

上行瑞利衰落信道下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20日; 录用日期: 2021年4月4日; 发布日期: 2021年4月15日

摘要

稀疏码多址接入(SCMA)是一种具有竞争力的码域非正交多址接入技术, 通过将调制与稀疏扩频结合在一起, 有效提升了通信系统的频谱效率。该文针对现有码本设计中存在的一些问题, 提出了一种适用于上行瑞利衰落信道的新型码本设计优化方案。首先将母星座设计从实数域推广到复数域, 提高码本设计的自由度; 其次, 以最大化最小乘积距离为目标, 通过遗传算法对码本各参数进行优化。仿真结果表明提出的码本在上行瑞利衰落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, 瑞利衰落信道, 最小乘积距离, 遗传算法

Design of SCMA Codebook for Uplink Rayleigh Fading Channel

Zhicheng Gao, Xudong Li

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

Received: Mar. 20th, 2021; accepted: Apr. 4th, 2021; published: Apr. 15th, 2021

Abstract

Sparse code multiple access (SCMA) is a competitive non-orthogonal code domain multiple access technology. By combining modulation with sparse spread spectrum, it can effectively improve the spectral efficiency of communication system. In this paper, a new optimization scheme of codebook design for uplink Rayleigh fading channel is proposed to solve the existing problems in codebook design. Firstly, the parent constellation design is extended from the real number domain

to the complex number domain to improve the freedom of codebook design. Secondly, in order to maximize the minimum product distance, the parameters of the codebook were optimized by genetic algorithm. Simulation results show that the BER performance of the proposed codebook is better than that of previous codebooks in uplink Rayleigh fading channel.

Keywords

Sparse Code Division Multiple Access, Rayleigh Fading Channel, Minimum Product Distance, Genetic Algorithm (GA)

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

非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)作为 5G NR (The Fifth Generation Mobile Communication System New Radio, 5G 新空口)的核心关键技术, 在近年来备受关注[1]。稀疏码多址接入(Sparse Code Multiple Access, SCMA)就是其中的典型代表[2]。SCMA 系统将星座调制与稀疏扩频结合在一起, 直接将输入的比特流映射为用户码本中的多维复数码字。这样, SCMA 系统能够充分利用多维码字以及成型增益来改进其性能, 较 LDS 系统有显著改进。

SCMA 方案由 Hosein Nikopour 等人在 2013 年正式提出, 文献[3]系统的提出了一种基于格星座的多阶段次优的 SCMA 码本设计方法, 规范了码本设计步骤, 此后大多数学者按照该设计思路对码本设计进行研究。文献[4]提出了一种基于星形正交振幅调制(star quadrature amplitude modulation, Star-QAM)的码本设计方案, 该方法主要通过增大码字间的最小欧式距离对码本进行优化, 该码本在高斯信道下性能得到明显提升, 但在瑞利信道中效果不是很理想。文献[5]提出了上行瑞利衰落信道的 SCMA 多用户码本设计方案, 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。

在瑞利衰落信道下, SCMA 码本性能主要与码本间的最小乘积距离(MPD)有关[6], 因此本文以最大化最小乘积距离为目标并通过遗传算法对码本中的参数进行优化, 仿真结果表明在上行瑞利衰落信道下 SCMA 系统的误码率性能有明显的改善。

2. SCMA 系统模型及码本设计理论

2.1. SCMA 系统模型

本文采用 SCMA 上行链路模型, 即 J 个用户共享 K 个正交资源块, 其中 $J > K$, 过载率定义为 $\lambda = J/K$ 。SCMA 下行链路通信系统模型如图 1 所示, 不同用户生成的码字在正交资源节点上进行多路复用[7], 因此同步之后的接收信号向量 $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_K)^T$ 在数学上表示为:

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

其中 $\mathbf{x}_j = (x_{1,j}, \dots, x_{K,j})^T$ 为用户 j 发送的 K 维码字, $\mathbf{h}_j = (h_{1,j}, \dots, h_{K,j})^T$ 为信道增益, $\text{diag}(\cdot)$ 为向量对角化, $\mathbf{n} = (n_1, \dots, n_K)^T$ 为加性高斯白噪声并且 $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I}_K)$ 。

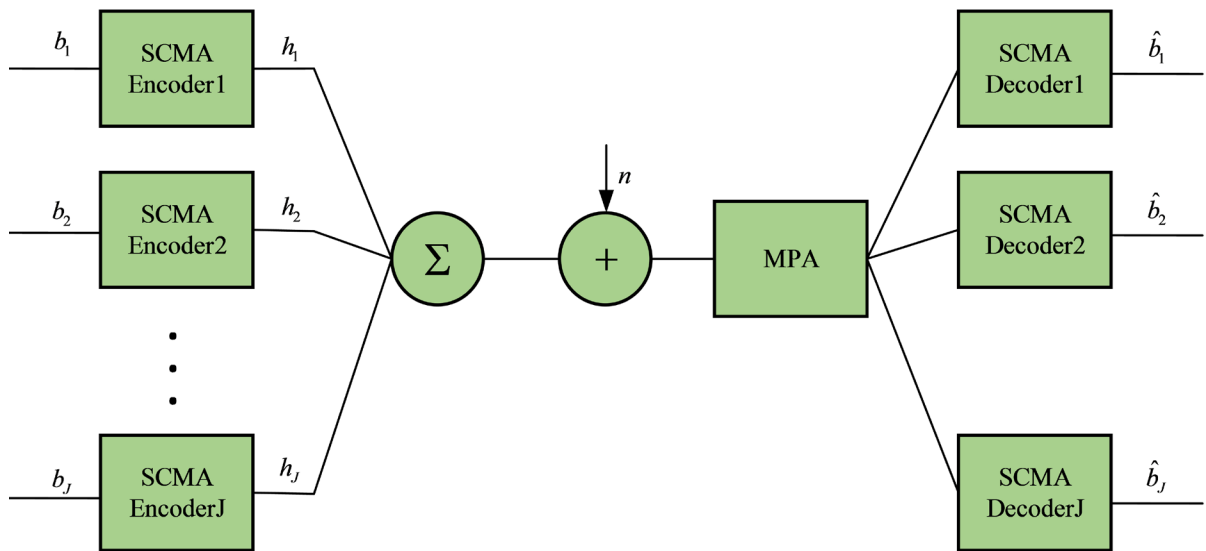


Figure 1. SCMA uplink communication system model

图 1. SCMA 上行链路通信系统模型

2.2. 码本设计理论

在 SCMA 系统信号发送端, 不同于一般的低密度签名技术(LDS), SCMA 编码器将调制与稀疏扩频结合在一起, 直接将大小为 $\log_2(M)$ 的比特流 \mathbf{b}_j 映射为码本 χ_j 中的 K 维复稀疏码字 \mathbf{x}_j , 码本大小 $|\chi_j| = M$ 。这个过程可以定义为

$$f: \mathbb{B}^{\log_2(M)} \rightarrow \chi, \mathbf{x} = f(\mathbf{b}) \quad (2)$$

目前为止, 最优的 SCMA 码本设计仍然是一个开放性的问题, 但是我们可以通过多步方法得到一个次优的 SCMA 码本结构[3]。首先, 我们需要将比特流映射到 N ($N < K$) 维的母星座 \mathcal{C} , 其中 $|\mathcal{C}| = M$ 。这一步可以定义为:

$$g: \mathbb{B}^{\log_2(M)} \rightarrow \mathcal{C}, \mathbf{c} = g(\mathbf{b}) \quad (3)$$

在得到母星座之后, 经过星座算子 Δ 和稀疏扩频之后就可以生成每个用户各自的码本。整个次优的 SCMA 码本的优化过程图 2 所示。首先得到 N 维性能较好的母星座, 再通过星座操作算子 Δ 以及扩频矩阵 \mathbf{V} 生成用户码本, 其中星座操作算子包含旋转操作算子和置换操作算子。

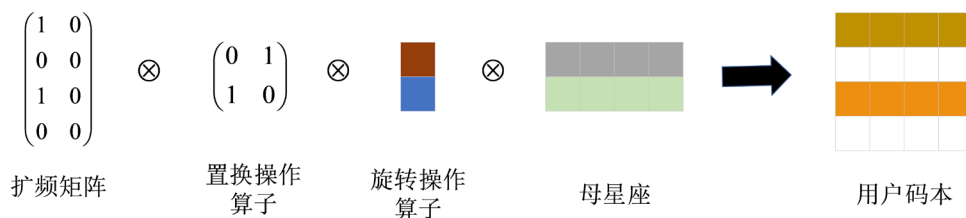


Figure 2. Suboptimal SCMA codebook design process

图 2. 次优 SCMA 码本设计过程

星座操作算子 Δ 以及扩频矩阵 \mathbf{V} 设计技术已经很成熟, 故本文旨在设计一个性能较好的母星座。

2.3. 最小乘积距离

我们定义叠加星座为 Γ ，并且有 $\mathbf{x}(1) = \sum_{j=1}^J \mathbf{x}_j \in \Gamma$ 以及 $\mathbf{x}(2) \in \Gamma$ 。那么传输向量 \mathbf{x}^1 与传输向量 \mathbf{x}^2 的成对差错概率(PEP)可以表示如下:

$$p(\mathbf{x}^1 \rightarrow \mathbf{x}^2 | \mathbf{h}) = Q \left(\sqrt{\frac{|\mathbf{h}(\mathbf{x}^1 - \mathbf{x}^2)|^2}{2N_0}} \right) \quad (4)$$

其中 $Q(x)$ 为互补累积分布函数, $Q(x) = \int_x^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}t^2\right) dt$ 。

那么, 当传输 $\mathbf{x}(1)$ 时, 发生错误的概率可以通过以下公式给出:

$$p(\mathbf{x}(1) | \mathbf{h}) = \sum_{c=1}^{M^J-1} Q \left(\sqrt{\frac{|\mathbf{h}(\mathbf{x}(1) - \mathbf{x}(c))|^2}{2N_0}} \right) \quad (5)$$

对于瑞利衰落信道, 上述成对差错概率可以表述为[8]:

$$p(\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{y}) \leq \frac{1}{2} \prod_{k=1}^K \frac{1}{1 + \frac{(x_k - y_k)^2}{8N_0}} \quad (6)$$

对于较高信噪比, 公式(7)可以进一步表述为:

$$p(\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{y}) \leq \frac{1}{2} \frac{1}{\left(\frac{\eta E_b}{8 N_0}\right)^l d_p^{(l)}(\mathbf{x}, \mathbf{y})^2} \quad (7)$$

其中 $d_p^{(l)}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 为标准化的最小乘积距离, 值越大, 成对差错概率越小。 l 为向量 \mathbf{x} 与 \mathbf{y} 不同的元素数目。因此码本间最小乘积距离对于 SCMA 系统在瑞利信道的性能具有重要影响, 将其定义如下:

$$\text{MPD} = \min_j \left\{ \prod_{k=1, k \neq x_{j,p}^k, x_{j,q}^k}^K |x_{j,p}^k - x_{j,q}^k|, 1 \leq p < q \leq M \right\}, \quad (8)$$

其中 $x_{j,p}^k$ 为用户 j 的第 m 个码字占据第 k 个资源节点的元素。

3. 瑞利衰落信道下 SCMA 码本设计及优化

3.1. SCMA 码本设计

在本文中, 我们引入了一种新的母星座结构。对于 $N=2, M=4$, 其具体结构如下式(9)所示, 母星座结构如图3所示:

$$C_{2 \times 4} = \begin{pmatrix} \rho\omega e^{j\theta} & \omega & -\omega & -\rho\omega e^{j\theta} \\ -\omega & \rho\omega e^{j\theta} & -\rho\omega e^{j\theta} & \omega \end{pmatrix} \quad (9)$$

其中 $\omega = a + bj$, ρ 为母星座外环与内环之比。不同于 Lisu Yu 等人提出的母星座结构[4], 我们在星座外环额外添加了旋转角度 θ , 将母星座从实数域推广到复数域, 从而提高码本结构设计的自由度, 得到性能更好的码本。

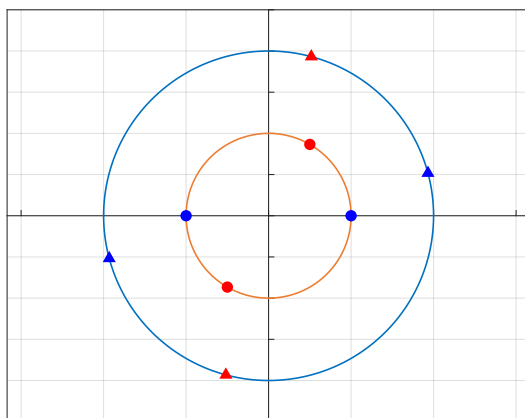


Figure 3. Parental constellation structure

图 3. 母星座结构

类似于低密度签名(LDS)系统, 我们可以将星座算子 Δ 与稀疏扩频矩阵 \mathbf{V} 结合在一起, 并用签名矩阵 $\mathbf{S} = (\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_J)$ 代替 $\mathbf{S}_j = (s_j^1, \dots, s_j^K) = \mathbf{V}_j \Delta_j \mathbf{I}_c$, 其中 \mathbf{I}_c 为全 1 的列向量。对于用户 j , 其码本如下所示:

$$\chi_j = \text{ezc}(\text{diag}(\mathbf{S}_j))\mathbf{C} \quad (10)$$

其中 $\text{diag}(\cdot)$ 为向量对角化, $\text{ezc}(\mathbf{B})$ 为移除矩阵 \mathbf{B} 全零列之后生成的矩阵, 具体如公式(11)所示

$$\begin{pmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & a_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

不同于文献[9]等人提出的 Latin 结构, 本文构造一种新的签名矩阵 $\mathbf{S}_{4 \times 6}$ 如下所示

$$\mathbf{S}_{4 \times 6} = \begin{bmatrix} 0 & z_1 & z_2 & 0 & z_3 & 0 \\ z_1 & 0 & z_2 & 0 & 0 & z_3 \\ 0 & z_3 & 0 & z_2 & 0 & z_1 \\ z_3 & 0 & 0 & z_2 & z_1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

其中 $z_i = e^{j\varphi_i}$, φ_i 分别表示分配给位于 z_i 位置上的旋转角度。

3.2. 瑞利衰落信道下码本优化

以最大化最小乘积距离为目标对功率不平衡码本进行优化, 具体过程表示如下:

$$\begin{aligned} & \max_{\varphi, \rho, \theta, \omega} \text{MPD} \\ & \text{s.t.} \quad 0 < \varphi_i < \pi, \quad \forall i = 1, 2, \dots, d_f \\ & \quad \quad 0 < \theta < \pi \\ & \quad \quad \rho \geq 1, \end{aligned} \quad (13)$$

其中最小乘积距离 MPD 是参数 $\varphi, \rho, \theta, \omega$ 的函数, 同样为了不同码本之间比较的公平性, 码本中码字的平均能量设定为 1。

最终遗传算法求解结果如图 4 所示。其中图 4 上半部分为最小乘积距离的优化结果, 经过 95 次迭代之后算法收敛, 码本的最小乘积距离达到 1.00。

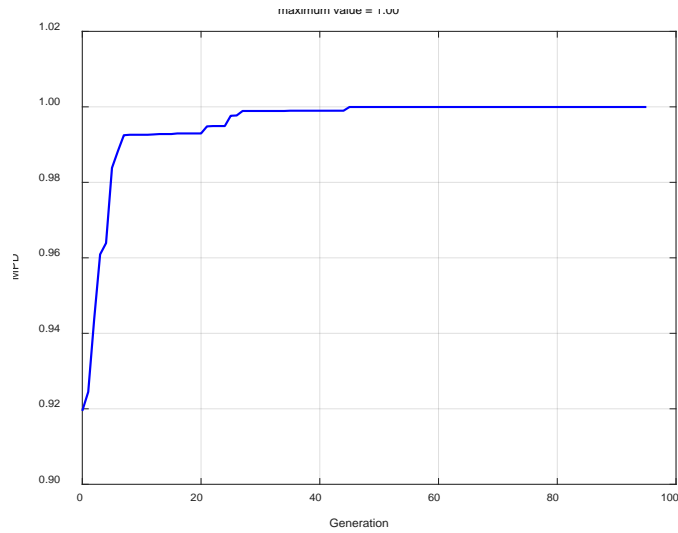


Figure 4. Optimization results of genetic algorithm
图 4. 遗传算法优化结果

4. 仿真

本文中选取了 Star-QAM 码本, GA 码本[10]以及 Chen 码本[11]与本文优化的码本进行比较, 不同码本的比较结果如表 1 所示。值得注意的是, 基于高斯信道优化后功率不平衡码本的最小乘积距离最大, 比 Chen 码本高出了 0.22, 比 Star-QAM 码本高出了 0.28。故新码本在上行瑞利衰落信道下表现更好。

利用 MATLAB 仿真对比上述四个码本的误码率, 各仿真参数如表 2 所示:

Table 1. Summative comparison of different codebooks

表 1. 不同码本总结性比较

	码字平均能量	最小乘积距离
Star-QAM	1	0.72
GA	1	0.02
Chen	1	0.78
Prop.	1	1.00

Table 2. SCMA codebook simulation parameters

表 2. SCMA 码本仿真参数

参数	值
用户数 J	6
码本大小 M	4
资源块数 K	4
符号数量 Num	1e5
迭代次数 T	6
母码本维度 N	2
信道	上行瑞利衰落信道

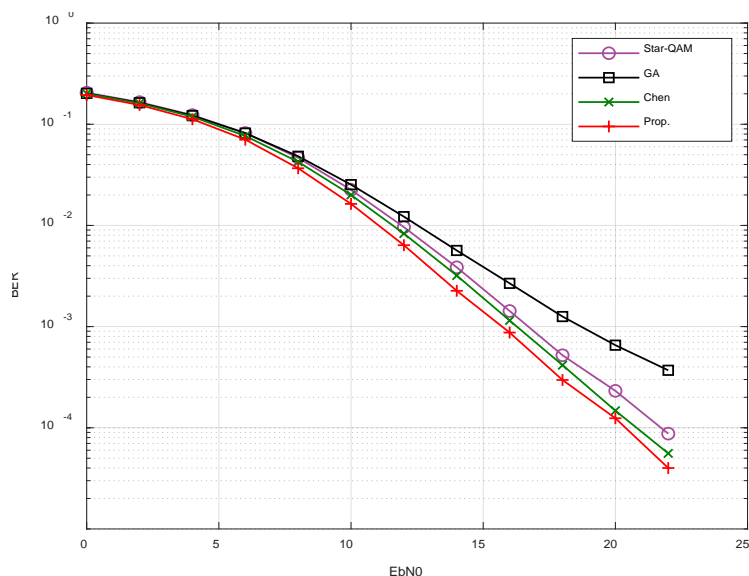


Figure 5. Comparison of BER performance between different codebooks in uplink Rayleigh fading channel

图 5. 上行瑞利衰落信道下不同码本之间 BER 性能比较

图 5 显示了不同码本在上行瑞利衰落信道的 BER 性能, 可以看出优化后的功率不平衡码本在高斯信道下的性能明显优于其它码本, 在 $\text{BER} = 1e-3$ 时, 功率不平衡码本相对于 Chen 码本, GA 码本以及 Star-QAM 码本的性能增益分别为 0.7 dB, 1.0 dB 和 3.0 dB。

5. 结论

本文提出了一种新型码本结构, 通过在母星座上添加了旋转角度 θ 提高码本结构设计的自由度, 使得设计出的码本容易推广; 此外, 在瑞利衰落信道下以最大化最小乘积距离为目标, 通过遗传算法对码本中的参数进行优化。仿真结果表明提出的码本在瑞利衰落信道下误码率性能较以往码本有明显改善。

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 23th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 8-11 September 2013, London. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2013.6666156>
- [3] Taherzadeh, M., Nikopour, H., Bayesteh, A., *et al.* (2013) SCMA Codebook Design. 2013 *IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2013-Fall)*, 14-17 September 2014, Vancouver. <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2014.6966170>
- [4] 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)*, 15-17 October 2015, Nanjing. <https://doi.org/10.1109/WCSP.2015.7341311>
- [5] 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>

- [6] Alam, M. and Zhang, Q. (2017) Performance Study of SCMA Codebook Design. 2017 *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 19-22 March 2017, San Francisco. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2017.7925767>
- [7] Van De Beek, J. and Popovic, B.M. (2009) Multiple Access with Low-Density Signatures. *GLOBECOM 2009-2009 IEEE Global Telecommunications Conference*, 30 November-4 December 2009, Honolulu. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2009.5425243>
- [8] Boutros, J., Viterbo, E., Rastello, C., *et al.* (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>
- [9] 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>
- [10] Klimentyev, V.P. and Sergienko, A.B. (2017) SCMA Codebooks Optimization Based on Genetic Algorithm. *European Wireless 2017; 23th European Wireless Conference*, 17 August 2017.
- [11] Chen, Y. and Chen, J. (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>