

## 一种稀疏码本多址接入码本优化设计方法

景小荣<sup>\*①②</sup> 陶红宝<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

<sup>②</sup>(移动通信技术重庆市重点实验室 400065)

**摘要:** 稀疏码多址接入(SCMA)作为一种具有竞争力的非正交多址接入(NOMA)技术, 该技术通过高维调制与稀疏扩频的结合, 有效地提升了系统的频谱效率。该文针对现有SCMA码本设计中存在的问题, 提出一种同时适用于高斯信道和瑞利衰落信道的SCMA码本优化设计方法。在该方法中, 首先通过旋转基准星座和母星座, 实现母星座在各个维度上投影点间的最小欧氏距离以及叠加在单个资源块上的总星座中与各用户对应的星座图上星座点间的最小欧氏距离的最大化, 以提升SCMA码本在高斯信道下的性能; 进而在保持总星座上星座点间最小欧氏距离不变的条件下, 通过旋转叠加在单个资源块上多个用户的星座, 优化叠加在单个资源块上的与各用户对应的星座图中星座点间最小乘积距离和信号空间分集(SSD)阶数, 最后结合 $Q$ 路坐标交织技术获得额外的分集增益, 以提升系统抗信道衰落的能力。仿真结果显示: 在高斯信道和瑞利衰落信道下, 该文设计的SCMA码本的性能均明显优于华为公司提出的SCMA码本和低密度扩频多址接入(LDS-MA)技术。

**关键词:** 非正交多址接入; 稀疏码多址接入; 高斯信道; 瑞利衰落信道; 坐标交织

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)01-0024-08

DOI: 10.11999/JEIT180208

## Optimization Design Method for Sparse Code Multiple Access Codebooks

JING Xiaorong<sup>①②</sup> TAO Hongbao<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

<sup>②</sup>(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** As a competitive Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) technique, Sparse Code Multiple Access (SCMA) improves efficiently the system spectral efficiency by combining the high dimensional modulation and sparse spread spectrum. To address the existing issues of SCMA codebook design, an optimization design method for SCMA codebooks is proposed for both Rayleigh fading and Gaussian channels. In the method, by rotating the base constellation and the mother constellation, the minimum Euclidean distance between the projection points of the mother constellation on each dimension, and between the constellation points on the constellations corresponding to each user in the total constellation on a single resource block is maximized in order to improve the performance of the SCMA codebooks over Gaussian channels; On the basis of it, by rotating the constellation of multiple users superimposed on each resource block, the corresponding minimum product distance and the Signal Space Diversity (SSD) order of the users' constellations are optimized; At last, an additional diversity gain is achieved by using  $Q$ -coordinate interleaving technology to improve further the performance over the Rayleigh fading channels. Simulation results show that the performance of the proposed SCMA codebooks outperforms that of the HUAWEI' SCMA codebooks and Low Density Signature Multiple Access (LDS-MA) in both the Gaussian channels and the Rayleigh fading channels.

**Key words:** Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA); Sparse Code Multiple Access (SCMA); Gaussian channels; Rayleigh fading channels; Coordinate interleaving

收稿日期: 2018-02-28; 改回日期: 2018-09-07; 网络出版: 2018-09-21

\*通信作者: 景小荣 jingxr@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX03001010-004), 重庆市重点产业共性关键技术创新专项(cstc2017zdcy-zdyfX0021)

Foundation Items: The National Science and Technology Major Special Project of China (2016ZX03001010-004), The Innovation Project of the Common Key Technology of Chongqing Major Industry (cstc2017zdcy-zdyfX0021)

## 1 引言

非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)被认为是满足第5代(Fifth Generation, 5G)大规模机器类通信(massive Machine Type of Communication, mMTC)海量连接需求的关键技术<sup>[1]</sup>。

在众多NOMA技术中, 华为公司提出的稀疏码多址接入(Sparse Code Multiple Access, SCMA)就是其中的典型代表。SCMA由低密度扩频多址(Low Density Signature Multiple Access, LDS-MA)演变而来<sup>[2]</sup>, 相较于LDS-MA, SCMA能够获得额外的信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)增益<sup>[3]</sup>。然而, SCMA要成为5G空口的关键技术, 两个关键问题亟需解决: 低复杂度的SCMA多用户检测算法及性能优良的SCMA码本设计。在SCMA多用户检测研究方面, 文献<sup>[4]</sup>通过离散化用户节点的概率密度函数(Probability Density Function, PDF), 提出了一种高效的SCMA多用户检测算法; 文献<sup>[5]</sup>提出了一种低复杂度的消息传递算法(Message Passing Algorithm, MPA); 杜洋等人在文献<sup>[6]</sup>中, 以因子图中的资源节点消息串行更新为基础, 提出了一种快速收敛的SCMA多用户检测算法。然而, 本文的研究重点在于SCMA码本优化设计。

SCMA本质上为由不同高维星座所构成的集合, 然而高维星座设计本身就是一个难题<sup>[7]</sup>。因此, 截止目前, 最优SCMA码本设计仍是一个开放的课题, 已有研究主要集中在次优SCMA码本设计上。

在次优SCMA码本设计方面, Taherzadeh等人<sup>[8]</sup>基于高维星座与操作因子独立设计的思路, 设计了一种次优SCMA码本; 同时, 对码本设计步骤进行了规范。按照该设计思路, 一些学者致力于高维星座的优化设计研究。文献<sup>[9]</sup>利用球型码峰均比低的优点, 提出了一种SCMA母星座设计方法。文献<sup>[10]</sup>通过分别优化高维格星座的编码增益和赋形增益来设计高维格星座。文献<sup>[11]</sup>基于Star-QAM星座来设计SCMA码本; 相较于传统码本, 该码本在高斯信道下的性能得到明显提升, 但在瑞利衰落信道中性能增益并不是很理想。文献<sup>[12]</sup>指出: SCMA码本的性能不仅与母星座的最小欧氏距离有关, 还与母星座上各维度之间的功率差异相关。于是, 在文献<sup>[13]</sup>中通过折中考虑两种影响因素来优化母星座设计, 进而实现SCMA码本设计。然而, 上述研究主要集中在母星座优化设计上, 并未对操作因子设计作深入的研究。

在SCMA系统中, 高斯信道条件下各用户的信号只承受高斯白噪声和来自同一信道其他用户信号的加性干扰, 因此, 高斯信道条件下SCMA码本的

性能取决于星座图上信号点间的最小欧氏距离<sup>[14]</sup>; 而在瑞利信道下, 用户信号除了受上述加性因素的影响外, 还要承受乘性衰落信道的影响, 因此, 在SCMA码本设计过程中, 可融入一定信号空间分集(Signal Space Diversity, SSD)技术<sup>[15]</sup>, 来提升码本抗信道衰落的能力。

在上述分析的基础上, 针对现有SCMA码本设计的缺陷, 本文提出了一种SCMA码本优化设计方法, 该方法不仅对母星座进行优化设计, 而且对操作因子进行了优化设计, 使得所设计的SCMA码本在高斯信道和瑞利衰落信道下均具有良好的性能。仿真结果表明: 在接收端采用低复杂度的对数域消息传递算法(Message Passing Algorithm, MPA)进行检测时, 本文优化设计的SCMA码本在高斯信道和瑞利衰落信道中的性能较传统的码本均有明显的提升。

## 2 系统模型

考虑下行SCMA系统, 假设 $J$ 个用户的信息叠加在 $K$ 个正交资源块上进行传输, 过载率 $\lambda = J/K$ ; 同时假设每个资源块上承载 $d_j = \begin{pmatrix} N-1 \\ K-1 \end{pmatrix}$ 个用户的信息, 用户 $j$ 的符号在各资源块上的叠加情况取决于映射矩阵 $\mathbf{V}_j$ 中非零元素的位置。在传输前, 发送端对 $J$ 个用户的比特信息数据分别进行SCMA码字映射, 将形成的 $J$ 个用户的对应码字符号相加后, 送入信道到达接收端。令 $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_K]^T$ 表示 $K$ 个正交资源块上的接收信号, 则

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

其中,  $\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_K]^T$ 表示信道衰落系数矢量,  $\text{diag}(\cdot)$ 表示矩阵对角化运算,  $\mathbf{x}_j = [x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{K,j}]^T$ 表示第 $j$ 个用户的SCMA码字符号,  $\mathbf{n}$ 表示均值为0, 方差为 $(N_0/2)\mathbf{I}_K$ 高斯白噪声矢量。

## 3 SCMA码本设计理论

SCMA发送端将 $\log_2 M$ 个信息比特数据映射成 $K$ 维码本中某个稀疏码字符号, 映射关系可表示为

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

其中,  $b$ 表示某一用户的信息比特数据,  $\chi \subset \mathbf{C}^K$ ,  $|\chi| = M$ 表示码本的大小。映射关系 $f$ 可进一步表示为

$$f := (\mathbf{v}_j, \mathbf{g}_j) \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{v}_j$ 表示用户 $j$ 的映射函数,  $\mathbf{g}_j$ 表示用户 $j$ 的星座生成函数。SCMA码本设计过程就是先通过

星座函数  $g_j$  产生包含  $N$  维  $M$  点的用户星座, 然后通过映射函数  $v_j$  将  $N$  维的用户星座映射得到 SCMA 码本。因此, 在给定码本参数  $(J, M, N, K)$  后, SCMA 码本的优化设计函数式可表示为

$$\mathbf{v}_j^*, \mathbf{g}_j^* = \arg \max_{\mathbf{v}, \mathbf{g}} m(\delta(\mathbf{v}, \mathbf{g}; J, M, N, K)) \quad (4)$$

其中,  $m$  为给定的 SCMA 设计标准。按照文献[8]设计规范, 有

$$\mathbf{g}_j := (\Delta_j)g, \forall j \quad (5)$$

其中,  $\Delta_j$  表示操作因子矩阵,  $g$  表示母星座生成函数。由于映射函数设计只是简单的排列组合问题, 因此 SCMA 码本设计又可简化为式(6)的优化问题。

$$\mathbf{g}^*, [\Delta_j^*]_{j=1}^J = \arg \max_{\mathbf{g}, [\Delta_j]_{j=1}^J} m(\delta(\mathbf{v}^*, \mathbf{g}_j := (\Delta_j)g; J, M, N, K)) \quad (6)$$

上述问题的最优求解目前仍是个开放的课题, 一种次优解决方法是将  $g$  和  $\Delta_j$  分开独立设计。下一节, 按照该解决思路, 本文将给出一种 SCMA 码本优化设计方法。

#### 4 SCMA 码本优化设计

在本节详细地给出 SCMA 码本优化设计的过程。在 SCMA 码本优化设计过程中, 以 QPSK 星座作为基准星座来设计母星座, 并将其扩展到  $N$  维  $M$  点, 即等效完成了  $g^*$  的设计; 接着以资源块上叠加的总星座为研究对象, 来优化设计旋转操作因子, 以此来完成操作因子矩阵  $\Delta_j$  的设计; 然后结合映射矩阵和操作因子矩阵将母星座映射为多用户码本; 最后, 结合  $Q$  路坐标交织技术来提升多用户 SCMA 码本的分集增益, 进一步改善其在瑞利衰落信道下性能。

##### 4.1 高维母星座的设计

选取星座点平均能量为 1 的 QPSK 星座作为基准星座  $C$ , 将  $C$  逆时针旋转角度  $\alpha$ , 构造母星座  $C_{2,4}$ , 如图 1 所示。旋转过程可用式(7)表示。

$$C_{2,4} = \mathbf{R}C \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{R}$  表示旋转矩阵。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

在旋转过程中, 星座  $C$  在两个维度上的投影点

$$\mathbf{s}_1 = \begin{bmatrix} -(M-1) \times a & -(M-3) \times a & \cdots & -(M-2m+1) \times a & -(M-2m-1) \times a & \cdots & -3a & -a \\ a & 3a & \cdots & (M-2m-1) \times a & (M-2m+1) \times a & \cdots & (M-3) \times a & (M-1) \times a \end{bmatrix} \quad (12)$$

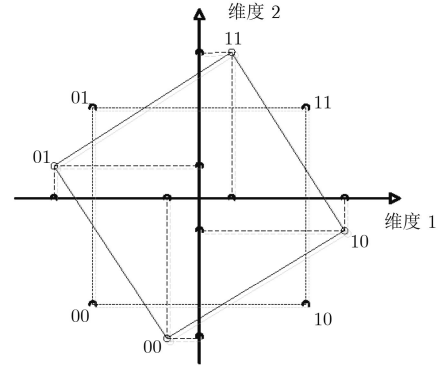


图 1 QPSK 星座旋转投影示意图

的位置会随旋转角度的不同而变化。由于星座  $C$  的正交性和对称性, 其在两个维度上的投影点具有相同的变化规律, 且以  $90^\circ$  为周期。因此, 通过优化旋转角度  $\alpha$ , 可使得  $C$  在维度 1 或者维度 2 上的投影点之间的最小欧氏距离最大化, 这样处理的目的是为了保证后续设计出的 SCMA 码本矩阵中, 各非 0 行元素之间的最小欧氏距离能够最大化。于是, 最优旋转角度  $\alpha^*$  可表示为

$$\alpha^* = \arg \max_{\alpha \in (0, \frac{\pi}{4})} \min |x_{m_1} - x_{m_2}|^2, \quad m_1, m_2 \in 1, 2, \dots, 4, m_1 \neq m_2 \quad (9)$$

其中,  $x_{m_1}, x_{m_2}$  分别表示维度 1 或者维度 2 上的投影点。

通过求解式(9), 得到最优旋转角  $\alpha^* = 0.4636$ 。于是, 优化后的 2 维 4 点母星座  $C_{2,4}$ , 如式(10)所示。

$$C_{2,4} = \begin{bmatrix} -0.9486 & -0.3162 & 0.3162 & 0.9486 \\ 0.3162 & -0.9486 & 0.9486 & -0.3162 \end{bmatrix} \quad (10)$$

为了使设计出的码本能够更为灵活地满足海量连接的需求, 可将上述 2 维 4 点母星座, 按图 2 所示操作进行扩展, 形成  $N$  维  $M$  点母星座, 具体步骤如下:

步骤 1 将母星座  $C_{2,4}$  进行点数扩展, 得到 2 维  $M$  点母星座  $C_{2,M}$ , 具体扩展过程如下。

令量化比特数  $t = \log_2 M$ , 当  $M = 4$  时, 即母星座  $C_{2,4}$ 。当  $t = \log_2 M > 2$  时, 按照式(11)进行扩展, 构造 2 维  $M$  点母星座  $C_{2,M} (a=0.3162)$ :

$$C_{2,M} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_1 \\ \mathbf{s}_2 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times M} \quad (11)$$

其中,

$$s_2 = \begin{bmatrix} (M-3) \times a & -(M-1) \times a & \cdots & (M-2m+1) \times a & -(M-2m-1) \times a & \cdots & a & -3a, \\ 3a & -a & \cdots & (M-2m+1) \times a & -(M-2m-1) \times a & \cdots & (M-1) \times a & -(M-3) \times a \end{bmatrix} \quad (13)$$

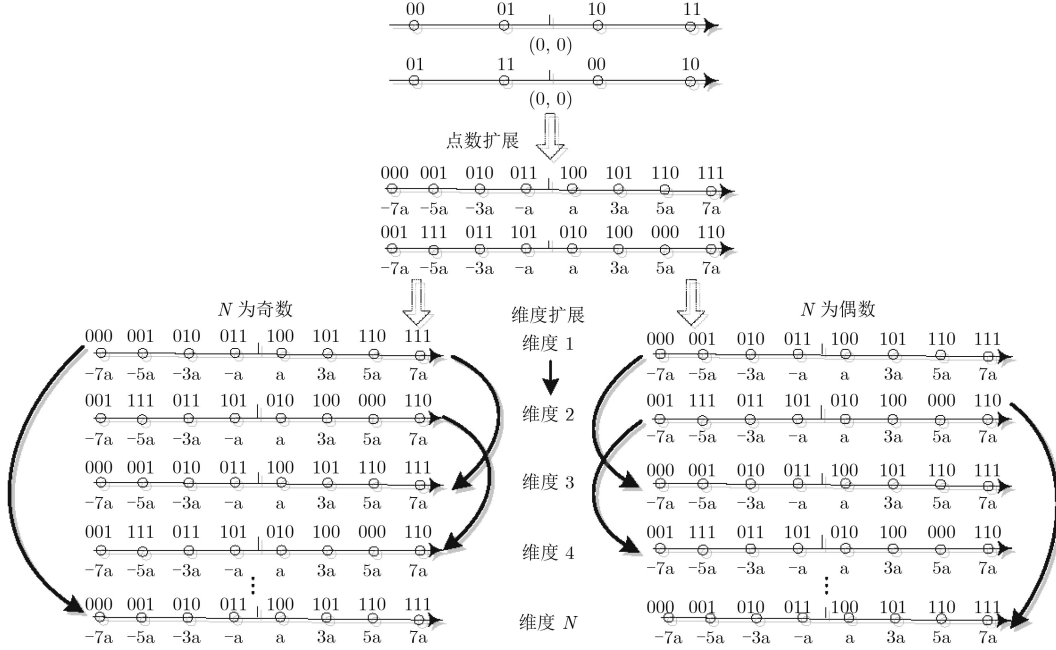


图2 母星座扩展示意图

步骤2 将母星座  $C_{2,M}$  进行维度扩展，得到  $N$  维  $M$  点母星座  $C_{N,M} \in \mathbb{R}^{N \times M}$ ，扩展规律如式(14)：

$$C_{N,M} = \begin{cases} [s_1 & s_2 & \cdots & s_1 & s_2 & s_1]^T, & N=2n+1 \\ [s_1 & s_2 & \cdots & s_1 & s_2]^T, & N=2n \end{cases} \quad (14)$$

其中， $n$  属于正整数。将母星座进行归一化，使得叠加在单个资源块上  $d_f$  个用户的信号平均功率之和为1，于是有

$$\frac{\|s_1\|^2}{M} = \frac{\|s_2\|^2}{M} = \frac{1}{d_f} \quad (15)$$

上述扩展所得到的母星座在各维度上的投影点间的最小欧氏距离仍然保持最大，这样有效地保证了后续设计出的SCMA在高斯信道条件下的性能。

#### 4.2 操作因子矩阵的设计

在完成母星座设计之后，需要给每个用户设计各自的操作因子矩阵  $\Delta_j$ ，以便能够将母星座映射成与各用户对应的SCMA码本。常用的星座操作包括相位旋转，置换组合和复共轭。由于母星座  $C_{N,M}$  在各个维度上的投影点具有相同的排列结构和能量级别，因此，置换组合和复共轭在本文已失去意义，于是本文采用相位旋转来设计操作因子。

选择  $C_{N,M}$  在第1个维度上的投影  $p$ ，将  $p$  分别旋转  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{d_f}$ ，构造叠加在第  $k$  个资源块上的  $d_f$  个用户的总星座图  $C_k = \{p_1, p_2, \dots, p_{d_f}\}$ ，这里  $p_1, p_2, \dots, p_{d_f}$  分别表示将投影  $p$  旋转角度  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{d_f}$  后，在第  $k$  个资源块上形成的、与  $d_f$  个用户分别对应的星座图，如图3中实线所示。固定  $\theta_1 = 0^\circ$ ，通过优化旋转角度  $\{\theta_2, \theta_3, \dots, \theta_{d_f}\}$ ，使  $C_k$  上与  $d_f$  个用户分别对应的星座图上的星座点间的最小欧氏距离最大化。为此，构建如式(16)所示的优化函数。

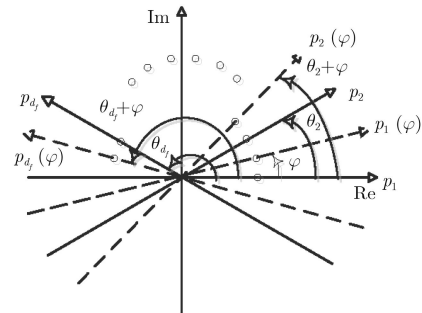


图3 叠加在第  $k$  个资源块上的  $d_f$  个用户的总星座图  $C_k$  及  $C'_k$

$$\{\theta_2^*, \theta_3^*, \dots, \theta_{d_f}^*\} = \arg \max_{(\theta_2, \theta_3, \dots, \theta_{d_f}) \in (0, \pi)} \min |x_{u, M_s} - x_{v, M_t}|^2 \quad (16)$$

其中， $x_{u, M_s}$  表示  $C_k$  中与用户  $u$  对应的星座图  $p_u$  上

的第 $M_s$ 个星座点,  $x_{v,M_t}$ 表示 $C_k$ 中与用户 $v$ 对应的星座图 $\mathbf{p}_v$ 上的第 $M_t$ 个星座点,  $u, v \in \{1, 2, \dots, d_f\}$ ,  $u \neq v, M_s, M_t \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。

在星座图上星座点平均能量固定的条件下, 星座图上各星座点间的最小欧氏距离决定了其在高斯信道下的性能。然而, 在高斯信道条件下性能良好的星座并不一定在瑞利衰落信道下也具有类似的性能。同时, 文献[15]指出: 在瑞利衰落信道下的性能主要决定于星座图上各星座点间的最小乘积距离和星座图的SSD阶数。在瑞利衰落信道条件下设计星座图时, 应遵循原则: 在不改变星座点间最小欧氏距离的条件下, 尽可能增大星座图上星座点间的最小乘积距离及其SSD阶数。在该原则指引下, 下面给出具体的设计过程。

在保证 $C_k = \{\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_{d_f}\}$ 上各星座点间欧氏距离不变的前提下, 将 $C_k$ 逆时针旋转角度 $0 < \varphi < \pi$ , 形成总星座 $C'_k = \{\mathbf{p}_1(\varphi), \mathbf{p}_2(\varphi), \dots, \mathbf{p}_{d_f}(\varphi)\}$  (如图3中间断线所示), 以提高 $C_k$ 中与各用户对应的星座图 $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_{d_f}$ 的SSD阶数(实际上, 只要 $\varphi \neq \pi - \theta_\varepsilon^*$ 且 $\varphi \neq \left|\frac{\pi}{2} - \theta_\varepsilon^*\right|$ , 其中 $z = 1, 2, \dots, d_f$ , 即 $\mathbf{p}_1(\varphi), \mathbf{p}_2(\varphi), \dots, \mathbf{p}_{d_f}(\varphi)$ 不与实轴及虚轴重合时, 通过逆时针旋转角度 $\varphi$ , 总能使 $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_{d_f}$ 最大获得2阶SSD); 同时, 还可保证 $C'_k$ 上各星座点间的最小乘积距离最大化。为此, 构建如式(17)优化函数:

$$\varphi^* = \arg \max_{\varphi \in (0, \pi)} \min \{ \text{mpd}(\mathbf{p}_1(\varphi)), \text{mpd}(\mathbf{p}_2(\varphi)), \dots, \text{mpd}(\mathbf{p}_{d_f}(\varphi)) \} \quad (17)$$

式中,

$$\text{mpd}(\mathbf{p}_\varepsilon(\varphi)) = \min(\text{pd}(\mathbf{p}_\varepsilon(\varphi))) \quad (18)$$

其中,  $\varepsilon = 1, 2, \dots, d_f$ ,  $\text{mpd}(\mathbf{p}_\varepsilon(\varphi))$ 表示将 $C_k$ 旋转角度 $\varphi$ 后形成的母星座 $C'_k$ 中与第 $\varepsilon$ 个用户对应的星座图上的星座点间的最小乘积距离,

$$\text{pd}(\mathbf{p}_\varepsilon(\varphi)) = \prod_{l=1}^2 |\mathbf{p}_\varepsilon^{M_s, l}(\varphi) - \mathbf{p}_\varepsilon^{M_t, l}(\varphi)| \quad (19)$$

其中,  $\text{pd}(\mathbf{p}_\varepsilon(\varphi))$ 表示 $C'_k$ 中与第 $\varepsilon$ 个用户对应的星座图上的星座点间的乘积距离,  $M_s, M_t \in \{1, 2, \dots, M\}$ 且 $M_s \neq M_t$ ,  $\mathbf{p}_\varepsilon^{M_s, l}(\varphi)$ 和 $\mathbf{p}_\varepsilon^{M_t, l}(\varphi)$ 为 $C'_k$ 中与第 $\varepsilon$ 个用户对应的星座图上的第 $M_s$ 与第 $M_t$ 个星座点在第 $l$ 维度上的投影。根据式(16)–式(19)的结果, 第 $k$ 个资源块上 $d_f$ 个用户的旋转操作因子可表示为

$$\Upsilon_k = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{d_f}\} = \{\varphi^*, \theta_2^* + \varphi^*, \dots, \theta_{d_f}^* + \varphi^*\} \quad (20)$$

由于上节得到的母星座 $C_{N,M}$ 在每个维度上的

投影点均具有相同的排列, 因此, 第 $k$ 个资源块上的旋转操作因子 $\Upsilon_k$ 完全可推广到其它 $K-1$ 个资源块上。于是,  $K$ 个资源块上的旋转操作因子 $\Phi = \Upsilon_k$ 。

通过上述旋转操作因子的设计, 不但使叠加在单个资源块上的 $d_f$ 个用户的总星座图上的星座点间的最小欧氏距离实现了最大化, 而且使叠加在单个资源块上的 $d_f$ 个用户各自星座图上的星座点间的最小乘积距离实现了最大化, 同时, 提高了其对应的SSD阶数。

#### 4.3 多用户SCMA码本设计

得到母星座 $C_{N,M}$ 和 $K$ 个资源块上的旋转操作因子 $\Phi$ 后, 根据映射矩阵 $\mathbf{V}_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$ , 对母星座进行映射, 以形成与多个用户对应的SCMA码本。映射矩阵 $\mathbf{V}_j$ 通过在单位矩阵 $\mathbf{I}_N$ 中添加 $K-N$ 行全零行得到。例如, 当码本参数集 $(J, M, N, K) = (6, 4, 2, 4)$ 时, 映射矩阵可设计为

$$\mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

根据拉丁准则, 为了将操作因子分配给不同用户的码本, 按照码本参数集, 操作因子矩阵可设计为

$$\Delta_1 = \begin{bmatrix} e^{i\phi_3} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_2} \end{bmatrix}, \Delta_2 = \begin{bmatrix} e^{i\phi_2} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_1} \end{bmatrix}, \Delta_3 = \begin{bmatrix} e^{i\phi_1} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_2} \end{bmatrix}, \Delta_4 = \begin{bmatrix} e^{i\phi_2} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_3} \end{bmatrix}, \Delta_5 = \begin{bmatrix} e^{i\phi_3} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_1} \end{bmatrix}, \Delta_6 = \begin{bmatrix} e^{i\phi_1} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_3} \end{bmatrix} \quad (22)$$

在确定 $\Delta_j$ 和 $\mathbf{V}_j$ 的基础上, 用户 $j$ 的SCMA码本可设计为

$$\mathbf{U}_j = \mathbf{V}_j \Delta_j \mathbf{C}_{N,M} \quad (23)$$

#### 4.4 码字符号的 $Q$ 路坐标交织

相比现有SCMA码本, 4.3节设计出的SCMA码本在瑞利衰落信道中尽管能够获得一定的性能增益(见后续仿真), 然而, 文献[15]指出: 融合坐标交织技术, 星座图旋转所带来的SSD增益将会更好地体现出来。因此, 在4.3节所设计的SCMA码本的基础上, 本小节引入 $Q$ 路坐标交织, 来进一步提升SCMA码本对抗信道衰落的能力。

假设用户 $j$ 的一帧比特数据经SCMA码本映

射后，在第 $k$ 个资源块上的数据符号为(其中 $i = \sqrt{-1}$ )

$$X_{k,j} = (x_1, x_2, \dots, x_T) = (\Re(x_1) + i\Im(x_1), \Re(x_2) + i\Im(x_2), \dots, \Re(x_T) + i\Im(x_T)) \quad (24)$$

其中， $x_f$ 表示用户比特序列经码本映射后所形成的码字符号， $f = 1, 2, \dots, T$ ， $T$ 表示符号帧长，其取值为

$$T = \frac{L_{fr}}{R_c \log_2 M} \quad (25)$$

其中， $L_{fr}$ 为比特帧长， $R_c$ 为信道编码码率。

本文采用 $Q$ 路倒序交织技术，即将 $X_{k,j}$ 中码字符号的实部保持不变，将对应符号中的虚部排列顺序取反，从而打乱原先的码字符号的实部与虚部的关系。通过 $Q$ 路交织，复数符号的 $I$ 路和 $Q$ 路均经历了独立的衰落，接收端只需对接收信号进行 $Q$ 路解交织处理即可。

## 5 仿真分析

在本节比较了按照本文优化方法所设计的SCMA码本、华为公司的SCMA码本<sup>[16]</sup>及LDS<sup>[17]</sup>的性能。由于华为公司只提供了码本参数集为 $(J, M, N, K) = (6, 4, 2, 4)$ 的SCMA码本，因此，基于更多点数 $M$ 或更高维度 $N$ 的码本参数集所设计的SCMA码本，其性能只与LDS进行对比。仿真条件如表1所示。

表1 仿真条件

信道	高斯信道和瑞利衰落信道
信道编码	1/3码率Turbo编码
帧长 $L_{fr}$	1024 bit
帧数 $N_{fr}$	300
译码算法	Max-log MPA
Max-log MPA迭代次数	7

在高斯信道和瑞利衰落信道下，图4和图5分别给出了当码本参数集 $(J, M, N, K) = (6, 4, 2, 4)$ 时误比特(Bit Error Ratio, BER)性能曲线( $T=1536$ )。从图中可看出，在高斯信道还是瑞利衰落信道下，对于本文设计的SCMA码本，无论是否存在 $Q$ 路交织，其性能均优于文献[16]中的SCMA码本和LDS。

从图4中，当 $BER=10^{-3}$ 时，本文设计的SCMA码本在高斯信道条件下较文献[16]中SCMA码本有0.4 dB左右的性能提升，这是因为本文设计的码本能够使得叠加在单个资源块上的3个用户的星座图上星座点间的最小欧氏距离最大化。当 $BER=$

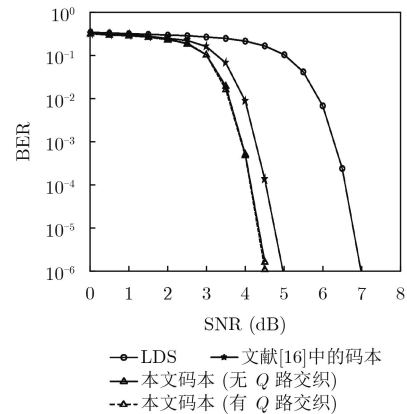


图4 高斯信道条件下不同码本的BER性能比较

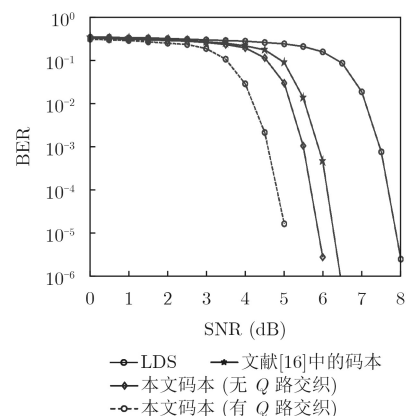


图5 瑞利信道条件下不同码本的BER性能比较

$10^{-3}$ 时，本文设计的SCMA码本相对于LDS存在大约2.2 dB的性能增益，这是因为LDS只是QAM符号的简单重复，而SCMA码本相较于LDS除具有编码增益外，还获得了额外的赋形增益。此外，还可看出： $Q$ 路交织不会影响本文设计的SCMA码本在高斯信道下的性能。

从图5中，在 $BER=10^{-3}$ 时，本文设计的无 $Q$ 路坐标交织的SCMA码本在瑞利衰落信道条件下，较文献[16]中的SCMA码本存在约0.4 dB的性能增益，较LDS约有1.8 dB的性能增益；而对于本文设计的有 $Q$ 路坐标交织SCMA码本，在瑞利衰落信道条件下，较文献[16]中的SCMA码本约有1.2 dB的性能增益，较LDS约有2.6 dB的性能增益。这是因为本文优化设计的SCMA码本融合了星座旋转和 $Q$ 路交织，使得设计出的各用户的码字符号具有更大的最小乘积距离和SSD阶数，提高了其对抗信道衰落的能力。同时，引入 $Q$ 路坐标交织后，在实现时难免会造成一定的译码延时，因此，存在 $Q$ 路交织的SCMA码本更适宜于对时延相对不敏感的业务。

图6和图7分别给出高斯信道和瑞利衰落信道条件下，码本参数集 $(J, M, N, K) = (6, 8, 2, 4)$ 和 $(6,$

16, 2, 4)时的BER性能曲线( $T$ 分别取1024和768)。码本参数集 $(J, M, N, K)$ 中 $M$ 决定了SCMA码本大小。从图中可看出,无论在瑞利信道下还是瑞利衰落信道下,当码本大小由8增至16时,本文优化设计的SCMA码本的BER随之增大。这是由于随着码本增大,使得叠加在单个资源块上的与多个用户对应的星座图上的星座点数增多,也就是说星座图上星座点变得更密集,导致干扰增大,因此性能下降。然而,在同等参数条件下,其性能依然明显优于LDS。此外,当码本增大时,融合了星座旋转和 $Q$ 路坐标交织的SCMA码本在瑞利衰落信道条件下性能提升更为明显,尽管 $Q$ 路坐标交织在高斯信道中并不带来任何性能增益。这说明,在衰落信道环境中,融合星座旋转和 $Q$ 路坐标交织的SCMA码本设计方法不失是一种比较明智的选择。

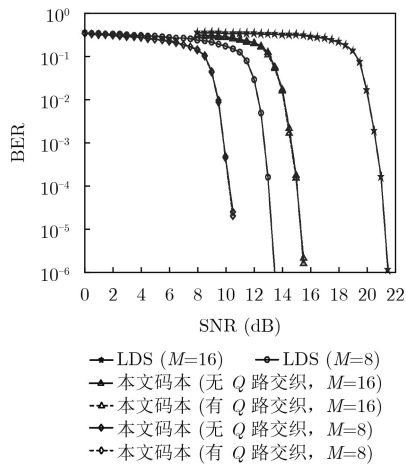


图6 高斯信道条件下SCMA码本大小不同时的BER性能对比

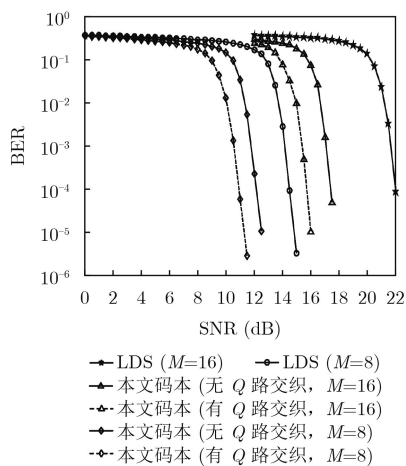


图7 瑞利信道条件下SCMA码本大小不同时的BER性能对比

图8和图9分别给出高斯信道和瑞利衰落信道条件下,码本参数集 $(J, M, N, K) = (6, 4, 3, 6)$ 和 $(8, 4, 4, 8)$ 时的BER性能曲线(帧长 $T=1536$ )。码本参数

集 $(J, M, N, K)$ 中 $N$ 决定了SCMA码本的维度。从图中可看出,系统的BER性能随着码本维度的增加而下降,这是由于随着码本维度的增大,在同等过载条件下,每个资源块上叠加的用户数增多,用户间干扰增大。然而,在同等参数条件下,本文优化设计的SCMA码本的性能明显优于LDS。此外,随着码本维度增大,存在 $Q$ 路坐标交织的SCMA码本在瑞利衰落下比无 $Q$ 路坐标交织的SCMA码本性能优势更为明显,尽管这点并不影响其在高斯信道下的性能。

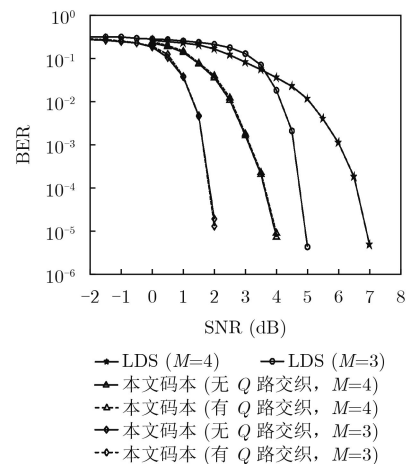


图8 不同维度SCMA码本在高斯信道条件下的BER性能对比

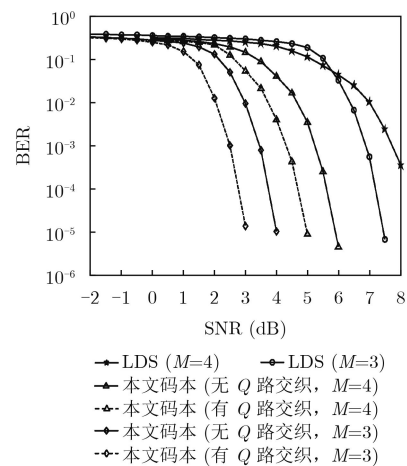


图9 不同维度SCMA码本在瑞利信道条件下的BER性能对比

## 6 结论

本文针对现有SCMA码本设计的缺陷,提出了一种SCMA码本优化设计方法。在该方法中,通过对基准星座、母星座、叠加在单个资源块上与各用户对应的总星座的旋转以及 $Q$ 路坐标交织技术,优化了母星座在各个维度上投影点间的最小欧氏距离,叠加在单个资源块上的总星座中与各用户对应

的星座图之间的最小欧氏距离以及与各用户对应的星座图中星座点间最小乘积距离和SSD阶数,从而有效地提升了SCMA码本抗高斯噪声及信道衰落的能力。此外,本文所提出的SCMA码本优化设计方法简单灵活,可通过适当的参数调整,以适应不同规模的通信场景需求。

### 参 考 文 献

- [1] DING Zhiguo, LEI Xianfu, KARAGIANNIDIS G K, *et al.* A Survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: Research challenges and future trends[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(10): 2181–2195. doi: [10.1109/JSAC.2017.2725519](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2725519).
- [2] HOSEIN N and BALIGH H. Sparse code multiple access[C]. IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, London, UK, 2013: 332–336. doi: [10.1109/PIMRC.2013.6666156](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2013.6666156).
- [3] ZHANG Shunqing, XU Qiuqiang, LU Lei, *et al.* Sparse code multiple access: An energy efficient uplink approach for 5G wireless systems[C]. IEEE Global Communications Conference, Austin, USA, 2014: 4782–4787. doi: [10.1109/GLOCOM.2014.7037563](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2014.7037563).
- [4] ZHANG Chenchen, LUO Yuan, and CHEN Yan. A low complexity SCMA detector based on discretization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(4): 2333–2345. doi: [10.1109/TWC.2018.2792425](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2792425).
- [5] 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. doi: [10.1109/LCOMM.2017.2752745](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2752745).
- [6] 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. doi: [10.11999/JEIT151259](https://doi.org/10.11999/JEIT151259).  
DU Yang, DONG Binhong, WANG Xianjun, *et al.* Multiuser detection scheme for SCMA systems based on serial strategy[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(8): 1888–1893. doi: [10.11999/JEIT151259](https://doi.org/10.11999/JEIT151259).
- [7] FORNEY G K and WEI L F. Multidimensional constellations. I. Introduction, figures of merit, and generalized cross constellations[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1989, 7(6): 877–892. doi: [10.1109/49.29611](https://doi.org/10.1109/49.29611).
- [8] TAHERZADEH M, HOSEIN N, BAYESTEH A. *et al.* SCMA codebook design[C]. IEEE 80th Vehicular Technology Conference, Vancouver, USA, 2014: 1–5. doi: [10.1109/VTCSpring.2016.7504489](https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2016.7504489).
- [9] BAO Jinchun, MA Zheng, MAHAMADU M A. *et al.* Spherical codes for SCMA codebook[C]. IEEE 83rd Vehicular Technology Conference, Nanjing, China, 2016: 1–5. doi: [10.1109/VTCSpring.2016.7504489](https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2016.7504489).
- [10] HAN Yu, WANG Zhenyong, LI Dezhi, *et al.* A novel multi-dimensional constellation design method based on lattices for sparse code multiple access[C]. IEEE 13th International Conference on Signal Processing, Chengdu, China, 2016: 1264–1269. doi: [10.1109/ISCP.2016.7878029](https://doi.org/10.1109/ISCP.2016.7878029).
- [11] YU Lisu, LEI Xianfu, FAN Pingzhi, *et al.* An optimized design of SCMA codebook based on star-QAM signaling constellations[C]. International Conference on Wireless Communications & Signal Processing, Nanjing, China, 2015: 1–5. doi: [10.1109/WCSP.2015.7341311](https://doi.org/10.1109/WCSP.2015.7341311).
- [12] ALAM M and ZHANG Qi. Performance study of SCMA codebook design[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, San Francisco, USA, 2017: 1–5. doi: [10.1109/WCNC.2017.7925767](https://doi.org/10.1109/WCNC.2017.7925767).
- [13] ALAM M and ZHANG Qi. Designing optimum mother constellation and codebooks for SCMA[C]. IEEE International Conference on Communications, Paris, France, 2017: 1–6. doi: [10.1109/ICC.2017.7996539](https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7996539).
- [14] BOUTROS J and VITERBO E. Good lattice constellations for both Rayleigh fading and Gaussian channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1996, 42(2): 502–518. doi: [10.1109/18.485720](https://doi.org/10.1109/18.485720).
- [15] BOUTROS J and VITERBO E. Signal space diversity: A power- and bandwidth-efficient diversity technique for the Rayleigh fading channel[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1998, 44(4): 1453–1467. doi: [10.1109/18.681321](https://doi.org/10.1109/18.681321).
- [16] Altera Innovation Asia website, Presentation 1st 5G algorithm innovation competition-ENV1.0-SCMA[OL]. <http://www.innov-ateasia.com/5g/en/gp2.html>. 2017.
- [17] BEEK J V D and POPOVIC B M. Multiple access with low-density signatures[C]. IEEE Global Telecommunications Conference, Honolulu, USA. 2009: 1–6. doi: [10.1109/GLOCOM.2009.5425243](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2009.5425243).

景小荣: 男, 1974年生, 博士, 教授, 主要研究方向多天线技术、非正交多址接入技术。  
陶红宝: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向非正交多址系统信号处理。