

基于混合优化策略的下行SCMA码本设计

黄 静

西华大学理学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年3月2日; 录用日期: 2026年3月26日; 发布日期: 2026年4月7日

摘 要

稀疏码多址(Sparse Code Multiple Access, SCMA)是一种很有前途的非正交多址接入技术, 可以在未来的机器型通信网络中实现大规模连接和高频谱效率。然而, 其性能在很大程度上取决于设计良好的多维码本。在本文中, 我们提出了一种基于混合优化策略的下行链路码本设计方案, 该方案可以在下行瑞利衰落信道上实现近乎最优的性能。通过检查成对错误概率(Pairwise Error Probability, PEP), 我们首先推导了稀疏码本在下行信道中基于Chiani界的符号误码率性能, 并将其作为码本优化的设计准则。然后, 使用球面打包(Sphere Packing, SP)的方法对母码本进行初始化。接下来, 通过混合优化策略, 即遗传顺序二次规划法(GA-SQP)得到增强后的母星座(Mother Constellation, MC)。最后通过旋转、交织获得多维码本。仿真结果表明, 在下行瑞利衰落信道中, 所提出的码本相较于Chen码本和Star-QAM码本具有更优的误码性能。

关键词

稀疏码多址接入, 误码率, Chiani界, 码本设计, 混合优化策略

Downlink SCMA Codebook Design Based on a Hybrid Optimization Strategy

Jing Huang

School of Science, Xihua University, Chengdu Sichuan

Received: March 2, 2026; accepted: March 26, 2026; published: April 7, 2026

Abstract

Sparse code multiple access (SCMA) is a promising non-orthogonal multiple access technology that can enable massive connectivity and high spectral efficiency in future machine-type communication networks. However, its performance is heavily dependent on well-designed multi-dimensional codebooks. In this paper, we propose a downlink codebook design scheme based on a hybrid

optimization strategy, which achieves near-optimal performance over downlink Rayleigh fading channels. By examining the Pairwise Error Probability (PEP), we first derive the Symbol Error Rate (SER) performance of the sparse codebook over downlink channels based on the Chiani bound, and establish it as the design criterion for codebook optimization. Then, the mother codebook is initialized using the sphere packing method. Subsequently, an enhanced mother constellation is obtained through a hybrid optimization strategy, namely a Genetic Sequential Quadratic Programming method. Finally, the multi-dimensional codebook is generated through rotation and interleaving. Simulation results demonstrate that the proposed codebook achieves performance gains over state-of-the-art codebooks in downlink Rayleigh fading channels.

Keywords

Sparse Code Multiple Access, Bit Error Rate, Chiani Bound, Codebook Design, Hybrid Optimization Strategy

Copyright © 2026 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

稀疏码多址接入在未来 6G 通信中是一种非常有竞争力的非正交多址接入方案,具有低延时、高频谱效率的特点,被广泛认为是支持大规模连接和增强未来机器型通信网络系统容量的有前途的候选技术。针对码本设计问题,较为常见的是基于正交调幅星座来设计码本,即将码本构造过程分为因子图矩阵设计、相位旋转角度设计以及母星座设计三个阶段[1]。除此之外,还有通过不同的智能优化算法对信号星座进行优化以及利用黄金角调制来构建多维母星座的 SCMA 码本[2] [3]。

在 SCMA 系统中,多用户检测是一个关键性问题,如何降低多用户检测的复杂度已经成为研究热点,现有研究提出了多种低复杂度的消息传递算法(Message Passing Algorithm, MPA) [4]和期望传播算法(Expectation Propagation Algorithm, EPA) [5]。Luo Qu, Liu Zilong 等人提出了一种基于端到端学习的 SCMA 设计框架(E2E-SCMA),并在此基础上得到了改进的稀疏码本和低复杂度解码器[6]。对于 SCMA 码本的设计方案,总体目标是设计一类误码率更低或者频谱效率更大的码本。Cai 等人提出了一种基于星座旋转的交织的 SCMA 设计方法[7],之后, Li 等人利用遗传算法和交织方法在 Star-QAM 基础星座上进行优化,得到了一类功率不平衡的 SCMA 码本[8]。Lei 等人以 Chernoff 界来构造 SER 性能,对单个资源元素处的基准星座群进行优化,得到了一种在低信噪比区域更优越的码本。本文则是在 Lei 等人的基础上进一步改进及优化[9]。

在现有码本方案中,本文重点关注两类具有代表性的对比基准。其一是 Chen 码本,该类码本的核心思想是在满足稀疏映射约束的前提下,引入功率不平衡机制,使不同维度或不同用户承载的能量分布不完全相同,从而在多用户叠加后拉开有效星座点间距,提升检测可分性。其二是 Star-QAM 码本。该类码本通常以 Star-QAM 基础星座为出发点,通过若干启发式规则(如固定相位旋转、经验交织和层级映射)构造多维稀疏码本,具有实现简单、结构清晰的优点,但其参数多依赖经验选择,缺乏直接面向真实误码性能的统一优化目标。

相比之下,本文方法的优势在于:不是从启发式几何规则或单一距离准则出发,而是直接基于下行瑞利衰落信道中的 SER 近似表达式建立优化目标函数,使星座参数优化与实际误码性能更紧密对应。

特别地, 已有研究多采用 Chernoff 界来近似 PEP, 但 Chernoff 界相对较松, 导致构造的目标函数与真实误码性能之间存在偏差。为此, 本文摒弃较宽松的 Chernoff 界, 创新性地采用更精确的 Chiani 界来构建 SER 目标函数, 并在此基础上结合球面打包初始化与 GA-SQP 混合优化求解, 从而得到性能更优的母星座。

本文的主要贡献如下:

- (1) 推导了基于 Chiani 界的下行 SCMA 系统 SER 近似表达式, 并将其作为码本优化准则;
- (2) 采用球面打包方法初始化母星座, 提高初始星座点分布的均匀性;
- (3) 利用 GA-SQP 混合优化策略获得增强母星座(AMC), 通过与 Chen 码本及 Star-QAM 码本比较, 验证了所提方法在下行瑞利衰落信道中的性能优势。

2. SCMA 系统及码本设计

考虑一个具有 L 个用户在 K 个正交资源上通信的下行链路 SCMA 系统, 其中 $L > K$, 过载因子 $\lambda = \frac{L}{K} > 1$ 。在发射端, SCMA 编码器将 $\log_2(M)$ 位比特流映射为从码本 $\chi_l \in \mathbb{C}^{K \times M}$ 中提取出来的码字, 该映射过程表示为

$$f_l: \mathbb{B}^{\log_2 M} \rightarrow \chi_l \in \mathbb{C}^{K \times M}, \quad (1)$$

其中, $\mathbb{B}^{\log_2 M}$ 表示维度为 $\log_2(M)$ 的二进制数集合, $\chi_l = \{x_{l,1}, x_{l,2}, \dots, x_{l,m}\}$ 表示第 l 个用户的码本集, $\mathbb{C}^{K \times M}$ 表示大小为 M 的 K 维复向量空间。

所有码本的 K 维复码字都是具有 N ($N < K$) 个非零元素的稀疏向量, 这样的稀疏向量可以减少用户间的信号干扰, 从而降低误码率(Bit Error Rate, BER)。假设码本集 χ_l 去掉零元素后得到母码本 $C \subset \mathbb{C}^N$, 从 C 中提取出一个长度为 N 的向量 \mathbf{c}_l , 因此可以进一步将 $\mathbb{B}^{\log_2 M}$ 到 C 的映射定义为

$$g_l: \mathbb{B}^{\log_2 M \times 1} \rightarrow C, \text{ 即 } \mathbf{c}_l = g_l(\mathbf{b}_l), \quad (2)$$

其中 $\mathbf{b}_l = [b_{l,1}, \dots, b_{l,\log_2 M}]^T \in \{-1, 1\}^{\log_2 M}$ 表示第 l 个用户瞬时输入的二进制消息向量。

因此, 对应的 SCMA 映射 f_l 可以表示为

$$f_l \equiv \mathbf{V}_l g_l, \text{ 即 } x_l = \mathbf{V}_l g_l(\mathbf{b}_l), \quad (3)$$

其中, $\mathbf{V}_l \in \mathbb{B}^{K \times N}$ 表示 n 维向量映射到 k 为稀疏 SCMA 码字的扩频矩阵。例如, 设计一个 $K=4, L=6, M=4, N=2$ 的 SCMA 系统的码本, 该系统的扩频矩阵可以表示为

$$\mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

L 个用户的 SCMA 码本的稀疏结构可以用因子图矩阵 \mathbf{F} 来表示, 其中 $\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_L] \subset \mathbb{B}^{K \times L}$, $\mathbf{f}_l = \text{diag}(\mathbf{V}_l \mathbf{V}_l^T)$ 。对应的因子图表示如图 1 表示。

在设计码本时, 目的就是找出 L 个映射函数 g_l ($l=1, \dots, L$), 按照某些标准, 如最小欧式距离(Minimum Euclidean Distance, MED)或最小乘积距离(Minimum Product Distance, MPD), 将映射函数 g_l 看作一个复码本生成矩阵来乘以用户 l 输入的消息向量 \mathbf{b}_l , 得到

$$\mathbf{c}_l = \mathbf{G}_l \mathbf{b}_l, \quad (5)$$

其中 $\mathbf{G}_l \in \mathbb{C}^{N \times \log_2 M}$ 表示用户 l 的码本生成矩阵。因此用户 l 的码本 χ_l 可以表示为

$$\boldsymbol{\chi}_l = \mathbf{V}_l \mathbf{G}_l \mathbf{C} \tag{6}$$

对于下行链路系统，基站发送的消息向量是由 L 个用户传输的信息通过叠加得到的，因此，用户 L 在下行链路经过复用后接收的信号可以表示为

$$\mathbf{y}_l = \text{diag}(\mathbf{h}_l) \sum_{l=1}^L \mathbf{V}_l \mathbf{G}_l \mathbf{b}_l + \mathbf{n}_l, \tag{7}$$

其中， $\mathbf{h}_l = (h_{l,1}, h_{l,2}, \dots, h_{l,K})^T \in \mathbb{C}^K$ 表示基站与第 l 个用户之间的信道向量； $\mathbf{n}_l = (n_{l,1}, n_{l,2}, \dots, n_{l,K})^T$ 表示均值为 $\mathbf{0}$ ，方差为 N_0 的加性高斯白噪声向量，即 $n_{l,k} \sim \text{CN}(0, N_0)$ ； $\text{diag}(\cdot)$ 表示取矩阵的主对角线元素作为对角矩阵。在下一节中，将会提出新的母码本构造方式及其优化方法，借此进一步降低码本的误码率。

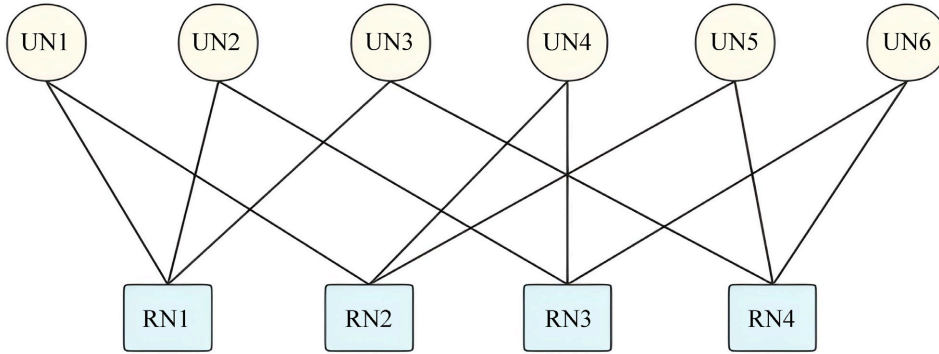


Figure 1. Factor graph representation of the spread spectrum matrix
图 1. 扩频矩阵的因子图表示

3. 构造稀疏码本的误差性能指标

在下行链路 SCMA 系统中，假设在传输 \mathbf{c}_i 时码字被错误解码为 \mathbf{c}_j ，其中 $\mathbf{c}_i \neq \mathbf{c}_j$ ，此时，两个不同码字 \mathbf{c}_i 与 \mathbf{c}_j 之间的成对差错概率(Pairwise Error Probability, PEP)可以表示为

$$\Pr(\mathbf{c}_i \rightarrow \mathbf{c}_j | \mathbf{h}) = Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{2N_0} d_{\text{sup}}^2(\mathbf{c}_i, \mathbf{c}_j)}\right), \tag{8}$$

其中 $Q(x)$ 为互补累积分布函数，即 $Q(x) = \int_x^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}t^2\right) dt$ ； $\frac{E_s}{N_0}$ 表示信噪比； $d_{\text{sup}}^2(\mathbf{c}_i, \mathbf{c}_j)$ 表示两个叠加码字之间欧氏距离的平方，即 $d_{\text{sup}}^2(\mathbf{c}_i, \mathbf{c}_j) = \sum_{k=1}^K |h_k|^2 |(c_{k,i} - c_{k,j})|^2$ 。

为了将复杂的 Q 函数转化为更易处理的指数函数形式，绝大多数学者对 Q 函数使用 Chernoff 界得到近似的 PEP，即 $Q(x) \leq \frac{1}{2} e^{-\frac{x^2}{2}}$ ，但这是一种较为宽松的上界。为了构建更精确的目标函数，我们采用 Chiani

等人提出的近似式[11]，即 $Q(x) \approx \frac{1}{12} e^{-\frac{x^2}{2}} + \frac{1}{4} e^{-\frac{2x^2}{3}}$ ，则 PEP 可以表示为

$$\begin{aligned} \Pr(\mathbf{c}_i \rightarrow \mathbf{c}_j | \mathbf{h}) &\approx \frac{1}{12} \exp\left(-\frac{E_s}{4N_0} d_{\text{sup}}^2(\mathbf{c}_i, \mathbf{c}_j)\right) + \frac{1}{4} \exp\left(-\frac{E_s}{3N_0} d_{\text{sup}}^2(\mathbf{c}_i, \mathbf{c}_j)\right) \\ &= \frac{1}{12} \exp\left(-\frac{E_s}{4N_0} \sum_{k=1}^K |h_k|^2 |(c_{k,i} - c_{k,j})|^2\right) + \frac{1}{4} \exp\left(-\frac{E_s}{3N_0} \sum_{k=1}^K |h_k|^2 |(c_{k,i} - c_{k,j})|^2\right). \end{aligned} \tag{9}$$

特别地, 在瑞利衰落信道中, 由于各个资源节点 RN 上的信道衰落是独立分布的, 因此(9)式可以进一步分解为

$$\begin{aligned} \Pr(\mathbf{c}_i \rightarrow \mathbf{c}_j | \mathbf{h}) &\leq \frac{1}{12} \prod_{k=1}^K \exp\left(-\frac{E_s}{4N_0} |h_k|^2 |(c_{k,i} - c_{k,j})|^2\right) \\ &\quad + \frac{1}{4} \prod_{k=1}^K \exp\left(-\frac{E_s}{3N_0} |h_k|^2 |(c_{k,i} - c_{k,j})|^2\right), \end{aligned} \quad (10)$$

再对所有信道求期望, 得到平均 PEP

$$\begin{aligned} \Pr(\mathbf{c}_i \rightarrow \mathbf{c}_j) &= E_{h_1, \dots, h_K} [\Pr(\mathbf{c}_i \rightarrow \mathbf{c}_j | h_1, \dots, h_K)] \\ &\approx \frac{1}{12} E_{h_1, \dots, h_K} \left[\prod_{k=1}^K \exp\left(-\frac{E_s}{4N_0} |h_k|^2 |(c_{k,i} - c_{k,j})|^2\right) \right] \\ &\quad + \frac{1}{4} E_{h_1, \dots, h_K} \left[\prod_{k=1}^K \exp\left(-\frac{E_s}{3N_0} |h_k|^2 |(c_{k,i} - c_{k,j})|^2\right) \right] \\ &\approx \frac{1}{12} \prod_{k=1}^K E_{h_k} \left[\exp\left(-\frac{E_s}{4N_0} |h_k|^2 |(c_{k,i} - c_{k,j})|^2\right) \right] \\ &\quad + \frac{1}{4} \prod_{k=1}^K E_{h_k} \left[\exp\left(-\frac{E_s}{3N_0} |h_k|^2 |(c_{k,i} - c_{k,j})|^2\right) \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

令 $s_k = \frac{E_s}{N_0} |(c_{k,i} - c_{k,j})|^2$, $H_k = |h_k|^2$, 则 PEP 简化为

$$\Pr(\mathbf{c}_i \rightarrow \mathbf{c}_j) \leq \frac{1}{12} \prod_{k=1}^K E_{H_k} \left[\exp\left(-\frac{s_k H_k}{4}\right) \right] + \frac{1}{4} \prod_{k=1}^K E_{H_k} \left[\exp\left(-\frac{s_k H_k}{3}\right) \right], \quad (12)$$

其中 H_k 服从指数分布, 其概率密度函数表示为 $p_{H_k}(x) = \frac{1}{\Omega_k} e^{-\frac{x}{\Omega_k}}$, $x \geq 0$. Ω_k 表示第 k 个 RN 上的平均信道功率增益, 即 $\Omega_k = E[H_k] = E[|h_k|^2]$.

最后计算概率密度函数 $p_{H_k}(x)$ 的 Laplace 变换, 得到

$$\begin{aligned} E_{H_k} \left[\exp\left(-\frac{s_k H_k}{4}\right) \right] &= L\{p_{H_k}(x)\} \left(\frac{s_k}{4}\right) = \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{\Omega_k} e^{-\frac{x}{\Omega_k}}\right) e^{-\frac{s_k}{4}x} dx \\ &= \frac{1}{\Omega_k} \int_0^{\infty} e^{-\left(\frac{1}{\Omega_k} + \frac{s_k}{4}\right)x} dx \\ &= \frac{1}{1 + \frac{s_k \Omega_k}{4}}, \end{aligned} \quad (13)$$

同理, $E_{H_k} \left[\exp\left(-\frac{s_k H_k}{3}\right) \right] = \frac{1}{1 + \frac{s_k \Omega_k}{3}}$, 将(11)式与(12)式结合, PEP 表示为

$$\Pr(\mathbf{c}_i \rightarrow \mathbf{c}_j) \approx \frac{1}{12} \prod_{k=1}^K \left(1 + \frac{E_s \Omega_k}{4N_0} |(c_{k,i} - c_{k,j})|^2\right)^{-1} + \frac{1}{4} \prod_{k=1}^K \left(1 + \frac{E_s \Omega_k}{3N_0} |(c_{k,i} - c_{k,j})|^2\right)^{-1}. \quad (14)$$

假设所有 RE 上的平均功率增益都归一化为 1, 即 $\Omega_k = 1$, PEP 进一步表示为

$$\Pr(\mathbf{c}_i \rightarrow \mathbf{c}_j) \approx \frac{1}{12} \prod_{k=1}^K \left(1 + \frac{E_s}{4N_o} |c_{k,i} - c_{k,j}|^2 \right)^{-1} + \frac{1}{4} \prod_{k=1}^K \left(1 + \frac{E_s}{3N_o} |c_{k,i} - c_{k,j}|^2 \right)^{-1}. \quad (15)$$

将所有的成对差错概率相加, 得到一个紧致的 BER 近似值, 并将其作为构造码本的优化目标函数

$$\begin{aligned} BER(\mathbf{C}) = & \sum_{i=1}^M \sum_{j=1, j \neq i}^M \frac{1}{12} \prod_{k=1}^K \left(1 + \frac{E_s}{4N_o} |c_{k,i} - c_{k,j}|^2 \right)^{-1} \\ & + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1, j \neq i}^M \frac{1}{4} \prod_{k=1}^K \left(1 + \frac{E_s}{3N_o} |c_{k,i} - c_{k,j}|^2 \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (16)$$

该目标函数是一个由码本星座点坐标 \mathbf{C} 和系统信噪比 $\frac{E_s}{N_o}$ 直接决定的, 不含积分或特殊函数并且是连续且处处可微的, 因此可以直接用于基于梯度的数值优化算法(如 SQP、梯度下降法等), 以设计出在瑞利衰落信道下具有最优 BER 性能的 SCMA 码本。

4. SCMA 码本设计与优化

在 SCMA 系统中, 母星座(Mother Constellation, MC)可以定义为如下形式

$$\mathbf{A}_{MC} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{A}_{d_f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,M} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{d_f,1} & a_{d_f,2} & \cdots & a_{d_f,M} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

其中 $d_f = \frac{L \cdot N}{K}$ 表示每个资源节点接入的用户数量, $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_{d_f}$ 表示子星座码本。由于球面打包(Sphere Packing, SP)能够在单位球面上尽可能均匀分布若干点上, 因此本文采用球面打包的方法初始化母星座, 保证更有效地最大化最小距离和码本方向的多样性。

以 $K=4, L=6, M=4, N=2$ 的通信系统为例, $\mathbf{A}_{MC} = [\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_3]^T$, 再对子星座引入旋转参数 b_1, b_2, b_3 , 通过旋转操作后的母星座码本表示为

$$\mathbf{A}_{MC} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \\ \mathbf{S}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \mathbf{A}_1 \\ b_2 \mathbf{A}_2 \\ b_3 \mathbf{A}_3 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

其中 $b_1 = e^{j*2\pi*\theta_1}, b_2 = e^{j*2\pi*\theta_2}, b_3 = e^{j*2\pi*\theta_3}$ 。

得到的子星座码本可以通过因子图矩阵 \mathbf{F} 分配给所有的资源节点, 因此 SCMA 系统的码本结构可以表示为

$$\mathbf{F}_S = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{S}_2 & \mathbf{S}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{S}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{S}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{S}_2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{S}_3 \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_3 & \mathbf{0} & \mathbf{S}_2 & \mathbf{0} & \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{S}_3 & \mathbf{S}_1 & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

再通过交织操作[10], 得到 L 个用户的码本集。

最终通过混合优化策略——遗传顺序二次规划法(GA-SQP), 该方法充分利用了 GA 的全局探索能力以避免陷入局部最优, 同时利用了 SQP 基于梯度的快速收敛能力进一步提高优化效率和精度, GA-SQP 兼具全局搜索能力和局部收敛速度, 优化的详细过程如表 1 所示。

Table 1. SCMA codebook optimization framework based on genetic order quadratic programming method
表 1. 基于遗传顺序二次规划法的 SCMA 码本优化框架

<p>算法: 基于遗传顺序二次规划法的 SCMA 码本优化框架</p> <p>输入: GA 基本参数(种群大小 N_p, 交叉概率 p_c, 变异概率 p_m 和最大迭代次数 G_{\max})和优化参数的上界 L_b 及下界 U_b</p> <p>输出: 旋转参数 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 及各用户码本 χ_i</p> <ol style="list-style-type: none"> 步骤 1: 使用遗传算法进行全局搜索 (1) 初始化: 生成一个 N_p 个个体的初始种群 P, 对每个个体 $i = 1, 2, \dots, N_p$ 在边界 $[L_b, U_b]$ 内随机初始化位置向量 θ_i 计算适应度值 $f(\theta_i)$ (2) 迭代进化: for $g = 1$ to G_{\max} do 交叉: 从种群 P 中选择父代, 以 p_c 应用交叉算子, 生成子代种群 P_c 变异: 从种群 P 中选择父代, 以 p_m 应用变异算子, 生成变异种群 P_m 选择精英: 合并种群($P_{new} \leftarrow P \cup P_c \cup P_m$), 根据 $f(\theta_i)$ 对 P_{new} 排序 从 P_{new} 中选择最优的 N_p 个个体, 更新成为下一代种群 P end for (3) 结果: $\theta_{GA} \leftarrow$ 最终种群 P 中 $f(\theta_i)$ 最低的个体的位置向量 步骤 2: 使用序列二次规划进行局部精炼 设置 SQP 求解器的初始点: $\theta_0 = \theta_{GA}$, 并求解式(11)中的优化问题 得到 $\theta_{SQP} \leftarrow$ SQP 求解器返回的解向量
--

5. 仿真结果

在本节中, 先对比了在相同信噪比(本文以 $\text{SNR} = 16 \text{ dB}$ 为例)下 Chiani 界与 Chernoff 界的误码率大小, 由图 2 可知 Chiani 界的信噪比明显低于 Chernoff 界。

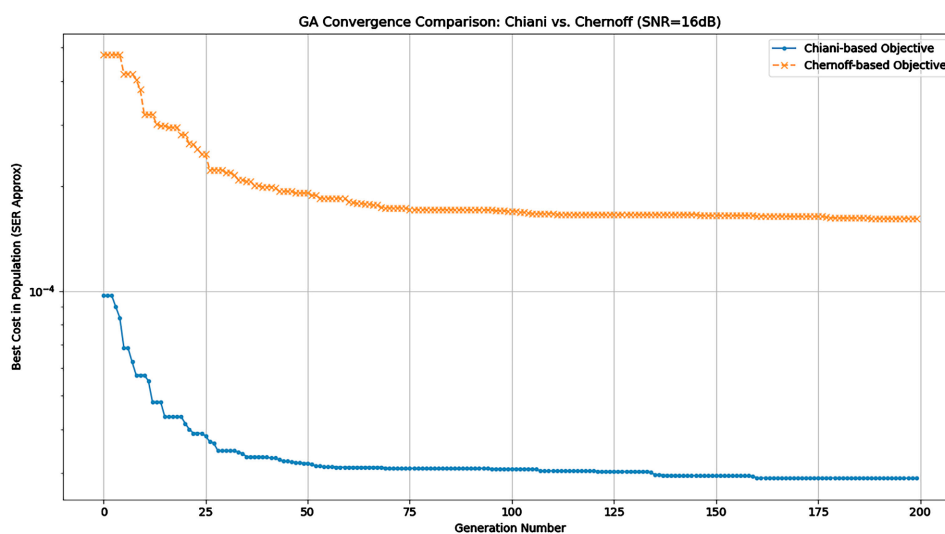


Figure 2. Comparison of bit error rates between Chiani and Chernoff boundaries
图 2. Chiani 界与 Chernoff 界误码率对比

再将提出的 Chiani 界 SCMA 码本的 SER 性能同 Chen 码本[8]和 Star-QAM 码本[11]进行比较, 仿真结果如图 3, 显示所提出的码本在下行瑞利衰落信道中相比其他三种码本具有更好的性能。具体表现在, 当 BER 为 10^{-5} 时, 所提出的码本信噪比相较于 Chen 码本和 Star-QAM 码本分别提升了 3.6 dB、0.48 dB。

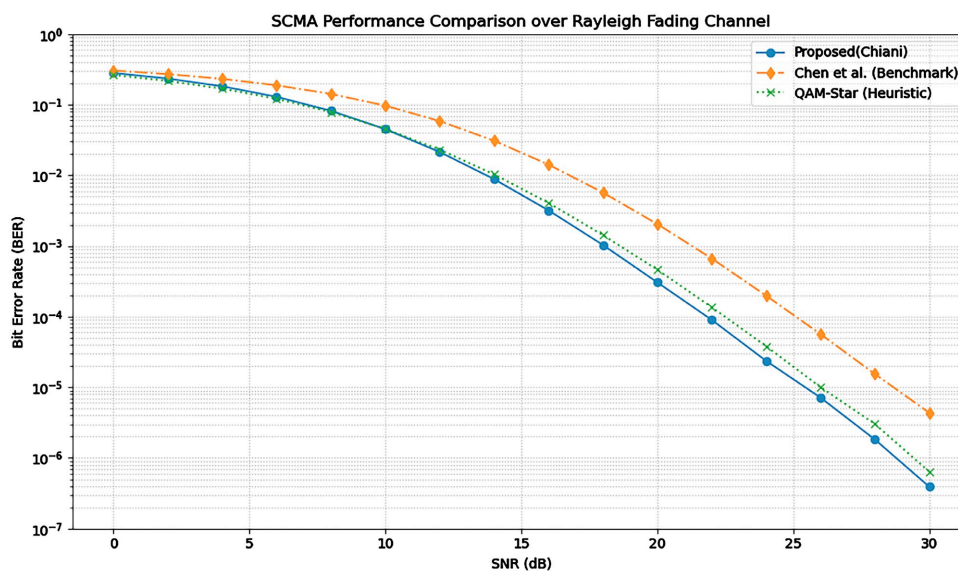


Figure 3. The bit error rate of the proposed codebook is compared with the other two codebooks
图 3. 所提出码本与其他两种码本的误码率对比

6. 总结

本文提出了一种用于衰落信道下行 SCMA 系统的下行链路码本优化方案。利用 Laplace, 我们推导了瑞利衰落信道条件下 SCMA 的简化 SER 模型。该模型可作为优化码本的设计准则。随后, 我们使用球面打包对母星座初始化, 再使用遗传顺序二次规划法对母星座进行了优化。最后通过对比以 Chernoff 界构造出的码本、Chen 码本与 QAM-Star 码本的 BER, 仿真结果表明, 所提出的码本在瑞利衰落信道中具有优越性。

参考文献

- [1] Yu, L., Lei, X., Fan, P. and Chen, D. (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>
- [2] Klimentyev, V.P. and Sergienko, A.B. (2017) SCMA Codebooks Optimization Based on Genetic Algorithm. 2017 *The European Wireless Conference*, Dresden, 20-21 July 2017, 1-6.
- [3] 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>
- [4] Cheng, H., Zhang, C., Huang, Y. and Yang, L. (2022) Efficient Message Passing Receivers for Downlink MIMO-SCMA Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **71**, 5073-5086. <https://doi.org/10.1109/tvt.2022.3151936>
- [5] Wang, P., Liu, L., Zhou, S., Peng, G., Yin, S. and Wei, S. (2020) Near-Optimal MIMO-SCMA Uplink Detection with Low-Complexity Expectation Propagation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **19**, 1025-1037. <https://doi.org/10.1109/twc.2019.2950314>
- [6] Luo, Q., Liu, Z., Chen, G., Ma, Y. and Xiao, P. (2022) A Novel Multitask Learning Empowered Codebook Design for Downlink SCMA Networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, **11**, 1268-1272. <https://doi.org/10.1109/lwc.2022.3163810>
- [7] Cai, D., Fan, P., Lei, X., Liu, Y. and Chen, D. (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>
- [8] Li, X., Gao, Z., Gui, Y., Liu, Z., Xiao, P. and Yu, L. (2022) Design of Power-Imbalanced SCMA Codebook. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **71**, 2140-2145. <https://doi.org/10.1109/tvt.2021.3132698>
- [9] Lei, T., Ni, S., Luo, Q., Chen, S., Song, X. and Xiao, P. (2024) A Progressive Codebook Optimization Scheme for Sparse Code Multiple Access in Downlink Channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **73**, 13038-13046. <https://doi.org/10.1109/tvt.2024.3387477>
- [10] Chen, Y.M. and Chen, J.M. (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>
- [11] Chiani, M., Dardari, D. and Simon, M.K. (2003) New Exponential Bounds and Approximations for the Computation of Error Probability in Fading Channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **24**, 840-845. <https://doi.org/10.1109/twc.2003.814350>