

高斯信道下功率不平衡SCMA码本设计

高志成, 李旭东

西华大学理学院, 四川 成都
Email: 1447152594@qq.com

收稿日期: 2021年3月15日; 录用日期: 2021年4月3日; 发布日期: 2021年4月19日

摘要

稀疏码分多址(SCMA)是一种基于码域的新型非正交多址接入技术, 其将调制与稀疏扩频结合在一起, 有效提高了系统的频谱效率。本文根据Latin结构提出了一种新型的功率不平衡码本, 在不同码本之间、同一码本的不同维度之间均引入功率差异, 极大提高了码本功率的多样性, 并通过遗传算法优化参数, 增大组合星座点间的最小欧式距离, 仿真结果表明提出的码本在高斯信道下误码率性能较以往码本有明显改善。

关键词

稀疏码分多址, Latin结构, 高斯信道, 功率差异

Design of Power Imbalance SCMA Codebook in Gaussian Channel

Zhicheng Gao, Xudong Li

School of Science, Xihua University, Chengdu Sichuan
Email: 1447152594@qq.com

Received: Mar. 15th, 2021; accepted: Apr. 3rd, 2021; published: Apr. 19th, 2021

Abstract

Sparse Code Division Multiple Access (SCMA) is a new non-orthogonal multiple access technology based on code domain. It combines modulation with sparse spread spectrum to effectively improve the spectral efficiency of the system. Based on the Latin structure, this paper puts forward a new type of power imbalance code book, which introduces power differences between different codebooks and between different dimensions of the same codebook, greatly improving the diversity of codebook power. The parameters are optimized by genetic algorithm, and the minimum

Euclidean distance between combined constellation points is increased. Simulation results show that the bit error rate performance of the proposed codebook in Gaussian channel is improved compared with that of the previous codebook.

Keywords

Sparse Code Division Multiple Access, Latin Structure, Gaussian Channel, Power Imbalance

Copyright © 2021 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

为了进一步满足 5G (The Fifth Generation Mobile Communication System, 5G)及其下一代无线通信高频谱利用率、低时延以及海量接入的要求,一种新型的非正交多址接入技术(NOMA)被提出[1]。SCMA 作为 NOMA 中一种典型的码域复用的方案[2],受低密度扩频(LDS, low density signature)序列技术以及多载波码分多址接入(CDMA)的启发[3],其将调制与扩频结合在一起,直接将用户发送的比特信息映射为用户码本中的码字,获得了多维星座的成形增益,其性能优于 LDS。不同的用户被分配不同的码本,各码本之间并不正交,从而实现非正交多址接入以及系统过载的目的。

SCMA 包含码本设计以及 MPA 检测两部分,其中码本设计对于 MPA 检测的复杂性以及 SCMA 系统的性能具有重要的影响。针对于码本设计,至今仍没有最优的方案,以往文献通常会选择一些次优的方案来完成 SCMA 码本设计。文献[4]对格星座进行旋转得到多维母星座,再通过各用户独特的星座操作生成各用户码本,这种次优的分阶段设计思路也为广大学者所接受,同时该文献指出来码本设计的若干准则,包括最大化最小欧氏距离,最大化最小乘积距离以及功率差异化。文献[5]首次提出一种基于 Star-QAM 的码本结构,以最大化最小欧氏距离为准则设计多维母星座,进而得到各用户码本,误码率性能相较于其他码本有明显的提升。文献[6]对低维度星座进行旋转生成高维度星座,然后对偶数维度进行交织以对抗信道衰落,从而生成用户的多维母星座。文献[7]则是针对上行瑞利信道设计 SCMA 码本,通过将 SCMA 系统等效为 MIMO 系统,以最大化系统截止概率为准则设计码本,生成的码本在瑞利信道下有很好的表现。文献[8]基于最大化和速率的准则设计单个资源块上一维复码字,再借助 Latin 结构生成各用户的码本。

在高斯信道下,最大化星座点间最小欧氏距离对码本误码率具有很重要的影响。文献[9]跳过设计母星座的步骤,通过提高码本设计的自由度来得到性能更好的码本,并采用遗传算法对设计参数进行优化,达到最大化星座点间最小欧氏距离的目的。这种设计灵活度较高,但是待优化参数也较多,增加了优化的难度;另外码本不同维度之间没有功率差异,很多文献表明存在功率差异的码本能增加资源块上星座点间的远近效应,从而提高 MPA 接收机的性能[4] [5]。本文提出一种新型的码本结构。在不同码本之间、相同码本的不同维度之间以及码字元素之间引入功率差异,以最大化最小欧氏距离为目标并通过遗传算法对设计参数进行优化,仿真结果表明在高斯信道下系统的误码率性能有明显改善。

2. SCMA 系统与码本设计

2.1. SCMA 系统简介

考虑 J 个用户在 K 个正交资源块上传输信息的下行 SCMA 通信系统($J > K$),其系统过载率为

$\lambda = J/K$ 。在发送端, SCMA 编码器将用户 j 的 $\log_2(M)$ 信息比特数据映射为码本 \mathbf{X}_j 中的某个 K 维复稀疏码字 $\mathbf{x}_j = [x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{Kj}]^T$, 其中 $M = |\mathbf{X}_j|$ 表示码本的大小, 每个码字具有 N ($N < K$) 个非零元素。SCMA 编码器的工作步骤可分为调制与稀疏扩频两部分。首先通过星座映射函数 g_j 将用户 j 发送的比特数据 \mathbf{b}_j 映射为 N 维复星座点, 星座大小为 M ; 其次通过扩频矩阵 \mathbf{V}_j 将 N 维星座点映射到码本 \mathbf{X}_j 中的 K 维复稀疏码字 \mathbf{x}_j , 最后用户 j 的码字可以表示为 $\mathbf{x}_j = \mathbf{V}_j g_j(\mathbf{b}_j)$ 。

在传输过程中, J 个用户码字叠加在 K 个正交资源块上。经过同步之后, 接收信号 $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_k)$ 可以表示为:

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

其中 $\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_k]^T$ 表示信道衰落向量, $h_k \sim \mathcal{CN}(0, 1)$, $\text{diag}(\cdot)$ 表示矩阵对角化运算, $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(0, N_0 \mathbf{I})$ 表示环境噪声。

2.2. 经典的 SCMA 码本设计理论

对于给定结构 $\zeta(\mathbf{V}, \mathbf{G}; J, M, N, K)$, 其中 $\mathbf{V} := [\mathbf{V}_j]_{j=1}^J$, $\mathbf{G} := [g_j]_{j=1}^J$, SCMA 码本设计问题可以定义为:

$$\mathbf{V}^*, \mathbf{G}^* = \arg \max_{\mathbf{V}, \mathbf{G}} m(\zeta(\mathbf{V}, \mathbf{G}; J, M, K, N)) \quad (2)$$

其中, m 是给定的设计准则。该多维问题最优解迄今为止仍是一个开放的课题, 一种次优的方法是将映射矩阵 $\mathbf{V} := [\mathbf{V}_j]_{j=1}^J$ 和星座函数集 $\mathbf{G} := [g_j]_{j=1}^J$ 分开设计。映射矩阵设计只是简单的排列组合问题, 故可将码本优化重点放在星座函数集的设计。

在 SCMA 系统中, 每个用户都有其独特的码本, 这意味着在设计码本时需要生成 J 个不同的星座, 该过程较为繁琐。很多文献一般先设计一个母星座, 然后通过母星座进行用户的特定星座算符运算, 进而生成每个用户独特的码本, 即: $g_j \equiv (\Delta_j)g, \forall j$, 其中 Δ_j 表示星座算符, g 表示母星座生成函数。SCMA 码本设计问题可以简化为:

$$g^*, [\Delta_j^*]_{j=1}^J = \arg \max_{g, [\Delta_j]_{j=1}^J} m(\zeta(\mathbf{V}^+, [\Delta_j g]_{j=1}^J; J, M, K, N)) \quad (3)$$

一般的设计准则包含最大化最小欧式距离以及最大化最小乘积距离, 另外码字间的功率差异可以增加各资源块复用层上的远近效应, 使得 MPA 在检测时拥有更好的表现。

3. 高斯信道码本优化设计

从传统的码本设计过程, 我们可以看出母星座的设计对于 SCMA 系统性能具有重要的作用, 为了增大母星座最小欧式距离以及降低峰均功率比, 我们采用 $N = 2$ 维母星座结构如下:

$$MC = \begin{pmatrix} \alpha_{M/2}, \dots, \alpha_{M/4+1}, \alpha_{M/4}, \dots, 1, -1, \dots, -\alpha_{M/4}, -\alpha_{M/4+1}, \dots, -\alpha_{M/2} \\ -1, \dots, -\alpha_{M/4}, \alpha_{M/4+1}, \dots, \alpha_{M/2}, -\alpha_{M/2}, \dots, -\alpha_{M/4+1}, \alpha_{M/4}, \dots, 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中 M 表示码本大小。

本文用到的扩频矩阵是基于文献[10]提出的 Latin 结构, Latin 结构是指矩阵中每行及每列的非零元素都是独一无二的。不同于以往文献, 本文通过对资源块上不同旋转角度赋予不同功率维度, 使得同一资源块的干扰用户层功率具有差异, 从而增大星座点间最小欧式距离, 提高 MPA 接收机的性能。对于 $K = 4, J = 6$ 的经典 SCMA 码本结构来说,

$$MC = \begin{pmatrix} \alpha & 1 & -1 & -\alpha \\ -1 & \alpha & -\alpha & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

从母星座可以看出, 每一维度的功率都为 $2(1+\alpha^2)$ 。同时扩频矩阵 S 如下所示:

$$S = \begin{pmatrix} 0 & A_2 e^{j\pi\varphi_2} & A_1 e^{j\pi\varphi_1} & 0 & A_3 e^{j\pi\varphi_3} & 0 \\ A_1 e^{j\pi\varphi_1} & 0 & A_2 e^{j\pi\varphi_2} & 0 & 0 & A_3 e^{j\pi\varphi_3} \\ 0 & A_3 e^{j\pi\varphi_3} & 0 & A_2 e^{j\pi\varphi_2} & 0 & A_1 e^{j\pi\varphi_1} \\ A_2 e^{j\pi\varphi_2} & 0 & 0 & A_3 e^{j\pi\varphi_3} & A_1 e^{j\pi\varphi_1} & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\text{其中 } A_1 = \sqrt{\frac{E_1}{2(1+\alpha^2)}}, \quad A_2 = \sqrt{\frac{E_2}{2(1+\alpha^2)}}, \quad A_3 = \sqrt{\frac{E_3}{2(1+\alpha^2)}}。$$

从扩频矩阵可以看出, 用户 1 的星座操作 $\Delta_1 = \begin{pmatrix} A_1 e^{j\varphi_1} & 0 \\ 0 & A_2 e^{j\varphi_2} \end{pmatrix}$ 以及映射矩阵 $\mathbf{V}_j = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T$,

那么用户 1 的码本结构可以表示为 $\chi_1 = \mathbf{V}_1 \Delta_1 \mathbf{g}$, 具体形式如下:

$$\chi_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha A_1 e^{j\pi\varphi_1} & A_1 e^{j\pi\varphi_1} & -A_1 e^{j\pi\varphi_1} & -\alpha A_1 e^{j\pi\varphi_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -A_2 e^{j\pi\varphi_2} & \alpha A_2 e^{j\pi\varphi_2} & -\alpha A_2 e^{j\pi\varphi_2} & A_2 e^{j\pi\varphi_2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

从所提出的码本结构可以看出, 不同用户的码本功率是不同的, 相同码本不同维度的功率也不相同, 我们尽可能使得功率差异尽量大, 提高 MPA 接收机的准确性。

SCMA 系统的组合星座可以表示为 $\chi = \chi_1 \oplus \chi_2 \oplus \dots \oplus \chi_J$, 其中 $\mathbf{M} \oplus \mathbf{N}$ 表示矩阵 \mathbf{M} 任意一列与矩阵 \mathbf{N} 任意一列和的空间, 对于 $J = 6$ 以及 $M = 4$ 的 SCMA 系统来说, 组合星座 χ 总共有 $M^J = 4096$ 个元素, 对

于任意 $\mathbf{x}(n) \in \chi$, 有 $\mathbf{x}(n) = \sum_{j=1}^J \mathbf{x}_j(m_j), n=1, 2, \dots, M^J$ 。那么组合星座的最小欧式距离 d_{\min} 可以表示为:

$$d_{\min} = \min \{ \|\mathbf{x}(p) - \mathbf{x}(q)\| \mid \forall p \neq q, p, q = 1, 2, \dots, M^J \} \quad (8)$$

本文提出的码本结构有 3 个功率参数 E_1, E_2 以及 E_3 , 3 个旋转角度参数 φ_1, φ_2 以及 φ_3 和母星座参数 α , 总共 7 个参数, 相比于文献[9]待优化的 17 个参数, 参数数量明显减少。

在设计完码本结构之后, 剩下的问题便是进行优化, 本文采用的设计准则是最大化组合星座点间最小欧式距离, 因此优化问题可以简化:

$$\mathbf{E}^*, \boldsymbol{\varphi}^*, \alpha^* = \arg \max_{\mathbf{E}, \boldsymbol{\varphi}, \alpha} d_{\min}(\mathbf{E}, \boldsymbol{\varphi}, \alpha; J, M, K, N) \quad (9)$$

其中 $\mathbf{E} = (E_1, E_2, E_3)$, $\boldsymbol{\varphi} = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$ 。为了便于与其它码本比较, 我们设定码本中码字平均功率 $\frac{1}{MJ} \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M |\mathbf{x}_j(m)|^2 = 1$, 那么有 $E_1 + E_2 + E_3 = 6$ 。本文采用 matlab 遗传算法工具箱进行求解, 初始种群从设定的上下界中随机取值, 种群规模设定为 100, 最大迭代次数设定为 100, 最终遗传算法求解结果如图 1 所示。遗传算法结果表明, 组合星座点间的最小欧式距离最大达到了 1.156, 优化后的参数分别为 $E_1 = 2.3356$, $E_2 = 1.2720$, $E_3 = 2.3703$, $\varphi_1 = 0.0089$, $\varphi_2 = 0.2622$, $\varphi_3 = 0.2622$, $\alpha = 1.67$ 。同时我们根据优化后的码本结构比较了不同用户在不同资源块上的功率分布如图 2 所示, 其中 U1 以及 RE1 分别表示用户 1 以及第一个资源块。从图 2 可以看出, 分配给不同用户的总功率是不一样的, 其中用户 5 以

及用户 6 分配的功率较大, 而其它用户分配的功率较小; 对于资源块来说, 每个用户在不同资源块上分配的功率也是不一样的, 其中用户 1 在资源块 2 上的功率大于在资源块 3 上分配的功率, 而用户 2 在资源块 1 上的功率是小于资源块 3 上分配的功率。

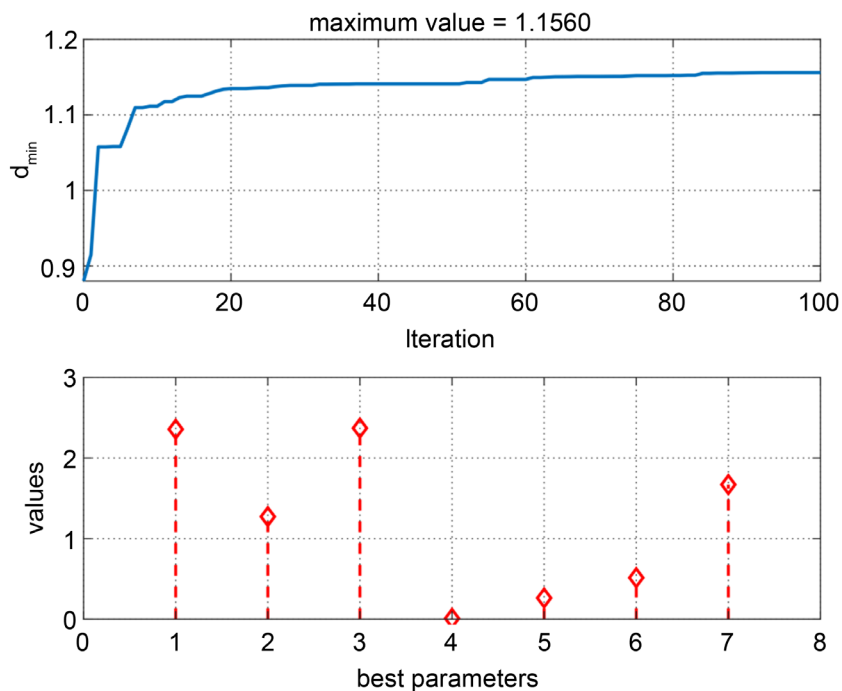


Figure 1. Optimization of genetic algorithm in Gaussian channel

图 1. 高斯信道下遗传算法优化

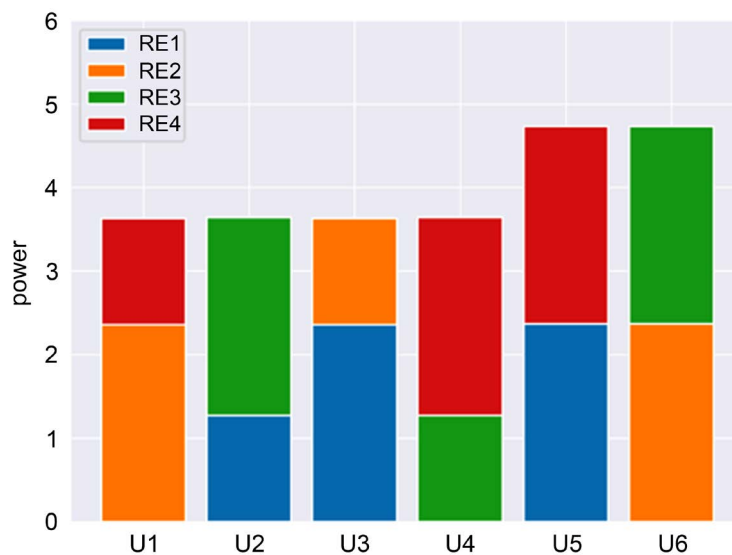


Figure 2. Power distribution of different user codebooks

图 2. 不同用户码本功率分布

4. 仿真

本文另外选取了 RotInt 码本[6]、StarQAM 码本[5]以及 GA 码本[9]进行比较, 因为 RotInt 码本和

StarQAM 码本引入了维度间功率差异并在高斯信道下有很不错的误码率性能表现, GA 码本与本文提出的码本都采用遗传算法对参数进行优化。为了便于不同码本之间比较, 这里设定码字的平均功率为 1。从表 1 可以看出, 相对于另外三个码本, 功率多样性是本文提出码本的一个显著特征, 无论是码本不同维度间的功率差异还是不同用户码本之间的功率差异。另外本文提出码本的组合星座点间的最小欧式距离达到了 1.156, 而同等条件下基于遗传算法 GA 码本的最小欧式距离为 1.0568。

Table 1. Comparison of different codebooks

表 1. 不同码本比较

	维度功率差异	码本功率差异	码字平均功率	组合星座最小欧式距离
RotInt [6]	否	否	1	0.6735
StarQAM [5]	是	否	1	0.8983
GA [9]	否	否	1	1.0568
Proposed	是	是	1	1.1560

从图 3 可以看出, 本文提出的码本的误码率性能明显优于以往文献提出的码本, 在误码率为 $1e^{-3}$ 时, 本文提出码本信噪比分别比 RotInt 码本、StarQAM 码本以及 GA 码本小 2.8 dB、1.2 dB 和 0.7 dB。另外重要的一点在于文献[9]提出的 GA 码本待优化的参数有 17 个, 而本文的待优化参数减少到 7 个, 计算复杂度有所降低。

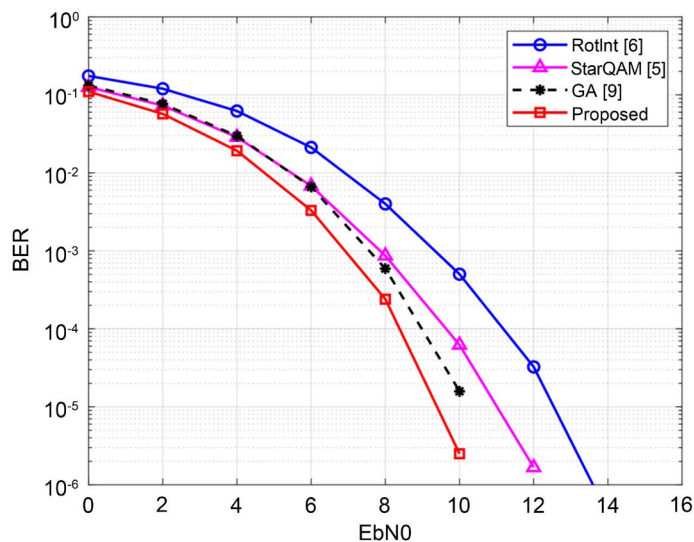


Figure 3. Comparison of bit error rates of different codebooks in Gaussian channels

图 3. 高斯信道下不同码本误码率比较

5. 结论

本文基于 Latin 结构提出了一种新型功率不平衡码本, 通过在不同用户码本之间、同一码本的不同维度之间引入功率差异, 从而增强干扰信号之间远近效应, 达到降低系统误码率的目的。在设计的码本结构中存在 7 个待优化的参数, 在高斯信道下通过遗传算法以最大化组合星座点间最小欧式距离为目标对参数进行优化, 优化后的最小距离达到 1.1560, 远大于其他码本。在高斯信道下, 本文提出码本的误码率性能相对于其他码本都有明显改善。

基金项目

教育部春晖计划项目(No.Z2017065)。

参考文献

- [1] Ding, Z., Lei, X., Karagiannidis, G.K., *et al.* (2017) A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks: Research Challenges and Future Trends. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **35**, 2181-2195. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2725519>
- [2] Nikopour, H. and Baligh, H. (2013) Sparse Code Multiple Access. 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>
- [3] Hoshyar, R., Wathan, F.P. and Tafazolli, R. (2008) Novel Low-Density Signature for Synchronous CDMA Systems over AWGN Channel. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **56**, 1616-1626. <https://doi.org/10.1109/TSP.2007.909320>
- [4] Taherzadeh, M., Nikopour, H., Bayesteh, A., *et al.* (2014) SCMA Codebook Design. 2014 *IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2013-Fall)*. Vancouver, 14-17 September 2014, 1-5. <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2014.6966170>
- [5] Yu, L., Lei, X., Fan, P., *et al.* (2015) An Optimized Design of SCMA Codebook Based on Star-QAM Signaling Constellations. 2015 *International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP)*, Nanjing, 15-17 October 2015, 1-5. <https://doi.org/10.1109/WCSP.2015.7341311>
- [6] Cai, D., Fan, P., Lei, X., *et al.* (2016) Multi-Dimensional SCMA Codebook Design Based on Constellation Rotation and Interleaving. 2016 *IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Nanjing, 15-18 May 2016, 1-5. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2016.7504356>
- [7] Bao, J., Ma, Z., Ding, Z., *et al.* (2016) On the Design of Multiuser Codebooks for Uplink SCMA Systems. *IEEE Communications Letters*, **20**, 1920-1923. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2596759>
- [8] Zhang, S., Xiao, K., Xiao, B., *et al.* (2016) A Capacity-Based Codebook Design Method for Sparse Code Multiple Access Systems. 2016 *8th International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP)*, Yangzhou, 13-15 October 2016, 1-5. <https://doi.org/10.1109/WCSP.2016.7752620>
- [9] Klimentyev, V.P. and Sergienko, A.B. (2017) SCMA Codebooks Optimization Based on Genetic Algorithm. *European Wireless 2017; 23rd European Wireless Conference*, Dresden, 17-19 May 2017, 1-6.
- [10] Van De Beek, J. and Popovic, B.M. (2009) Multiple Access with Low-Density Signatures. *GLOBECOM 2009-2009 IEEE Global Telecommunications Conference*, Honolulu, HI, 30 November-4 December 2009, 1-6. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2009.5425243>