,当算法的消息更新路径越长,获得的外部信息就越多,所以应当最大化消息更新路径.综上所述,因子图删除分支的规则可以定义为^[14]:(1)一个子图中被删除的用户节点,在其余子图应该被保留,使得每个用户被更新次数相同,以保证用户的公平性.(2)最大化子图的最小环长,使环形更新路径下获得更多的外部节点信息.

本文以4个资源块、6个用户的SCMA系统为例进行分析,为了最小化系统BER性能损失,只针对资源节点删除其中一条边缘分支,分别删除资源节点上的索引分支 $\text{ind}(1), \text{ind}(2), \text{ind}(3)$,得到子图A、B、C.如图3所示,因子图中资源节点的更新分支数目由 Kd_f 变为 $K(d_f - 1)$,同时资源节点和用户节点间的消息更新分支构成一条环路,即以任意一个资源块为起点,最后都会重新回到对应的资源块本身.由于子图之间不存在消息传递依赖,可以通过并行的计算方式实现消息在子图A、子图B、子图C中不干扰传递,各个子图中只需要更新部分用户的码字信息,例如子图A更新用户 U_3, U_4, U_5, U_6 ,子图B更新用户 U_1, U_2, U_5, U_6 ,子图C更新用户 U_1, U_2, U_3, U_4 .

3.2 基于子图的边缘串行消息传递算法

在原始MPA算法消息更新迭代过程中,当次迭代更新完成的信息不能立即被其他用户节点使用,只能等到下轮迭代中才能传递出去,会直接影响算法的收敛速度^[17,18].针对这种情况,在上述分析得到多个子图的基础上,本文提出一种基于子图的边缘串行消息传递算法(SE-MPA),优化子图的消息更新路径,将已更新节点作为起点,在边缘分支上以串行的路径方式进行消息更新,由图3可知,以 R_1 为起点,可以得到子图A中最小环路的路径为: $R_1 \leftrightarrow U_3 \leftrightarrow R_2 \leftrightarrow U_6 \leftrightarrow R_3 \leftrightarrow U_4 \leftrightarrow R_4 \leftrightarrow U_5 \leftrightarrow R_1$, 分别给出原始MPA和SE-MPA两种不同算法的消息更新序列集如下:

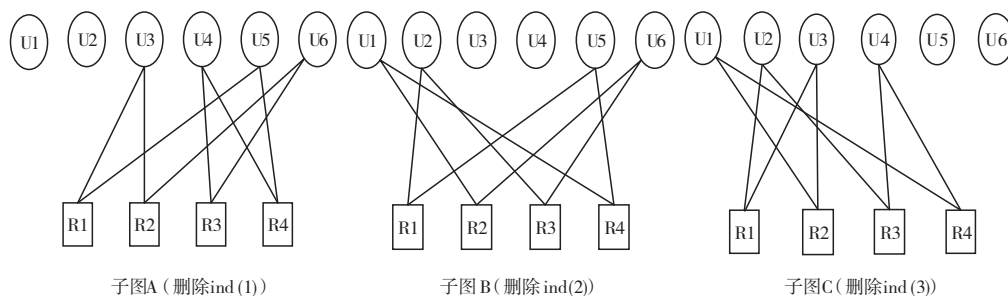


图3 因子图划分多个子图

(1) 原始MPA消息更新序列集:

$$I_{R_1 \rightarrow U_3}, I_{R_1 \rightarrow U_5}, I_{R_2 \rightarrow U_3}, I_{R_2 \rightarrow U_6}, I_{R_3 \rightarrow U_4}, I_{R_3 \rightarrow U_6}, I_{R_4 \rightarrow U_4}, I_{R_4 \rightarrow U_5}, I_{U_3 \rightarrow R_1}, I_{U_3 \rightarrow R_2}, I_{U_4 \rightarrow R_3}, I_{U_4 \rightarrow R_4}, I_{U_5 \rightarrow R_1}, I_{U_5 \rightarrow R_4}, I_{U_6 \rightarrow R_2}, I_{U_6 \rightarrow R_3} \quad (6)$$

(2) SE-MPA消息更新序列集:

$$I_{R_1 \rightarrow U_3}, I_{U_3 \rightarrow R_2}, I_{R_2 \rightarrow U_6}, I_{U_6 \rightarrow R_3}, I_{R_3 \rightarrow U_4}, I_{U_4 \rightarrow R_4}, I_{R_4 \rightarrow U_5}, I_{U_5 \rightarrow R_1}, I_{R_1 \rightarrow U_5}, I_{U_5 \rightarrow R_4}, I_{R_4 \rightarrow U_4}, I_{U_4 \rightarrow R_3}, I_{R_3 \rightarrow U_6}, I_{U_6 \rightarrow R_2}, I_{R_2 \rightarrow U_3}, I_{U_3 \rightarrow R_1} \quad (7)$$

由上述给出的原始MPA更新序列集可知,全部资源节点更新完成后再进行用户节点的更新,所有资源节点的更新是利用前一次迭代中用户节点更新的消息值,这种并行结构不能及时利用已经更新的消息,因此在迭代过程中收敛速度较慢,需要更多的迭代次数,增加了算法复杂度。

由上述给出的SE-MPA更新序列集可知,不同于原始MPA算法,子图A中的更新序列集在一次迭代过程中,首先从资源块 R_1 开始更新,最后回到资源块 R_1 本身.对于用户 U_3 来说,总共有两次更新过程分别为 $I_{R_1 \rightarrow U_3}$ 和 $I_{R_2 \rightarrow U_3}$,其中消息更新 $I_{R_1 \rightarrow U_3}$ 在每次迭代最开始时完成,利用上轮迭代的数据.与用户 U_3 相关消息 $I_{R_2 \rightarrow U_3}$ 在后续的更新中完成,由于经历多次消息传递更新,使得资源 R_1 节点获得了更多的外在信息,其消息值相对来说较为可靠,可以补偿 $I_{R_1 \rightarrow U_3}$ 前期更新的劣势,并帮助用户 U_3 实现不错的性能.边缘串行的更新方式在迭代过程中及时利用到当次迭代更新的消息,意味着可以表现出更快的收敛速度。

SE-MPA算法通过划分子图的方式减少了MPA算法更新分支数目,同时边缘串行的更新方式加快了消息的收敛速度,两者结合可以达到有效降低计算复杂度的目的.为了对用户的码字信息进行判决,当子图达到最大迭代次数后,将所有子图的置信信息合并,其中每个用户码字判决公式都包含两个子图中的置信信息,最后得到联合用户码字输出概率为:

$$Q(\mathbf{x}_j) = \prod_{k \in \mathcal{C}_j}^1 I_{R_k \rightarrow U_j}^{T_{\max}}(\mathbf{x}_j) \times \prod_{k \in \mathcal{C}_j}^2 I_{R_k \rightarrow U_j}^{T_{\max}}(\mathbf{x}_j) \times \prod_{k \in \mathcal{C}_j}^3 I_{R_k \rightarrow U_j}^{T_{\max}}(\mathbf{x}_j) \quad (8)$$

SE-MPA算法具体实现流程如图4所示.首先初始化先验概率信息,通过给定规则删减原始因子图的边缘分支,更改原始因子图结构,分别得到多个不同的子图A,子图B,子图C;然后通过给出的边缘串行更新序列集在各个子图之间并行的对消息进行更新;最后判断各个子图是否都达到最大迭代次数,若满足判决条件,则汇总得到用户码字的概率信息,进行联合码字判决输出。

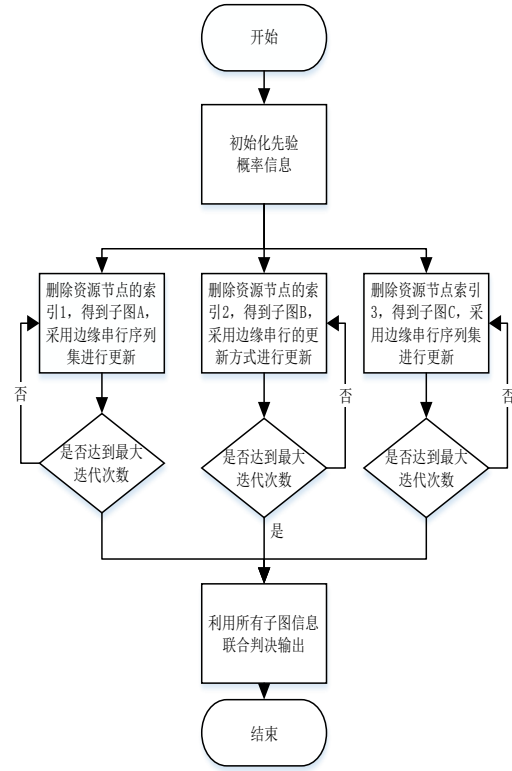


图4 算法流程图

4 仿真结果分析

在SCMA上行链路系统中,针对本文提到的原始MPA、PM-MPA、P-MPA和SE-MPA几种不同算法方案在收敛速度、BER性能和计算复杂度方面进行仿真分析(其中PM-MPA算法 $m=3, R_s=4$),具体仿真参数如表1。

表1 仿真参数设置

参数	值
用户数 J	6
资源块数 K	4
码本尺寸 M	4
过载因子 λ	150%
信道模型	AWGN

4.1 收敛速度

图5为SE-MPA算法在信噪比分别为4dB、6dB、8dB和10dB的收敛速度对比,其中SE-MPA算法在2次迭代后就达到收敛,而且随着信噪比的降低,算法收敛速度越快,相比而言,原始MPA算法的收敛速度较慢,在6次迭代后才能达到收敛,SE-MPA算法采用边缘串行的更新方式,将已经更新的消息立刻传递给下一个节点使用,可以有效加快算法的收敛速度。

4.2 BER性能对比

图6为不同算法在2次迭代和原始MPA算法4次

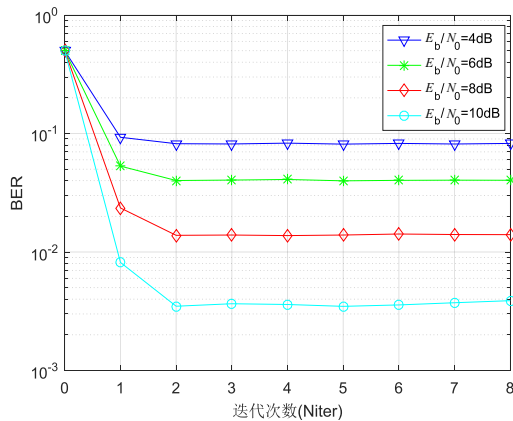


图5 算法收敛速度

迭代的BER性能对比,在2次迭代, $BER=10^{-2}$ 时, SE-MPA算法性能要明显优于其他算法的性能,相比原始MPA、PM-MPA算法有约0.6dB的性能增益,相比P-MPA算法有约1.2dB的性能增益,但是随着迭代次数的增加,SE-MPA算法的性能优势越来越弱,4次迭代下SE-MPA算法的性能相比原始MPA算法性能损失约0.4dB。本文提出的SE-MPA算法在少量迭代下性能要明显优于原始MPA,但是由于在子图中部分用户不再被继续更新,导致部分信息更新迭代受损,相比原始MPA算法会有少量的系统BER性能损失。

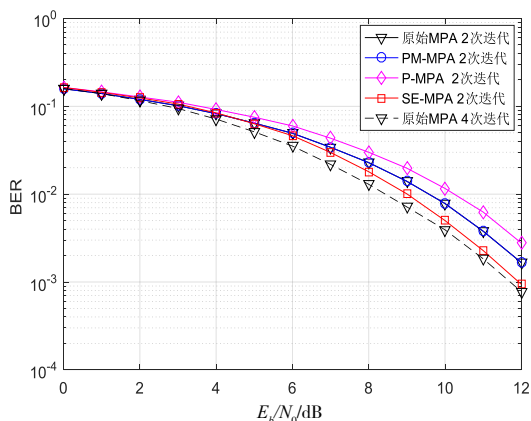


图6 不同算法BER性能

4.3 复杂度对比

本文以算法中乘法数目 (Multiplication) 和加法数目 (Addition) 为标准进行复杂度分析,MPA 算法复杂度主要集中在资源节点的更新,已知每条分支上资源节点更新计算需要 $M^{d_j}(2d_j+1)$ 次乘法运算,总共有 Kd_j 条分支,所以 MPA 算法一次迭代的计算复杂度约为 $Kd_jM^{d_j}(2d_j+1)$,而 SE-MPA 算法减少了边缘分支数目,仅需要在子图中更新消息,子图之间可以互相不受影响的并行更新,只需计算其中任意一个子图的复杂度,

同时边缘串行的更新方式使消息收敛速度加快,只需要少量迭代就能达到收敛。SE-MPA 算法通过减少消息更新分支数目和减少收敛所需最大迭代次数 T_{max} ,从而降低了计算复杂度。图7所示为不同算法的复杂度对比,以算法的乘法数目进行分析,其中PM-MPA算法的乘法数目约为原始MPA的53%,SE-MPA算法的乘法数目约为原始MPA的24%,所以本文提出的SE-MPA算法能有效降低计算复杂度。

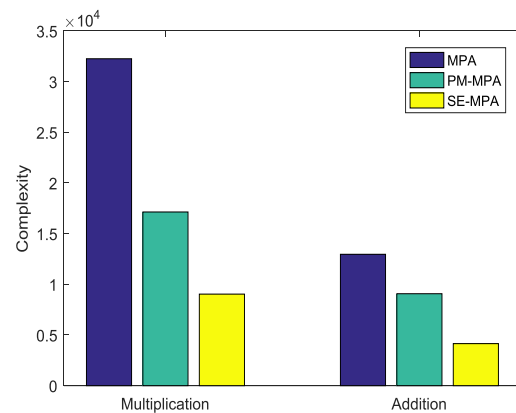


图7 复杂度对比

5 结论

本文针对SCMA系统接收端的消息传递算法存在收敛速度慢、计算复杂度较高的问题,结合子图的并行计算方式和边缘串行的更新策略,提出基于子图的边缘串行消息传递算法(SE-MPA),将因子图划分为多个不同子图,在子图的基础上,优化了原有消息的更新顺序,利用边缘串行更新序列集,被更新的用户节点消息立刻用来更新相连的资源节点。仿真结果表明,SE-MPA算法在少量系统BER性能损失条件下,能有效加快消息收敛速度,降低计算复杂度。

参考文献

- [1] Andrews J G, et al. What will 5G be? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065 - 1082.
- [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] Taherzadeh M, Nikopour H, Bayesteh A, et al. SCMA codebook design[A]. 2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference [C]. Vancouver, BC: IEEE, 2014. 1 - 5.
- [4] Nikopour H, Baligh H. Sparse code multiple access[A]. IEEE International Symposium on Personal Indoor & Mo-

- bile Radio Communications[C]. London, UK: IEEE, 2013. 332 – 336.
- [5] 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, 2015, 4(6): 585 – 588.
- [6] 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.
- [7] 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 & Information Technology, 2016, 38(8): 1888 – 1893.(in Chinese)
- [8] 朱翠涛,韦宁,汪汉新,等. 基于迭代剔除的SCMA多用户检测算法[J]. 通信学报, 2018, 39(6):64 – 72.
Zhu C T, Wei N, Wang H X, et al. Multi-user detection scheme for SCMA systems based on iteration removal[J]. Journal on Communications, 2018, 39(6): 64 – 72.(in Chinese)
- [9] Du Y, Dong B, Chen Z, et al. Improved serial scheduling-based detection for sparse code multiple access systems [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(5): 570 – 573.
- [10] Tan Y, Gao Z, Guo S, et al. A dynamic multiuser detection scheme for uplink SCMA system[A]. 2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology (ICCT) [C]. Chengdu: IEEE, 2017. 631 – 635.
- [11] Ma L, Tong S, Zheng H, et al. Edgewise serial message passing detection of uplink SCMA systems for better user fairness and faster convergence rate[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(4):1285 – 1288.
- [12] Ma Xinying, Yang Lin, Chen Zhi, et al. Low complexity detection based on dynamic factor graph for SCMA systems [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(12): 2666 – 2669.
- [13] Jia M, Wang L, Guo Q, et al. A low complexity detection algorithm for fixed up-link SCMA system in mission critical scenario [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 5(5):3289 – 3297.
- [14] Bayesteh A, Nikopour H, Taherzadeh M, et al. Low complexity techniques for SCMA detection[A]. 2015 IEEE Globecom Workshops[C]. CA, USA: IEEE, 2015.1 – 6.
- [15] Zhang C, Luo Y, Chen Y. A low complexity SCMA detector based on discretization [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(4):2333 – 2345.
- [16] Meng X, Wu Y, Chen Y, et al. Low complexity receiver for uplink SCMA system via expectation propagation[A]. 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC) [C]. San Francisco, CA: IEEE, 2017. 1 – 5.
- [17] Miao J, Hu X, Zhao Z. A low complexity multiuser detection scheme with dynamic factor graph for uplink SCMA systems[A]. 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC) [C]. Changchun, China: IEEE, 2019. 846 – 851.
- [18] Klimentyev V P, Sergienko A B. A low-complexity SCMA detector for AWGN channel based on solving overdetermined systems of linear equations[A]. 2016 International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems [C]. St Petersburg, Russia: 2016. 61 – 65.

作者简介



贾志豪 男,1995年1月生于安徽宣城,现为南京邮电大学通信与信息硕士研究生.主要研究方向为大规模机器类通信下接收端检测算法.

E-mail:15201966009@163.com



孙君(通信作者) 女,1980年7月生,现为南京邮电大学教师,硕士生导师,研究方向为无线网络、无线资源管理和物联网.

E-mail:sunjun@njupt.edu.cn