

基于改善差分进化算法的功率不平衡码本构造

杨 锐

西华大学理学院, 四川 成都

收稿日期: 2023年2月21日; 录用日期: 2023年3月20日; 发布日期: 2023年3月27日

摘 要

在稀疏码多址接入(Sparse code multiple access, SCMA)系统中, 码本构造和多用户检测是提升误码率(bit error rate, BER)性能的关键因素。由于用户码本间的功率不平衡可以增加远近效应, 减少接收端用户间的干扰, 提升多用户检测的性能, 因此我们基于改善的差分进化算法, 固定最小乘积距离的取值区间, 以最大化最小欧氏距离为目标, 构造一种同时适用于高斯信道和下行瑞利衰落信道的功率不平衡码本。仿真结果显示, 所提码本与现有差分进化码本相比, 在高斯信道下, 当BER = 10^{-5} 时, 信噪比提升了约0.3 dB; 在下行瑞利衰落信道下, 当BER = 10^{-4} 时, 也提升了约1.0 dB。因此, 所提方案构造的码本是一种性能较优的功率不平衡码本。

关键词

稀疏码多址接入, 码本构造, 功率不平衡, 差分进化

Power Imbalance Codebook Construction Based on Improved Differential Evolution Algorithm

Rui Yang

School of Science, Xihua University, Chengdu Sichuan

Received: Feb. 21st, 2023; accepted: Mar. 20th, 2023; published: Mar. 27th, 2023

Abstract

In sparse code multiple access systems, codebook construction and multi-user detection are key factors to improve bit error rate (BER) performance. Since the power imbalance between user codebooks can increase the near far effect, reduce the interference between users at the receiving

end, and improve the performance of multi-user detection, based on the improved differential evolution algorithm, we fixed the value range of the minimum product distance, with the goal of maximizing the minimum Euclidean distance, and constructed a power imbalance codebook that is applicable to both the Gaussian channel and the downlink Rayleigh fading channel. The simulation results show that the SNR of the proposed codebook is improved by about 0.3 dB when BER = 10^{-5} in the Gaussian channel compared with the existing differential evolution codebook; In the downlink Rayleigh fading channel, when BER = 10^{-4} , it also increases about 1.0 dB. Therefore, the codebook designed by the proposed scheme is a power imbalance codebook with better performance.

Keywords

Sparse Code Multiple Access, Codebook Design, Power Imbalance, Differential Evolution

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

第五代移动通信以及未来无线通信中, 需要满足大规模用户接入以及高频谱利用率等要求[1]。相较于正交多址接入技术, 非正交多址接入(Non-orthogonal multiple access, NOMA)技术有其一定的优越性[2][3]。而目前 SCMA 作为 NOMA 的一种标志性技术[4], 在全世界被广泛学习与研究。对于多用户检测部分, 由于码本中码字的稀疏性, 可以在接收端使用消息传递算法(message passing algorithm, MPA)检测[5]。由于 SCMA 系统将用户传输的比特信息直接映射到用户的多维码本, 因此用户码本的构造也决定了基于 SCMA 的 NOMA 系统的性能。在 SCMA 系统中, 码本的构造对于降低系统的误码率性能有很大影响。大多数现有的码本构造方案都是从多维复母码本开始构造的, 这些母码本具有大的最小欧氏距离或大的最小乘积距离[6][7], 然后经过星座算子与扩频矩阵得到用户的码本。但是现有码本的构造很多都是基于单信道进行优化的[8][9], 多信道下的码本研究还比较少。

在文献[10]中提出了一种将码本构造参数化, 然后使用差分进化算法, 以误符号率(Signal error rate, SER)为目标函数来进行优化的方案; 文献[11]提出了一种功率不平衡码本设计方案, 该方案是基于星型星座的结构并借助遗传算法优化, 其 BER 性能在高斯信道和瑞利衰落信道下都有较好的表现。因为该码本在下行链路传输的不同用户之间具有功率差异; 文献[12]提出一种低复杂性的功率不平衡码本构造方案, 在高斯信道下, 系统的 BER 性能有所提升。从以上文献看出码本构造可以利用用户间的功率不平衡(功率域 NOMA 的一个独特特性), 以此来实现增强 MPA 解码。

本文在功率不平衡 SCMA 码本构造的理念上, 借助改善的差分进化算法去构造一种新型的功率不平衡码本, 使它同时适用于高斯信道与下行瑞利衰落信道。仿真结果显示, 所提功率不平衡码本的 BER 性能在两种信道下都有一定的提升。

2. 预备知识

2.1. SCMA 模型

假定在下行 SCMA 系统中, 有 J 个用户节点共享 K 个时频资源节点, 并由同一个基站传输信息。SCMA 系统在编码时, 将传入的 $\log_2 M$ 个二进制信息比特直接映射到用户的复码本, 编码成一个 K 维复码字,

M 为码本的大小。这个映射关系表示为 $f_j: \mathbb{B}^{\log_2 M} \rightarrow \mathbf{x}_j \in \mathbb{C}^K$, $|\mathbf{x}_j| = M$ 。所有用户传输的码字在资源节点上叠加,并由资源节点承载这些信息通过信道传到接收端检测器。用 N 表示每个用户节点占用的资源节点数,即码字中的非零元素个数。 $N \ll K$, 保证其码字的稀疏性,减少用户间的信息干扰,方便接收端更好的进行多用户检测。以 $K = 4, M = 4, N = 2$ 的小规模系统为例,它的简化编码原理图如图 1:

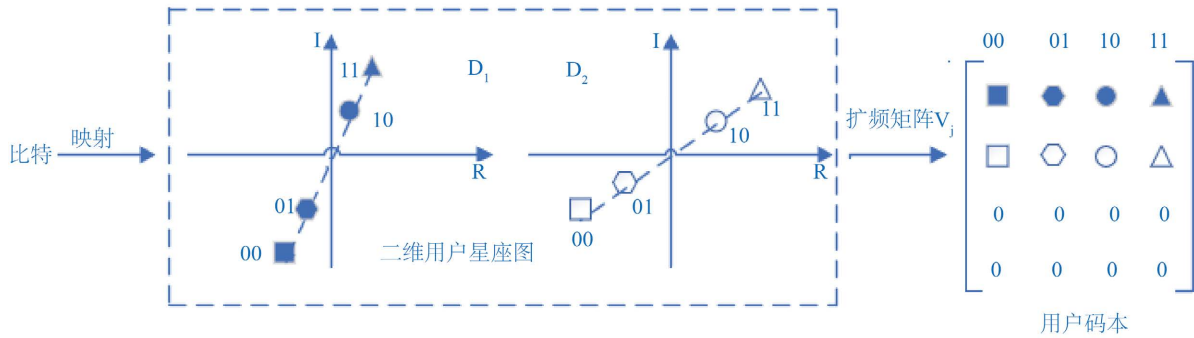


Figure 1. Simplified coding schematic diagram

图 1. 简化编码原理图

这个小规模系统用户节点和资源节点的关系可以由如下因子矩阵 F 表示:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

其中 $F = (f_1, f_2, \dots, f_J)$, $f_j = \text{diag}(V_j V_j^T)$ 。 V_j 表示第 j 个用户的扩频矩阵, 当且仅当 $F_{k,j} = 1$ 时, 用户 j 占用第 k 个资源节点。行重 d_j 表示占用同一个资源节点的有效用户数目, 此时 $d_j = 3$ 。

2.2. 差分进化算法

差分进化算法(Differential Evolution, DE)是一种智能优化算法。在 DE 迭代过程前[10], 先随机生成 S 个初始物种作为父代, 用向量组 $\mathbf{p}_i, i = 1, 2, \dots, S$ 表示, 每个物种内都有 D 个个体, 即每个向量的长度。然后迭代过程中, 它们的子代是由突变、交叉与选择三步来迭代生成的, 其中突变过程可以表示为:

$$\mathbf{u}_i^G = \mathbf{p}_1 + m(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_3) \tag{1}$$

这里的 $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3$ 为父代物种中随机选择的不同的三个物种, m 为变异因子, G 为迭代次数。

$$\mathbf{u}_{i,j}^G = \begin{cases} \mathbf{u}_{i,j}^G, & \text{if } r \leq C_r \text{ or } j = j_{\text{rand}} \\ \mathbf{p}_{i,j}^G, & \text{其他} \end{cases} \tag{2}$$

式(2)是一个交叉的过程。这里 C_r 表示的是交叉概率因子, r 为 $[0, 1]$ 中随机生成的数, j_{rand} 为 $[1, D]$ 中随机选择的数, 确保每一次迭代每个物种中至少有一个分量发生改变, 为下一次迭代生成一个新的父代。最后就是选择过程如下, 根据适应度函数, 选择表现较好的物种及个体。

$$\mathbf{p}_i^{G+1} = \begin{cases} \mathbf{u}_i^G, & \text{if } f(\mathbf{u}_i^G) \geq f(\mathbf{p}_i^G) \\ \mathbf{p}_i^G, & \text{其他} \end{cases} \tag{3}$$

这里的 $f(\cdot)$ 表示的目标函数。

2.3. 关键性能指标

SCMA 系统的性能与其码本构造的优劣有关，而码本的构造可以转化为一个星座图的设计。在文献 [13] [14]中提到的多维星座设计的一些关键性能指标，若 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_M)$, $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_M)$ 为两个码字向量，那么这两个码字向量的最小欧氏距离 (Minimum Euclidean Distance, MED) 表示为 $d_{E,\min} = \min \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|$ ，最小乘积距离 (Minimum Product Distance, MPD) 可以表示为 $d_{P,\min} = \min \prod |x_i - y_i| (x_i \neq y_i)$ 。在高斯信道中，叠加码字集的最小欧氏距离是码本优劣的主要指标，而在瑞利衰落信道中，各码本中码字间的最小乘积距离为码本优劣的主要指标。

3. 码本构造

3.1. 母码本构造

由于用户码本之间存在功率差异，可以增加远近效应，使得不同用户发送的信息差异性增大，降低了接收端用户间的干扰，从而降低接收端 MPA 检测的复杂度。基于此我们可以构造一种功率不平衡码本来提升 SCMA 系统性能。我们以上面的小系统为例，基于现有的功率不平衡码本 [11]，在其内外圆上分别赋予一个角度值，增加其取值灵活性，这样可以构造一种如下的新二维复母码本：

$$MC = \begin{bmatrix} r_2 e^{i\varphi_2}, r_1 e^{i\varphi_1}, -r_1 e^{i\varphi_1}, -r_2 e^{i\varphi_2} \\ -r_1 e^{i\varphi_1}, r_2 e^{i\varphi_2}, -r_2 e^{i\varphi_2}, r_1 e^{i\varphi_1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

我们令 $r_1 = 1, r_2 > 1$ ， φ_1, φ_2 为任意值。这个母码本总的能量为 $\|MC\|^2 = 4(r_1^2 + r_2^2)$ ，因为它两个维度的能量一样，因此母码本每一个维度的能量都是 $E_{MC} = 2(r_1^2 + r_2^2)$ 。

我们需要给予同一资源节点上的不同用户之间不同的功率分配，再通过扩频矩阵得到不同用户的码本，使得不同用户码本之间存在功率差异。以 $K = 4, J = 6, M = 4$ 为例，我们假设每个码字的平均功率为 1，得到每个资源节点的总功率 $E = JM/K$ ，即 $E = 6$ 。因为每个资源节点上的有效用户数为 $d_f = 3$ ，若每个用户分得的功率用 $E_j, j = 1, 2, 3$ 来表示，则 $E_1 + E_2 + E_3 = 6$ ，其中 $E_j = E_{MC} \cdot \|\Delta_j\|^2, \Delta_j = \omega_j e^{i\theta_j}, j = 1, 2, 3$ 。

基于此功率分配方案再结合文献 [11] 提出的不同于拉丁结构的矩阵，构造一种签名矩阵，此矩阵可以更好的实现用户间的功率不平衡，该签名矩阵如下：

$$G = \begin{bmatrix} \Delta_2 & \Delta_1 & \Delta_3 & 0 & 0 & 0 \\ \Delta_2 & 0 & 0 & \Delta_3 & \Delta_1 & 0 \\ 0 & \Delta_3 & 0 & \Delta_1 & 0 & \Delta_2 \\ 0 & 0 & \Delta_1 & 0 & \Delta_3 & \Delta_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.2. 用户码本

用 $Z_j = \text{diag}(c_j)$ 表示用户 j 的星座算子，其中 c_j 表示 G 中去除 0 元素的第 j 列，则用户码本可以由母码本结合星座算子与扩频矩阵来生成： $H_j = V_j \cdot Z_j \cdot MC, j = 1, 2, \dots, 6$ 。据此用户 1 的码本可以表示为：

$$H_1 = \begin{bmatrix} r_2 e^{i\varphi_2} \omega_2 e^{i\theta_2} & e^{i\varphi_1} \omega_2 e^{i\theta_2} & -e^{i\varphi_1} \omega_2 e^{i\theta_2} & -r_2 e^{i\varphi_2} \omega_2 e^{i\theta_2} \\ -e^{i\varphi_1} \omega_2 e^{i\theta_2} & r_2 e^{i\varphi_2} \omega_2 e^{i\theta_2} & -r_2 e^{i\varphi_2} \omega_2 e^{i\theta_2} & e^{i\varphi_1} \omega_2 e^{i\theta_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其他用户码本也可由此获得。

3.3. 优化模型

用户之间功率分配方案的不同,可能会导致叠加码字集的最小欧氏距离有所不同,进而影响 BER 性能。因此我们可以以最大化最小欧氏距离和最大化最小乘积距离为目标来优化功率分配方案,此功率不平衡码本的构造过程就可以转化为一个参数优化过程。以前面小规模系统为例,这个优化模型可以表示为:

$$\begin{cases} \max & d_{E,\min}(r_2, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\omega}) \\ \text{s.t.} & d_{P,\min}(r_2, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\omega}) \geq \alpha, \\ & r_2 > 1, \\ & E_1 + E_2 + E_3 = 6, \\ & 0 \leq \varphi_1, \varphi_2, \theta_i \leq 2\pi, \forall i = 1, 2, 3. \\ & \omega_i \in \mathbb{R}, \forall i = 1, 2, 3. \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\boldsymbol{\theta} = (\varphi_1, \varphi_2, \theta_1, \theta_2, \theta_3)$, $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ 。

4. 仿真结果分析

根据文献[10] [15], 设置初始物种数 $S = 50$, 每个物种含有 $D = 9$ (参数个数)个个体。目前大多数使用的差分进化算法, 在迭代过程中其交叉概率因子与突变因子始终是不变的, 容易导致物种个体多样性丧失, 从而引发物种早熟, 无法寻找到更精确的解。在此我们将差分进化算法中的交叉概率因子设置为固定值 $C_r = 0.95$ 的同时, 为了增加物种多样性, 将突变因子改变为随迭代次数而变化的 $m = 0.2 \times 3^{(t_{\max}-t)/(t_{\max}-1)}$ 。当搜索到部分最优解时, 我们将在其附近进行精细搜索, 最终将优化结果的精确度提高。这里的 $f(\cdot)$ 表示的是目标函数(归一化最小欧氏距离)。

基于我们所要比较码本的 MPD, 我们设置优化模型中的 $\alpha = 0.55$ 。图 2 显示的是功率不平衡码本在改善的差分进化算法下 MED 随迭代次数的变化曲线。我们取最大迭代次数 $I_{\max} = 100$, 经过大约 30 次迭代 MED 达到了稳定值 1.1558。

经改善差分进化算法的参数优化, 当 MED 达到 1.1558 时, 其参数值 $\varphi_1 = 0.355$, $\varphi_2 = -0.300$, $r_2 = 2.652$, $E_1 = 3.33$, $E_2 = 1.79$, $E_3 = 0.88$ 。

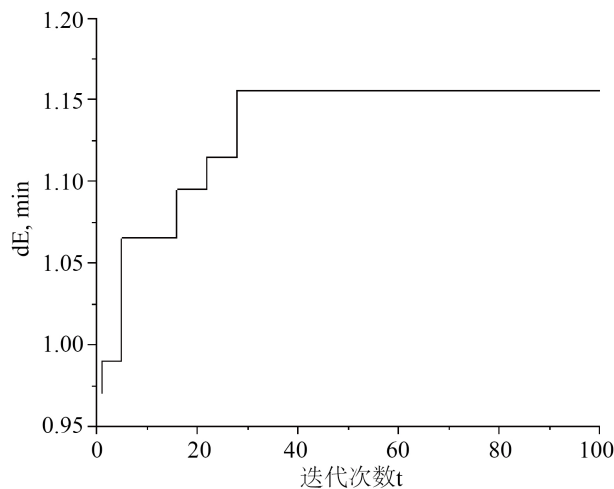


Figure 2. Optimization result chart
图 2. 优化结果图

本节中，我们所提码本将与 DE 码本[10]、PI 码本[11]和 LC 码本[12]进行 BER 性能比较。表 1 显示了不同码本一些关键指标的比较，此时每个用户码本中码字的平均功率为 1。

Table 1. Table of key indicators

表 1. 关键指标表

码本	功率不平衡	MED	MPD
DE [10]	否	0.9424	0.4832
PI [11]	是	1.1387	0.5492
LC [12]	是	1.0954	0
prop	是	1.1558	0.7300

由表 1 可知，我们所提码本的最小欧氏距离比 DE 码本高 0.2143、比 PI 码本高 0.0171、比 LC 码本高 0.0604；其最小乘积距离也是略高于其他码本。这也是所提码本在两种不同信道下表现较其他码本略优的主要原因。

Table 2. Simulation parameter table

表 2. 仿真参数表

参数	取值
资源节点数 K	4
用户数 J	6
码本大小 M	4
有效用户数 d_f	3
传输信息量	1e5
迭代次数	6
信道	高斯、瑞利衰落信道

当仿真参数如上表 2 所示时，其仿真结果如下：

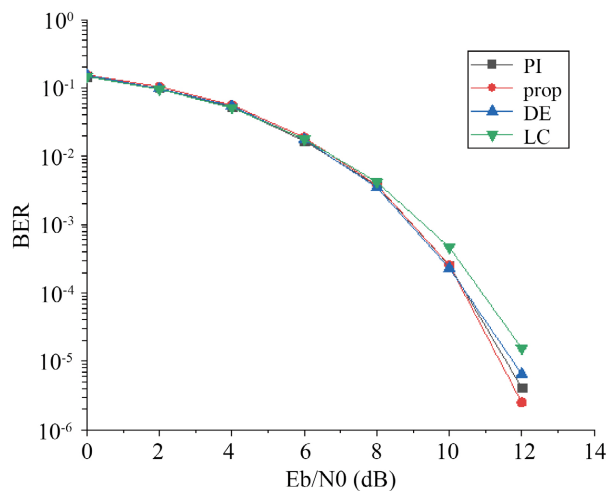


Figure 3. BER comparison of different codebooks in Gaussian channel

图 3. 高斯信道下，不同码本 BER 比较

图3显示了在高斯信道下,当 $BER = 10^{-5}$ 时,所提功率不平衡码本的信噪比比PI码本提升了约0.15 dB,比DE码本提升了约0.3 dB,比LC码本提升了约0.8 dB。主要原因是因为所提码本拥有比其他码本更大的最小欧氏距离。

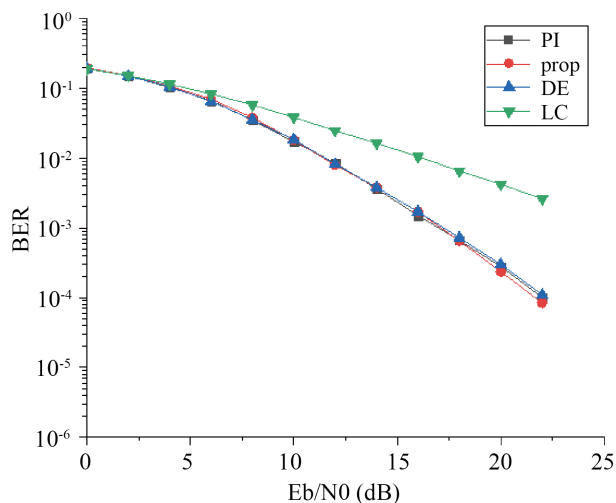


Figure 4. BER comparison of different codebooks in Rayleigh channel

图4. 瑞利信道下,不同码本 BER 比较

图4显示了在瑞利衰落信道下,所提码本的BER性能略优于其它码本,特别是在高信噪比条件下。当 $BER = 10^{-4}$ 时,所提功率不平衡码本的信噪比比PI码本提升了0.7 dB,比DE码本提升了1.0 dB。明显优于LC码本。所提码本在该信道下相较于其他码本有较好的BER性能提升,是因为它拥有比其它码本略大的最小欧氏距离与最小乘积距离。

5. 结论

本文基于改善的差分进化算法,提出一种在不同用户之间存在功率差异的新码本。仿真结果显示,在两种信道下,所提码本较已有码本都有较好的性能提升。在高斯信道下,当 $BER = 10^{-5}$ 时,所提码本的信噪比较已有码本提升了至少约0.15 dB;在下行瑞利衰落信道下,当 $BER = 10^{-4}$ 时,所提码本的信噪比较已有码本提升了至少约0.7 dB。其主要内因是用户间存在的功率差异能增加远近效应,使得接收端MPA检测时用户之间的相互干扰减弱,提升MPA解码;外因是拥有相对较大的MED和MPD,从而提高了误码率性能。

参考文献

- [1] Osseiran, A., Boccardi, F., Braun, V., et al. (2014) Scenarios for 5G Mobile and Wireless Communications: The Vision of the METIS Project. *IEEE Communications Magazine*, **52**, 26-35. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6815890>
- [2] Ding, Z.G., Liu, Y.W., Choi, J., et al. (2017) Application of Non-Orthogonal Multiple Access in LTE and 5G Networks. *IEEE Communications Magazine*, **55**, 185-191. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1500657CM>
- [3] Yang, C.C., Yao, Y., Chen, Z.Y. and Xia, B. (2016) Analysis on Cache-Enabled Wireless Heterogeneous Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **15**, 131-145. <https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2468220>
- [4] Nikopour, H. and Baligh, H. (2013) Sparse Code Multiple Access. *Proceedings of the 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, London, 8-11 September 2013,

- 332-336. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2013.6666156>
- [5] Ghaffari, A., Leonardon, M., Savaria, Y., Jego, C. and Leroux, C. (2017) Improving Performance of SCMA MPA Decoders Using Estimation of Conditional Probabilities. 2017 *15th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS)*. Strasbourg, 25-28 June 2017, 21-24. <https://doi.org/10.1109/NEWCAS.2017.8010095>
- [6] Taherzadeh, M., Nikopour, H., Bayesteh, A. and Baligh, H. (2014) SCMA Codebook Design. 2014 *IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall)*. Vancouver, 14-17 September 2014, 1-5. <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2014.6966170>
- [7] Boutros, J., Viterbo, E., Rastello, C. and Belfiore, J.-C. (1996) Good Lattice Constellations for Both Rayleigh Fading and Gaussian Channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, **42**, 502-518. <https://doi.org/10.1109/18.485720>
- [8] Mheich, Z., Wen, L., Xiao, P. and Maaref, A. (2019) Design of SCMA Codebooks Based on Golden Angle Modulation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **68**, 1501-1509. <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2886953>
- [9] Chen, Y.-M. and Chen, J.-W. (2020) On the Design of Near-Optimal Sparse Code Multiple Access Codebooks. *IEEE Transactions on Communications*, **68**, 2950-2962. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.2974213>
- [10] Deka, K., Priyadarsini, M., Sharma, S. and Beferull-Lozano, B. (2020) Design of SCMA Codebooks using Differential Evolution. 2020 *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, Dublin, 7-11 June 2020, 1-7. <https://doi.org/10.1109/ICCWorkshops49005.2020.9145202>
- [11] Li, X.D., Gao, Z.C., Gui, Y.M., *et al.* (2021) Design of Power-Imbalanced SCMA Codebook. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **71**, 2140-2145. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3132698>
- [12] Zheng, Y., Xin, J.T., Wang, H., Zhang, S. and Qiao, Y. (2022) A Low-Complexity Codebook Design Scheme for SCMA Systems Over an AWGN Channel. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **71**, 8675-8688. <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3175540>
- [13] Boutros, J. and Viterbo, E. (1998) Signal Space Diversity: A Power- and Bandwidth-Efficient Diversity Technique for the Rayleigh Fading Channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, **44**, 1453-1467. <https://doi.org/10.1109/18.681321>
- [14] Vameghestah, M., Marsland, I.D., Gohary, R.H. and Yanikomeroglu, H. (2019) Multidimensional Constellations for Uplink SCMA System—A Comparative Study. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **21**, 2169-2194. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2910569>
- [15] Zaharie, D. (2002) Critical Values for the Control Parameters of Differential Evolution Algorithms. *Proceedings of 8th International Mendel Conference on Soft Computing*, Brno, 5-7 June 2002, 62-67.