

# 基于动态因子图更新率的 SCMA 检测算法

贾志豪, 孙 君

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

**摘 要:**稀疏码分多址系统(sparse code multiple access, SCMA)作为一种码域的非正交多址技术,在相同时频资源条件下承载更多用户,能够满足 5G 通信的海量连接需求,但是接收端采用的消息传递算法(message passing algorithm, MPA)存在复杂度较高等问题。因此,该文提出了一种基于动态因子图更新率的消息传递算法(DFT-MPA),利用更新率衡量迭代前后因子图分支上信息的变化程度,选择收敛程度较高的分支加入收敛集合,通过减少迭代过程中更新分支的数目,降低了计算复杂度,当所有分支加入收敛集合或者达到最大迭代次数,则完成迭代输出译码。仿真结果表明,该算法能够有效平衡系统复杂度与误码率性能,满足不同的场景需求。

**关键词:**稀疏码分多址;消息传递算法;动态因子图;更新率;计算复杂度

中图分类号:TP301.6;TN929.5

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2022)01-0123-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2022.01.021

## SCMA Detection Algorithm Based on Dynamic Factor Graph Update Rate

JIA Zhi-hao, SUN Jun

(School of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** As a non orthogonal multiple access technology in code domain, sparse code multiple access (SCMA) can support more user connections under the same time-frequency resources and can meet the mass connection requirements of 5G communication. However, the message passing algorithm (MPA) adopted by the receiver has the problem of high complexity. Therefore, we propose a message passing algorithm based on update rate of dynamic factor graph (DFT-MPA). The update rate is used to measure the change degree of information on the branches of the factor graph before and after iteration. The branches with higher convergence degree are selected to join the convergence set. By reducing the number of update branches in the iteration process, the computational complexity is reduced. When all branches join the convergence set or reach the maximum iteration rate, the iterative output decoding is completed. Simulation shows that the proposed algorithm can effectively balance the system complexity and BER performance, which meets the requirements of different scenarios.

**Key words:** sparse code multiple access; message passing algorithm; dynamic factor graph; update rate; computational complexity

## 0 引 言

随着物联网和移动互联网技术的迅速发展,面对大规模机器通信的应用场景,在有限频谱资源条件下,正交多址技术已经不能满足种类繁多的物联网业务和海量设备接入<sup>[1]</sup>,有必要提出新型的多址技术<sup>[2-3]</sup>。稀疏码分多址(SCMA)作为一种重要的非正交多址技术,在相同资源映射配置以及系统负载条件下,相比于其他多址技术,能够提供更好的链路性能<sup>[4]</sup>。

SCMA 上行链路系统传输过程中,发送端将编码

比特直接映射为复数多维码字,多个用户码字在信道上叠加传输,接收端的信号检测变得十分困难。最大后验概率算法作为最优的检测准则可以区分叠加的用户信号,但是由于复杂度非常高,无法得到实际应用。消息传递算法(MPA)作为接近最优的 SCMA 多用户检测方案,利用码字的稀疏特性<sup>[5-6]</sup>,能够接近 MPA 译码性能并且大幅度降低译码复杂度,但是随着接入用户数目的不断增多,传统的 MPA 算法仍然具有较高的计算复杂度。针对此问题,国内外专家学者们提

收稿日期:2021-01-23

修回日期:2021-05-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61771255);中科院重点实验室开放课题(20190904)

作者简介:贾志豪(1995-),男,硕士研究生,研究方向为稀疏码分多址接收端检测算法;孙 君,博士,副研究员,研究方向为无线网络、无线资源管理和物联网。

出了一系列改进算法。文献[6]提出了球形解码的检测算法,根据噪声方差大小计算圆形半径区域内的合成星座点(SCP),舍去部分较远的合成星座点,通过选择合理的球形解码半径动态平衡系统误码率性能和计算复杂度。文献[7-8]提出了基于部分边缘化消息传递算法(PM-MPA),迭代一定次数后确定部分用户的码字信息,以牺牲部分误码率为代价,降低了计算复杂度。文献[9]提出了基于加权系数的MPA检测算法,通过对合成星座点分配不同的权值系数,有效加快消息的收敛速度。文献[10]提出了串行更新策略的算法(SMPA),保证更新的消息能够立即进入当前迭代,加快消息的收敛速度,降低了算法复杂度。文献[11-12]中改进串行调度的MPA检测方案,进一步加快了串行调度策略的收敛速度。文献[13]通过删支规则,将原始因子图转换为多个子图并行迭代更新,降低了计算复杂度,但是需要针对不同的系统预先设定不同的子图方案,系统性能较差。该文提出一种基于动态因子图更新率的消息传递算法(DFT-MPA),通过对因子图不同分支上信息的收敛程度进行判断,动态选择收敛程度较高的分支不再参与后续迭代更新,减少了更新分支的数目,有效降低了计算复杂度。

## 1 系统模型

### 1.1 SCMA 上行链路系统概述

SCMA 上行链路通信系统如图 1 所示,  $J$  个用户共享  $K$  个资源块,用户发送的数据比特流被映射成  $K$  维码字  $\mathbf{x}_j$ ,每个码字都为包含  $N$  个非零元素的  $K$  维稀疏向量,其中用户数  $J$  大于时频资源块数  $K$ ,系统过载率为  $\lambda = J/K$ 。多路用户信号经过同步后,基站端接收到的信号可以表示为:

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

其中,  $\mathbf{x}_j = (x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{k,j})$  表示码字向量,  $\mathbf{h}_j = (h_{1,j}, h_{2,j}, \dots, h_{k,j})$  表示信道向量,  $\text{diag}(\mathbf{h}_j)$  表示以向量  $\mathbf{h}_j$  为对角元素构造的矩阵,  $\mathbf{n} = (n_{1,j}, n_{2,j}, \dots, n_{k,j})$  表示高斯噪声,且服从  $N(0, \sigma^2 I)$  分布。

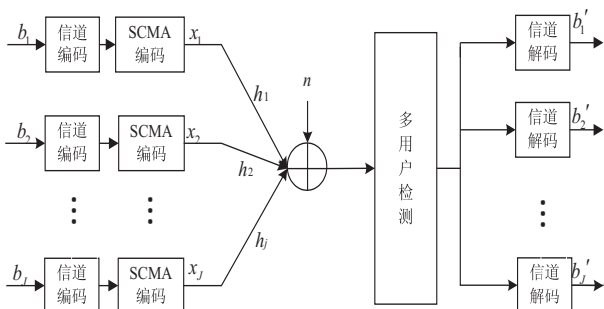


图 1 SCMA 上行链路系统框图

SCMA 系统中因子图用来描述用户和资源块的连

接关系,以  $J=6, K=4$  系统为例,因子图分支连接资源节点(RN)与用户节点(UN),可以反映消息的迭代传播过程,每个用户节点连接 2 个资源节点,每个资源节点与 3 个用户节点相连,连接关系如图 2 所示。

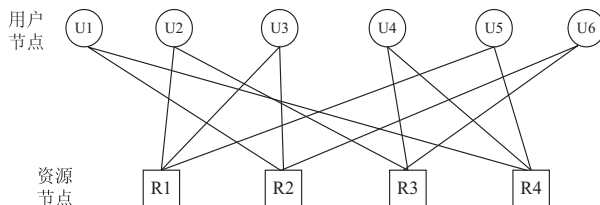


图 2 SCMA 系统因子图

### 1.2 原始消息传递算法

原始消息传递算法(MPA)是一种置信度传播算法,作为接近最优的 SCMA 多用户检测方案,用因子图模型来回归概率推理问题,消息在资源节点和用户节点之间更新,经过多次迭代后,计算每个用户码字的概率信息。

在 SCMA 上行链路通信系统中,接收端 MPA 算法首先初始化先验概率,然后对资源节点和用户节点的消息值迭代更新,迭代过程分为两步:资源节点到用户节点消息的更新和用户节点至资源节点消息的更新,更新过程相互依赖,达到设定最大迭代次数后,则根据多次迭代后的结果进行解码判决。具体可分为以下三个步骤:

步骤 1:初始化参数,假设每个用户发送的码字概率相等:

$$I_{r_k \rightarrow u_j}^0(x_j) = \frac{1}{M} \quad (2)$$

步骤 2:消息迭代更新,资源节点以相连用户节点传递来的消息作为先验信息,同时更新所有资源节点到用户节点的消息  $I_{r_k \rightarrow u_j}^t(x_j)$ ,用户节点通过合并资源节点的消息更新所有用户节点到资源节点的消息  $I_{u_j \rightarrow r_k}^t(x_j)$ :

$$I_{u_j \rightarrow r_k}^t(x_j) = \sum_{\mathbf{x}_j} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \left\| \mathbf{y}_k - \sum_{j \in \xi_k} \mathbf{h}_{k,j} \mathbf{x}_{k,j} \right\|^2\right\} * \prod_{l \in \xi_k/j} I_{u_l \rightarrow r_k}^t(x_j) \quad (3)$$

$$I_{r_k \rightarrow u_j}^t(x_j) = \prod_{p \in \xi_j/k} I_{r_p \rightarrow u_j}^t(x_j) \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{x}_j$  表示码字向量,  $\xi_k/j$  表示除节点  $j$  以外所有与资源节点  $k$  相连的用户节点集合,  $\xi_j/k$  表示除节点  $k$  之外所有与用户节点相连的资源节点集合。

步骤 3:当达到最大迭代次数  $T_{\max}$ ,计算每个用户的码字概率:

$$Q(x_j) = \prod_{k \in \xi_j} I_{r_k \rightarrow u_j}^{T_{\max}}(x_j) \quad (5)$$

## 2 文中提出的算法

MPA 算法消息沿着因子图分支传递更新,在检测过程中,存在部分因子图分支上的码字信息少量迭代后就不再变化,但是每次迭代仍然会更新所有分支的消息,产生了大量的冗余计算。针对上述问题,该文提出一种基于动态因子图更新率的消息传递算法(DFT-MPA),根据更新率衡量相邻迭代因子图分支上信息的变化程度,停止更新收敛程度较高的分支,动态调整因子图结构,减少了迭代过程中更新分支的数目,可以有效降低计算复杂度。

对因子图中连接资源节点和用户节点的分支分类,所有分支集合划分为两类<sup>[14-15]</sup>,更新集合  $|B_u(t)|$  和收敛集合  $|B_r(t)|$ ,如式(7)所示。对应因子图中在资源节点与用户节点之间的连线分别为实线和虚线(见图3),实线表示资源节点和用户节点之间的消息可以互相更新,虚线表示该分支只存在用户节点对资源节点进行更新,但资源节点不再对用户节点更新,在 MPA 算法初始迭代中  $|B_u(t)| = Kd_f$ ,  $|B_r(t)| = 0$ ,分支集合之间的关系如(6)所示。

$$|B_u(t)| + |B_r(t)| = Kd_f \quad (6)$$

$$b_{k,j}^t = \begin{cases} \bar{b}_{k,j}^t, \bar{b}_{k,j}^t \in B_u(t) \\ \hat{b}_{k,j}^t, \hat{b}_{k,j}^t \in B_r(t) \end{cases} \quad (7)$$

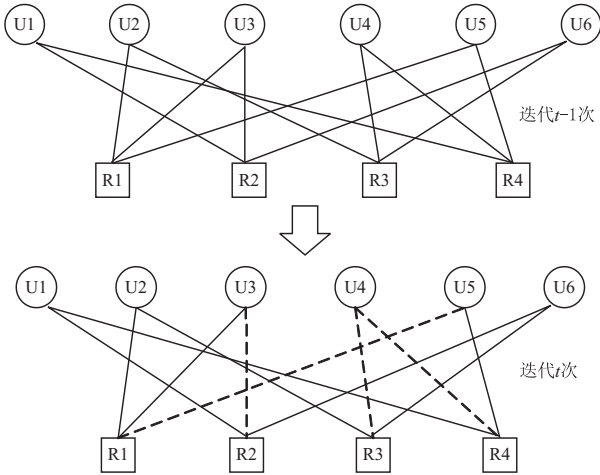


图3 动态因子图示意图

$$I_{r_i \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j) = \sum_{\mathbf{x}_j} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \left\| \mathbf{y}_k - \sum_{j \in \xi_i} \mathbf{h}_{k,j} \mathbf{x}_{k,j} \right\|^2\right\} * \prod_{l \in \xi_i/j} I_{u_l \rightarrow r_i}^t(\mathbf{x}_j) \quad (8)$$

消息传递算法的复杂度主要集中于资源节点更新,其中  $I_{r_i \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j)$  表示第  $t$  次迭代中用户节点  $j$  在资源节点  $k$  上传输各个码字的置信信息,消息迭代过程中,资源节点会更新所有与之相连的用户节点,即更新因子图中所有分支的码字信息。为了衡量不同分支上码

字信息的收敛情况,将更新率作为分支信息收敛程度的判断标准,定义为当次迭代和上一次迭代之间分支上信息的差值比:

$$W_{r_i \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j) = \sum_{m=1}^M \left\| (I_{r_i \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j^m) - I_{r_i \rightarrow u_j}^{t-1}(\mathbf{x}_j^m)) / I_{r_i \rightarrow u_j}^{t-1}(\mathbf{x}_j^m) \right\| \quad (9)$$

更新率  $W_{r_i \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j)$  与信息收敛程度成反比,若更新率值较大,表示本次迭代分支上的信息还没有完全收敛,需要继续参与迭代更新,反之则说明本次迭代分支上的码字信息已经不再变化,多余迭代对信息的更新几乎没有影响。

$$\begin{cases} b_{k,j}^t \in B_u(t), W_{r_i \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j) > T_d \\ b_{k,j}^t \in B_r(t), W_{r_i \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j) \leq T_d \end{cases} \quad (10)$$

DFT-MPA 算法在首次迭代更新时由于无法判断信息收敛程度的大小,采用原始因子图更新以保证系统性能,当第  $t$  ( $t > 1$ ) 次迭代完成,计算所有分支的更新率,若更新率小于门限值即满足  $W_{r_i \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j) \leq T_d$  时,则加入收敛集合  $|B_r(t)|$  中,当所有分支加入收敛集合或者达到最大迭代次数时停止迭代。

算法具体步骤如下:

输入:接收信号  $y$ ,信道矩阵  $\mathbf{H}$ ,噪声功率  $\sigma^2$ ,最大迭代次数  $T_{\max}$ ,门限值  $T_d$

输出:用户比特值 LLR

初始化:  $I_{r_i \rightarrow u_j}^0(\mathbf{x}_j) = 1/M$

while ( $t \leq T_{\max}$ )

if ( $t = 1$ )

利用公式(3)和公式(4)分别更新资源节点  $I_{r_i \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j)$  和用户节点  $I_{u_j \rightarrow r_i}^t(\mathbf{x}_j)$

end if

if ( $1 < t \leq T_{\max}$ )

利用公式(3)和公式(4)分别更新资源节点  $I_{r_i \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j)$  和用户节点  $I_{u_j \rightarrow r_i}^t(\mathbf{x}_j)$

利用公式(8)计算所有分支的更新率  $W_{r_i \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j)$ :

if  $W_{r_i \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j) \leq T_d$

将满足收敛条件的分支添加到收敛集合  $|B_r(t)|$

end if

$t = t + 1$

end if

for  $j = 1 : J$

$Q(\mathbf{x}_j) = \prod_{k \in \xi_j} I_{r_i \rightarrow u_j}^t(\mathbf{x}_j)$

End for

## 3 仿真结果

本节在 SCMA 上行链路系统中进行仿真,比较分析了 DFT-MPA、MPA 和 PM-MPA 算法的 BER 性能,收敛速度和计算复杂度。具体仿真参数设置如表 1 所示。

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
过载率 $\lambda$	150%
信道模型	AWGN

如图 4 所示,仿真给出 DFT-MPA 算法随着门限值大小变化的 BER 曲线。在固定 SNR 情况下,DFT-MPA 算法的 BER 性能随着门限值的增加呈下降趋势,当门限值较小时,相比原始 MPA 算法的性能损失较少,当门限值较大时,BER 性能损失较大。因此,DFT-MPA 算法通过调整门限值能满足不同的通信质量要求。

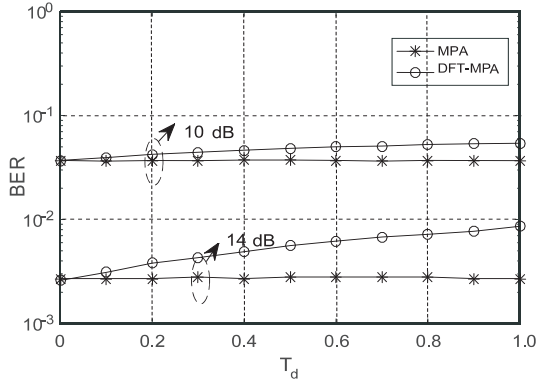


图 4 门限值与 BER 性能

### 3.1 BER 性能对比

图 5 为不同算法在 6 次迭代下的 BER 性能对比,其中 PM-MPA 算法的性能最差,PM-MPA 算法随机选择部分用户进行检测,以牺牲性能为代价,一定程度上降低了复杂度,DFT-MPA 算法在门限值为 0.1 的 BER 性能较好,相比原始 MPA 算法仅有 0.1 dB 的性能损失,门限值为 0.3 时,大约有 0.6 dB 的性能损失,门限值为 0.5 时,大约有 0.8 dB 的性能损失,其曲线接近于 PM-MPA 算法。DFT-MPA 算法由于迭代过程中部分分支消息更新受损,导致 BER 性能的下降,可以通过调整门限值实现不同的 BER 性能,满足不同

通信场景需求。

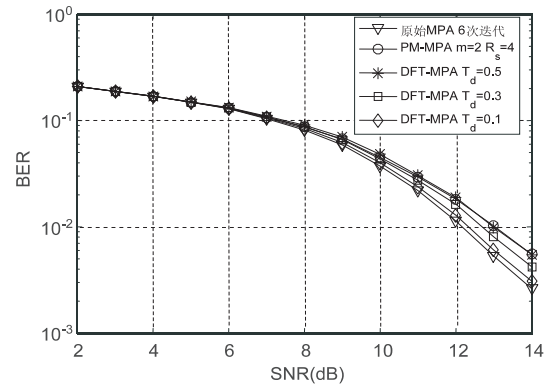


图 5 不同算法 BER 性能对比

### 3.2 收敛速度对比

图 6 为不同算法在 SNR = 13 dB 下的收敛速度对比,其中 PM-MPA 和 DFT-MPA 算法在门限值为 0.5 和 0.3 下的收敛速度较快,3 ~ 4 次迭代后达到收敛,DFT-MPA 算法在门限值为 0.1 下,与原始 MPA 算法的收敛速度相同,5 ~ 6 次迭代后收敛,随着门限值的增加,算法的 BER 性能逐渐降低,但是收敛速度却越来越快,算法可以调节门限值实现不同的收敛速率。

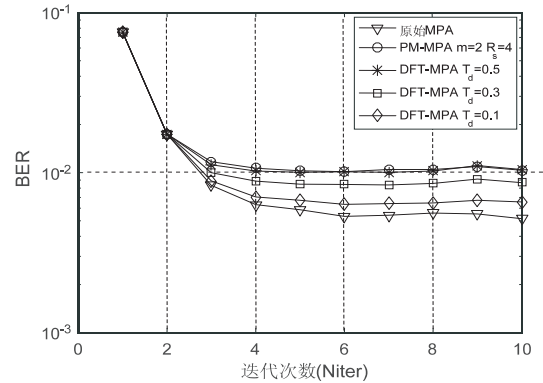


图 6 不同算法收敛速度对比

### 3.3 复杂度分析

算法复杂度公式如表 2 所示。该文以算法中的乘法器和加法器数目为标准进行复杂度分析,MPA 算法复杂度主要来自于资源节点的更新,更新  $I_{t_k \rightarrow u_j}^l(x_j)$  需要  $M^{d_f}(2d_f + 1)$  次乘法,总共有  $Kd_f$  条分支,所以一次迭代 MPA 乘法约为  $Kd_f M^{d_f}(2d_f + 1)$ ,原始 MPA 需要

表 2 不同算法复杂度比较

解码算法	乘法	加法
MPA	$T_{\max} Kd_f M^{d_f}(d_f + 1) + T_{\max} Jd_v M(d_v - 2)$	$T_{\max} Kd_f (M^{d_f} - M) d_f$
PM-MPA	$T_{\max} Jd_v M(d_f - 2) + mKd_f M^{d_f}(d_f + 1) + (T_{\max} - m) R_s d_f M^{d_f - R/d_f}(d_f + 1) + (T_{\max} - m)(K - R_s) d_f M^{d_f}(d_f + 1)$	$mKd_f^2 (M^{d_f} - M) + (T_{\max} - m) R_s d_f^2 (M^{d_f - R/d_f} - M) + (T_{\max} - m)(K - R_s) d_f^2 (M^{d_f} - M)$
DFT-MPA	$(\sum_{t=1}^{T_{\max}}  B_u(t) ) M^{d_f}(2d_f + 1) + T_{\max} Jd_v M(d_v - 2)$	$(\sum_{t=1}^{T_{\max}}  B_u(t) ) (M^{d_f} - M) d_f$

更新  $T_{\max} K d_f$  次  $I'_{r_k \rightarrow u_j}(x_j)$ , 而 DFT-MPA 只需要  $\sum_{i=1}^{T_{\max}} |B_u(t)|$  次资源节点的更新。

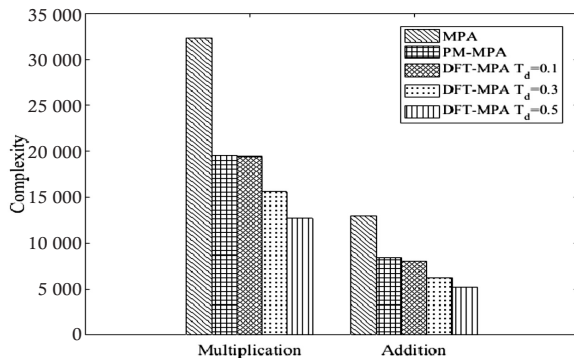


图7 不同算法复杂度对比

图7为不同算法在SNR=8 dB下的复杂度对比,主要比较算法的乘法(Multiplication)和加法数目(Addition)。其中原始MPA算法乘法次数为32 256次,PM-MPA算法乘法次数为19 479次,DFT-MPA算法在门限值为0.1,0.3,0.5时,乘法次数分别为19 385次,15 676次,12 741次,分别相当于原始MPA算法复杂度的60.1%,48.6%,39.5%,DFT-MPA算法能够通过调整门限值不同程度地降低复杂度。

#### 4 结束语

针对MPA算法存在计算复杂度较高的问题,提出了一种基于动态因子图更新率的消息传递算法(DFT-MPA),利用更新率衡量迭代前后因子图分支上信息的变化程度,选择收敛程度高的分支加入到收敛集合中,停止该分支的消息更新,动态调整原始因子图结构,当所有分支加入收敛集合或达到最大迭代次数,则完成迭代输出译码,算法通过减少消息分支更新数目,降低计算复杂度。仿真结果表明,DFT-MPA算法能够有效平衡复杂度与BER性能,满足不同场景的性能需求。

#### 参考文献:

- [1] 尤肖虎,潘志文,高西奇,等. 5G移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学:信息科学,2014,44(5):551-563.
- [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] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What will 5G be? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6):1065-1082.
- [4] 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.
- [5] TAHERZADEH M, NIKOPOUR H, BAYESTEH A, et al. SCMA codebook design [C]//2014 IEEE 80th vehicular technology conference (VTC2014-Fall). Vancouver, BC: IEEE, 2014:1-5.
- [6] PENG J, CHEN W, BAI B, et al. Joint optimization of constellation with mapping matrix for SCMA codebook design [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017, 24(3):264-268.
- [7] 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, 2018, 5(5):3289-3297.
- [8] YANG L, MA X, SIU Y. Low complexity MPA detector based on sphere decoding for SCMA[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(8):1855-1858.
- [9] WEI D, HAN Y, ZHANG S, et al. Weighted message passing algorithm for SCMA[C]//2015 international conference on wireless communications & signal processing (WCSP). Nanjing, China: IEEE, 2015:1-5.
- [10] 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.
- [11] 吉明明,郑建宏. 基于变量节点串行策略的SCMA低复杂度译码研究[J]. 电信科学, 2017, 33(9):50-57.
- [12] 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.
- [13] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse code multiple access [C]//IEEE international symposium on personal indoor & mobile radio communications. London, UK: IEEE, 2013:332-336.
- [14] 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.
- [15] MIAO J, HU X, ZHAO Z. A low complexity multiuser detection scheme with dynamic factor graph for uplink SCMA systems [C]//2019 IEEE/CIC international conference on communications in China (ICCC). Changchun, China: IEEE, 2019:846-851.