

一种低复杂度的 SCMA 系统多用户检测算法

陈发堂^a, 贾东升^a, 耿明月^b

(重庆邮电大学 a. 通信与信息工程学院; b. 计算机科学与技术学院, 重庆 400065)

摘 要: 稀疏码多址接入(SCMA)作为一种新型非正交多址接入技术,可满足 5G 海量连接的性能需求,但其中消息传递算法存在收敛速度慢、复杂度高的问题。为此,针对 SCMA 系统提出一种低复杂度的多用户检测算法。通过减小译码时叠加码字星座点搜索范围并引入权重因子,改变搜索范围内叠加码字星座点的初始概率,从而加快译码速度并提高准确率。理论分析与仿真结果表明,该算法不仅能够有效降低复杂度,而且还能加快迭代过程的收敛速度。

关键词: 稀疏码多址接入;多用户检测;消息传递算法;权重因子;叠加码字星座点

中文引用格式:陈发堂,贾东升,耿明月. 一种低复杂度的 SCMA 系统多用户检测算法[J]. 计算机工程,2018,44(6): 40-44.

英文引用格式:CHEN Fatang, JIA Dongsheng, GENG Mingyue. A multi-user detection algorithm for SCMA system with low complexity[J]. Computer Engineering, 2018, 44(6): 40-44.

A Multi-user Detection Algorithm for SCMA System with Low Complexity

CHEN Fatang^a, JIA Dongsheng^a, GENG Mingyue^b

(a. College of Communication and Information Engineering; b. College of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

[Abstract] As a novel Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) technology, Sparse Code Multiple Access (SCMA) can meet the performance requirements of massive connections for 5G, but the Message Passing Algorithm (MPA) has the problems of slow convergence and high complexity. In this paper, a multi-user detection algorithm for SCMA system with low complexity is proposed to solve above problems. By narrowing down the search range of superposed codeword constellation points and introducing the weighting factor, it changes the initial probability of superposed codeword constellation points in the search range and makes the decoding process faster and more accurate. Theoretical analysis and simulation results show that the proposed algorithm not only reduces the complexity, but also accelerates the convergence speed of the iterative process.

[Key words] Sparse Code Multiple Access (SCMA); multi-user detection; Message Passing Algorithm (MPA); weighting factor; superposed codeword constellation point

DOI:10.19678/j.issn.1000-3428.0047435

0 概述

面向 2020 年及未来,移动互联网和物联网^[1]将成为移动通信发展的主要驱动力,5G 移动通信不仅需要大幅度提升系统频谱效率,而且还要具备支持海量设备连接的能力。此外,在简化系统设计及信令流程方面也提出了很高的要求。为了满足这些需求,5G 需要采用全新的多址接入技术,因此,非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)技术^[2-3]应运而生,成为研究的重点。

稀疏码多址接入^[4](Sparse Code Multiple Access, SCMA)是一种基于码域的非正交多址接入方式。在

发送端,每个用户都有自己独立的码本^[5],信息比特首先经过信道编码,然后将编码后比特直接映射为复数域多维码字,不同用户的码字在相同的资源块上以稀疏扩频的方式非正交叠加;接收端则利用适合于稀疏性的消息传递算法(Message Passing Algorithm, MPA)^[6]进行低复杂度的多用户联合检测,并结合信道译码完成多用户的比特串恢复。SCMA 最大特点就是非正交叠加的码字个数可以成倍大于使用的资源块个数,相比于 4G 中的 OFDMA 技术,它可以在同等资源数量的条件下同时服务更多用户,从而提升系统的整体容量。此外,通过免调度传输^[7-8]也可以有效地简化信令流程,并降低空口传输时延。因此,其

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX03001021-004);重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2016jcyjA0209)。

作者简介:陈发堂(1965—),男,教授,主研方向为 LTE 物理层算法;贾东升(通信作者)、耿明月,硕士研究生。

收稿日期:2017-06-02 **修回日期:**2017-07-28 **E-mail:**jds_gmy@163.com

优良的性能越来越受到学术界和工业界的关注。

很多学者对 SCMA 进行了深入的研究,主要包括码本设计和多用户检测 2 个方面。文献[9-10]对稀疏码本的设计进行了讨论。文献[11]提出一种基于部分边缘化改进的 MPA 多用户检测算法,降低了算法的复杂度,但也牺牲了系统一定误比特率的性能。文献[12]在原始 MPA 算法的基础上提出基于对数域的 max-log MPA,通过采用 Jacobi 算法消除了文中指数运算降低了算法复杂度,但是系统性能损失比较严重。文献[13]提出一种基于串行策略的 SCMA 多用户检测算法 S-MPA,实现了误比特率性能和算法复杂度之间的折中。

为降低译码的复杂度并加快收敛速度,本文提出一种基于加权因子球型译码的 WFSD-MPA 多用户检测算法。根据高斯噪声变量确定部分搜索范围的半径,避免穷尽所有的搜索,同时通过引入权重因子改变每个叠加码字星座点的初始概率,从而缩短迭代过程收敛时间。

1 SCMA 系统模型

由于码本的设计对系统性能影响很大,因此本文直接使用华为在 2015 年亚洲创新设计大赛 5G 专题竞赛中给出的 SCMA 码本来编码,即 6 个用户使用 4 个资源块的情况,从而实现 150% 的过载。它们之间的关系可以通过 Tanner 图来表示,如图 1 所示,简化的上行 SCMA 系统框图如图 2 所示。

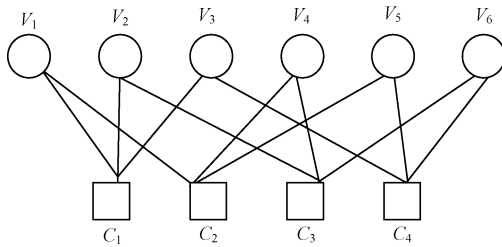


图 1 码本 Tanner 图 ($J=6, K=4$)

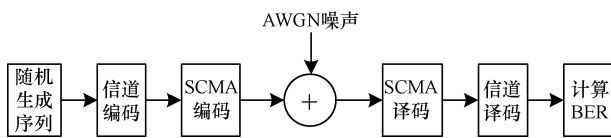


图 2 上行 SCMA 系统框图

1.1 SCMA 编码原理

SCMA 的编码原理如图 3 所示,其中,6 个用户使用 4 个资源块来传输数据,每个用户都有一个独一无二的码本,每个码本是一个 4×4 的复数矩阵(行代表资源块,列代表用户的码字),每个用户的码本有 4 个码字,从左到右分别对应信道编码后所选

择的二进制比特串 00-11 时的情况。图 3 表示 6 个用户同时发送信息,从用户 1~用户 6 分别发送信息比特为 01、00、10、00、11、10,各个用户对码本的第 2、1、3、1、4、3 列码字被选中,叠加在所使用的 4 个资源块上。

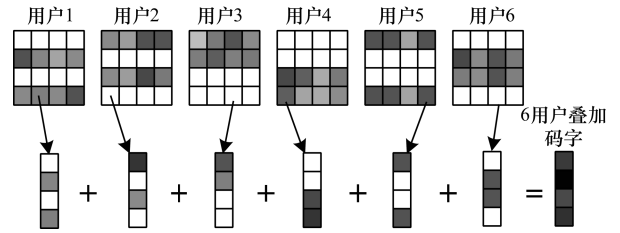


图 3 SCMA 编码原理

假定全部的用户在时间上同步,基站接收到的信号为全部用户信号的叠加,用公式表示为:

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

其中, $\mathbf{x}_j = [x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{K,j}]^T$ 表示第 j 个用户发送的码字, $\mathbf{h}_j = [h_{1,j}, h_{2,j}, \dots, h_{K,j}]^T$ 表示第 j 个用户所使用的信道向量,本文只考虑理想信道下的情况,即 $h_{k,j} = 1$, z 为高斯白噪声且 $z \sim N(0, \sigma^2 I)$ 。

在时频资源 k 处接收到的信号可以表示为:

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

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。

1.2 原始 MPA 算法

消息传递算法利用因子图的稀疏特性在变量节点 (Variable Node, VN) 和功能节点 (Function Node, FN) 之间进行迭代更新传递。MPA 译码主要包含以下 3 个步骤:1) 初始化计算,计算接收信号与各种可能的码字组合之间的条件概率;2) 利用初始化计算的结果进行信息的多次传输迭代;3) 经过 N 次迭代结果收敛,将变量节点的值输出。

在第 2 个步骤中,一次迭代过程中又可以分为 2 个分步骤,分别用数学公式表示为:

$$I'_{c_k \rightarrow u_j}(x_j) = \sum_{\sim x_j} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|y_k - \sum_{v \in \xi_k} h_{k,v} x_{k,v}\|^2 \right) \times \prod_{l \in \xi_k \setminus j} I'_{u_l \rightarrow c_k}(x_j) \right\} \quad (3)$$

$$I'_{u_j \rightarrow c_k}(x_j) = \prod_{m \in \xi_j \setminus k} I'_{c_m \rightarrow u_j}(x_j) \quad (4)$$

其中, t 为迭代的次数, ξ_k 表示连接到第 k 个 FN 上的 VN 的集合, ξ_j 表示连接到第 j 个 VN 上的 FN 的集合。

经过预先设定的最大迭代次数后,MPA 解码的

码字输出概率可以用以下公式表示:

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

2 WFS-MPA 多用户检测算法

为更好地降低译码的复杂度及加快收敛速度,本文提出了 WFS-MPA 检测算法。通过减小译码时叠加码字星座点搜索范围,并且引入权重因子来改变搜索范围内叠加码字星座点的初始概率,从而降低复杂度,加快迭代过程收敛进度。

2.1 叠加码字星座点的分类

从上文讨论可知,降低复杂度的关键目标是减小译码时可能码字组合的数目,仅仅保留那些最有可能正确译码的叠加码字^[14-15]。在系统模型中,一次原始 MPA 译码过程中共有 M^{d_c} 点需要处理,其中, M 是每个用户的码字个数, d_c 是每个资源块上连接的用户数目。在图 1 所示的情况中, $M=4, d_c=3$, 因此,共有 64 中可能的码字组合,叠加码字星座点的分布如图 4 中星号标记点所示。在一个时频资源块 k 处接收到的信号如式(2)所示,在图 4 中用实心圆点表示。

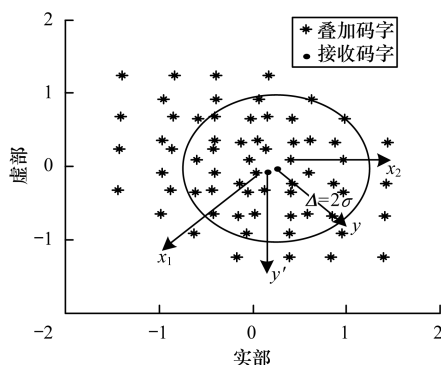


图 4 接收信号和叠加码字的星座点分布

从式(2)及图 4 中的星座点可以明显看出,由于高斯噪声的存在,接收码字星座点 y 和叠加码字星座点 x 一般情况下不会重合在一起。在资源块 k 处,码字星座点 x_2 和接收信号 y 之间的欧式距离可以表示为:

$$d_k^{x_2} = \|y_k - \sum_{x_2} h_{k,j} x_{k,j}\|^2 \quad (6)$$

假设 x_1 是真正译码时正确的码字星座点,根据式(2)和式(6)可以得到:

$$d_k^{x_1} = \|y_k - \sum_{x_1} h_{k,j} x_{k,j}\|^2 = \|z_k\|^2 \quad (7)$$

在这种情况下,必须满足叠加码字星座点和接收信号星座点之间的欧式距离为零的条件,即 $d_k^{x_1} = \|z_k\|^2 = 0$ 。然而在实际场景应用中,高斯白噪声无处不在,即 $\|z_k\|^2 \neq 0$ 。假设高斯白噪声满足均值为

0, 方差为 σ^2 , 由图 4 可知,距离接收信号 y 近的码字星座点和距离远的码字星座点相比,更有可能被正确译码。因此,限定搜索范围仅选择那些和接收信号点之间欧式距离小的码字星座点和原始 MPA 搜索所有的星座点相比是一种更有效的方法。

由 σ 决定的搜索半径 Δ 可以动态地在系统性能和复杂度之间取得良好的折中。表 1 列出了置信区间和概率值之间具体的关系,根据高斯分布的特性,当搜索半径 $\Delta = 2\sigma$ 的情况下,覆盖范围概率值可以达到 95.4%。特别地,当 $\Delta \rightarrow \infty$ 时即为传统 MPA 译码算法。

表 1 置信区间对应概率

置信区间	概率
$(-\sigma, \sigma)$	68.3
$(-2\sigma, 2\sigma)$	95.4
$(-3\sigma, 3\sigma)$	99.7

2.2 权重因子的引入

根据不同叠加码字星座点 x 与接收信号 y 之间的欧式距离不同可知,靠近接收信号的星座点为正确解的概率将高于那些远离接收信号的星座点,假设 $d_k^{x_1} < d_k^{x_2}$, 则 $P(x_1|y) > P(x_2|y)$ 。因此,若给靠近接收信号的星座点分配较大的初始概率,获得正确解的几率将增大,迭代过程的收敛速度也将加快。

如图 4 所示,假设发射信号为 x_1 , 由于受信道噪声的影响,接收信号 y 偏离了发射星座点,受噪声干扰后的接收信号 y 坐落于 x_1 与 x_2 之间。尽管 y 到 x_1 的距离会稍小于 y 到 x_2 的距离,但其微小的距离差将导致检测结果为 x_2 的几率增大。如果给靠近接收信号的星座点赋予较大的初始概率,即拉大正确解与错误解之间的距离差,那么 x_1 为最终解的几率将得到提升。因此,引入一个权重因子 α , 给靠近接收信号的星座点分配较大的权重因子,远离接收信号的星座点分配较小的权重因子。加入权重因子后, y 变为了 y' , 接收信号 y' 与发射信号 x_1 之间的距离缩短,而与错误信号 x_2 之间的距离拉大,从而提升了正确检测率。

具体引入权重因子的方案为:将搜索范围内的叠加码字星座点按照欧式距离的大小进行排序,将其划分为 L 类,每类分配相同的权重因子 α , 第一类由最接近于接收信号的部分星座点组成,给其分配最大的权重因子 α_1 , 剩下的 $L-1$ 类分配依次减小的权重因子 $\alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_L$ 。其中,权重因子的确定方式为:

$$\begin{cases} \alpha_l = (L - l + 1) \times \alpha_L \\ \sum_{l=1}^L \alpha_l = 1 \end{cases} \quad (8)$$

将各星座点的初始概率与其分配的权重因子相乘,使得靠近接收信号的星座点可以获得更大的初始值,从而提升正确检测率。最后将改变后的各星座点初始概率代入限定搜索范围的 MPA 迭代过程,如式(9)和式(10)所示。

$$I_{c_k \rightarrow u_j}^t(x_j) = \sum_{\substack{v \in \xi_k \\ v \in \xi_k}} \left\{ \frac{\alpha_l}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|y_k - \sum_{v \in \xi_k} h_{k,v} x_{k,v}\|^2\right) \times \prod_{l \in \xi_k \setminus j} I_{u_l \rightarrow c_k}^{t-1}(x_j) \right\} \quad (9)$$

$$I_{u_j \rightarrow c_k}^t(x_j) = \prod_{m \in \xi_j \setminus k} I_{c_m \rightarrow u_j}^t(x_j) \quad (10)$$

受权重因子影响的初始概率会运用到每一轮迭代过程中,使得迭代结果更加准确,从而加快收敛速度。此外搜索半径 Δ 可以动态变化,用以适应不同应用场景的需求,从而使 WFSD-MPA 可以较好地在此系统性能和复杂度之间取得平衡。

3 复杂度分析

在原始 MPA 译码过程中,复杂度主要来自资源节点上的迭代操作, $\sum_{v \in \xi_k} h_{k,v} x_{k,v}$ 需要 M^{d_c} 次可能性计算。由于权重因子的引入对系统的复杂度影响极小,而且提升了收敛速度,因此在一定程度上降低了迭代所需次数,从而降低了计算复杂度。本文提出的 WFSD-MPA 算法在讨论复杂度计算时不考虑权重因子的影响。与原始 MPA 计算所有可能的码字组合不同的是,WFSD-MPA 算法通过减小搜索半径来减少需要计算的码字组合数目。

刚开始迭代时,在资源节点 k 处原始 MPA 和 WFSD-MPA 都需要计算 M^{d_c} 次 d_k^x ,可是 WFSD-MPA 由于要比较 d_k^x 和搜索半径 Δ 之间的大小,增添了额外的复杂度。但是因为把搜索范围从 M^{d_c} 个码字星座点减少到 Δ 内,数目记为 $|\varphi_\Delta|$,所以大幅降低了计算复杂度。本文从乘法和加法操作的角度考虑复杂度,为了更加直观的形成对比分析,对于相同的部分同时忽略考虑不计。所计算的乘法及加法复杂度可以依次用式(11)~式(14)表示。

$$C_x^{\text{MPA}} = 3KM^{d_c} + t_{\max} d_c KM^{d_c} (d_c - 1) \quad (11)$$

$$C_x^{\text{WFSD-MPA}} = 3\left(\sum_{k=1}^K |\varphi_\Delta|\right) + t_{\max} d_c \left(\sum_{k=1}^K |\varphi_\Delta|\right) (d_c - 1) \quad (12)$$

$$C_+^{\text{MPA}} = t_{\max} d_c (KM^{d_c} - KM) \quad (13)$$

$$C_+^{\text{WFSD-MPA}} = KM^{d_c} + t_{\max} d_c \left[\left(\sum_{k=1}^K |\varphi_\Delta|\right) - KM\right] \quad (14)$$

4 仿真与结果分析

为评估 WFSD-MPA 译码算法的性能,分别将其与原始 MPA、S-MPA 算法在误码率(Bit Error Rate, BER)、收敛速度及复杂度方面进行对比。表2列出了仿真中所用的实验参数。

表2 仿真参数配置

参数	配置
信道模型	AWGN
SCMA 码本	6×4
过载因子/%	150
信道估计	理想

4.1 BER 对比

图5显示了原始 MPA、S-MPA 与本文算法的 BER 性能表现情况。可以看出,在迭代次数都为6次的情况下,WFSD-MPA 在 $\Delta = 2\sigma$ 时的仿真曲线几乎和原始 MPA 重合,而 S-MPA 在3次迭代的情况下就能达到同样的性能。WFSD-MPA 在 $\Delta = \sigma$ 时虽然复杂度较低,但是会有不少的性能损失。当搜索半径 $\Delta = 3\sigma$ 时,由于权重因子的作用,在获得相同 BER 性能的情况下,和原始 MPA 相比会有约 0.4 dB 的增益。

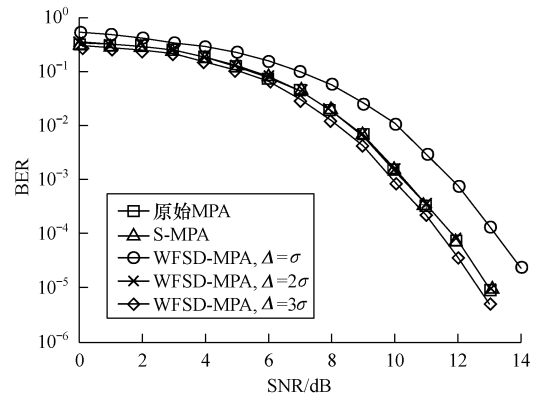


图5 BER 对比

4.2 收敛性能对比

图6显示了原始 MPA、S-MPA 与本文算法在信噪比为 10 dB 情况下的收敛性能表现情况。由图6可知,由于权重因子的作用,WFSD-MPA 收敛速度较快,原始 MPA 一般6次迭代后趋于稳定,而 WFSD-MPA 在 $\Delta = 3\sigma$ 时只需要大约4次就能达到最佳性能。其中,收敛速度最快的是 S-MPA,由于该算法采用串行策略,可以把刚更新过的消息立即传递给后面的更新节点,在每次迭代中更加充分利用最新的消息,从而达到最快的收敛速度。由于都能最终利用所有的消息,因此该算法与原始 MPA 在 BER 性能上最终会趋于相同值。

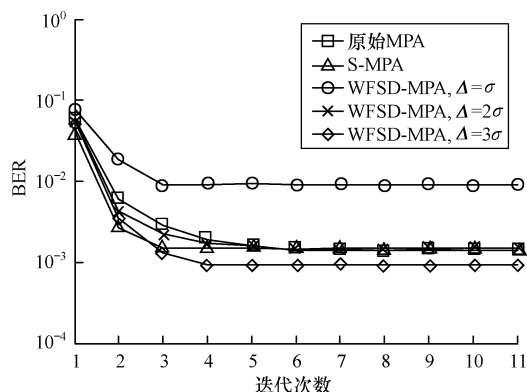


图 6 收敛性能对比

4.3 复杂度对比

分别以 0 dB、6 dB、12 dB 为例,利用柱状描述 S-MPA 算法以及本文算法在加法运算和乘法运算上的比率,如图 7 所示。可以看出,无论是加法运算还是乘法运算,WFSD-MPA 和 S-MPA 与原始 MPA 相比都有较低的复杂度,而且本文提出的 WFSD-MPA 算法复杂度随着信噪比的增加而降低,但是 S-MPA 的复杂度会随着信噪比的增加而缓慢增长。在高信噪比的情况下,当搜索半径 $\Delta = 2\sigma$ 时,WFSD-MPA 检测算法乘法运算复杂度降低 86.6%,加法运算复杂度降低 76.5%。尽管 S-MPA 算法的收敛性能优于其他算法,但是在综合考虑到复杂度和检测性能 2 个方面时,S-MPA 性能仍不及本文提出的 WFSD-MPA 算法。因此,考虑到计算复杂度和 BER 性能,设定搜索半径 $\Delta = 2\sigma$ 是一个比较好的方案。

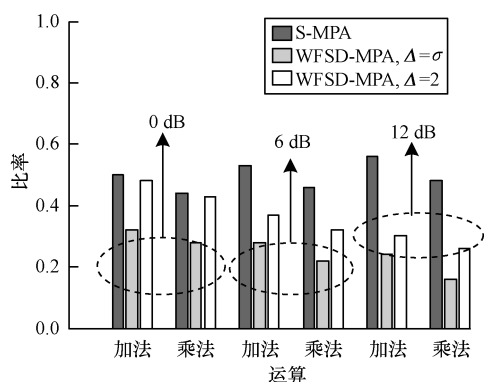


图 7 复杂度对比

5 结束语

本文提出 WFSD-MPA 检测算法,通过减小译码时叠加码字星座点搜索范围,并且引入权重因子改变搜索范围内叠加码字星座点的初始概率,不仅降低了复杂度,而且加快了迭代过程收敛时间。此外,通过选择合适参数 Δ ,可以动态实现复杂度和系统性能之间的折中。SCMA 作为一种极具竞争力的 5G 候选多址接入方案,与其他关键技术的融合必不可少。因此,将其与大规模 MIMO 融合以提升用户

接入能力,并与超密集组网和全频谱接入融合以提升频谱效率,将是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 郭小波,李松涛,张德贤.基于联合退避-功率感知机制的物联网节点信息防碰撞算法[J].计算机工程,2017,43(6):46-52.
- [2] 毕奇,梁林,杨珊,等.面向 5G 的非正交多址接入技术[J].电信科学,2015,31(5):14-21.
- [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.
- [4] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse code multiple access[C]//Proceedings of the 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013:332-336.
- [5] TAHERZADEH M, NIKOPOUR H, BAYESTEH A, et al. SCMA codebook design[C]//Proceedings of the 80th Vehicular Technology Conference. Vancouver, Canada: [s. n.], 2014:1-5.
- [6] 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.
- [7] 毕文平,徐修强,高原,等.超蜂窝网络柔性覆盖与控制[J].中国科学:信息科学,2017,47(5):544-559.
- [8] CHENG M, WU Y, LI Y, et al. PHY abstraction and system evaluation for SCMA with UL grant-free transmission[C]//Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2017:1-5.
- [9] YU Lisu, LEI Xianfu, FAN Pingzhi, et al. An optimized design of SCMA codebook based on star-QAM signaling constellations[C]//Proceedings of International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015:1-5.
- [10] 梁燕,余贝,童开蒙.高斯信道下 SCMA 简易码本设计[J].计算机应用研究,2016,34(9):2744-2747.
- [11] 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.
- [12] 宋春雪,文萍,张学晨.基于 5G 无线通信的稀疏码多址接入系统的 FPGA 实现[J].电子技术应用,2016,42(7):8-12.
- [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):1693-1888.
- [14] WEI F, CHEN W. A low complexity SCMA decoder based on list sphere decoding[C]//Proceedings of 2016 IEEE Global Communications Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2017:1-5.
- [15] YANG Lin, MA Xinying, SIU Yunming. Low complexity MPA detector based on sphere decoding for SCMA[C]//Proceedings of IEEE Communications Letters, 2017, 21(8):1855-1858.