

VBR-GAM的SCMA高维度码本设计

邓旭, 储珂, 朱立东

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要: 在物理层, 为了解决海量用户接入问题而使用稀疏码多址接入 (Sparse Code Multiple Access, SCMA) 技术。现阶段有关SCMA的研究中, 除了SCMA多用户检测技术的研究, 还会关注SCMA系统码本设计, 性能良好的SCMA码本不仅能在多用户检测过程中提升其抗噪性能, 而且能够降低检测复杂度。传统的码本设计方案主要针对低维度码本进行研究, 而且所设计的码本方案大部分都是基于QAM、TCM、Lattice展开的, 对于高维度码本很少涉足与研究。对此主要聚焦一种新型码本设计——黄金角度调制 (Golden Angle Modulation, GAM), 并在此基础上提出可变比特率 (Variable Bit Rate, VBR) GAM码本设计。仿真结果表明VBR-GAM码本可以灵活满足不同业务的需求, 也可以通过改变调制阶数来改变不同优先级用户的功率效率, 从而实现码本的变速率传输, 相比传统的GAM码本性能更优, 可实现更低的误码率。

关键词: 星地5G融合网络; 稀疏码多址接入; 码本设计; 黄金角度调制; VBR-GAM码本

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023010

SCMA High-Dimensional Codebook Design Based on VBR-GAM

DENG Xu, CHU Ke, ZHU Lidong

National Key Laboratory of Science and Technology on Communications of UESTC, Chengdu 611731, China

Abstract: At the physical layer, sparse code multiple access (SCMA) technology is used to solve the problem of massive user access. In the current research on SCMA, in addition to the research on SCMA multi-user detection technology, more attention will be paid to the design of SCMA system codebooks. SCMA codebook with good performance can not only improve its anti noise performance in the process of multi-user detection, but also reduce the detection complexity. The traditional codebook design scheme is mainly researched on low-dimensional codebooks, and most of the designed codebook schemes are based on QAM, TCM, and Lattice, while few people have set foot in and studied high-dimensional codebooks. A new codebook design - Golden Angle Modulation (GAM) was mainly focused on, and on this basis, proposed a Variable Bit Rate (VBR) GAM codebook design method. The simulation results showed that the VBR-GAM codebook could flexibly met the needs of different services. With the increased of the modulation order, the VBR-GAM codebook had better performance than the traditional GAM codebook.

Keywords: integrated terrestrial-satellite 5G network, sparse code multiple access, codebook design, golden angle modulation, VBR-GAM codebook

0 引言

星地融合网络的发展近些年备受人们的关注^[1]。在无线移动通信系统的接收端, 如何对海量用户进行准确检测与识别, 满足日益增长的物联网海量数据接入要求也是亟须解决的问题。卫星通信技术发展以来大多采用正交多址的方式, 该方式可以保证信号相互独立互不干

扰, 通过同一基站对用户进行识别从而满足各个用户间的相互通信需求。然而相互独立的信号之间没有交集, 导致有限的信道容量中可容纳的用户数量相当受限, 为此非正交多址技术成为人们研究的焦点。目前稀疏码多址接入 (Sparse Code Multiple Access, SCMA) 技术备受人们的关注, 该技术是在低密度签名正交频分复用 (Low Density

收稿日期: 2022-10-15; **修回日期:** 2023-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61871422)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61871422)

Signature-Orthogonal Frequency Division Multiplexing, LDS-OFDM) 技术的基础上发展而来的^[2]。SCMA技术通过码域的非正交接入, 极大地提升了接入终端的数目, 同时还提供了更大的分集增益和编码增益, 而其低复杂度的检测器保持了接近最优的性能。SCMA技术作为未来通信系统一种颇具竞争力的非正交多址接入方式, 能够实现大连接、低时延、高效率的发展要求。因此面向天地一体化信息网络也有较好的应用前景。

现阶段SCMA技术主要从多用户检测算法复杂度降低以及SCMA系统码本设计两个方面进行研究。性能良好的SCMA码本不仅能在多用户检测过程中提升其抗噪性能, 而且能够降低检测复杂度。针对SCMA系统码本设计, 参考文献[3]基于星形QAM (Star-QAM) 星座点提出了一种对母码本 (Mother Codebooks, MC) 优化方法, 该Star-QAM调制方式归纳出了MC中星座点之间的最小欧式距离表达式, 通过选择合适的参数可以使得星座点之间的欧式距离最大化, 从而提高SCMA系统性能。相比传统的QAM调制方式, 该算法引入了圆形幅度和相位键控, 在功率受限的系统中其抗噪性能更优。参考文献[4]介绍了传统T16QAM码本设计, 并在此基础上设计了I型、II型、III型低峰均比 (Peak to Average Power Ratio, PAPR) 码本设计方案, 仿真结果表明T16QAM码本性能最优, II型、III型码本的PAPR最小, I型码本平均功率最低, III型码本复杂度最低, 可以针对不同场景对I型、II型、III型码本进行灵活选择。参考文献[5]基于网格编码调制 (Trellis Coded Modulation, TCM) 方式进行码本设计。该算法首先通过PSK调制方式得到总星座图, 并采用一定规则的子集分割思想将星座点进行划分, 然后结合星座矩阵最终生成用户对应的码本。仿真结果表明, 通过TCM设计的码本不仅可以使系统总体性能有所提升, 而且在高过载率条件下也能保持优良性能。参考文献[6]基于艾森斯坦整数进行码本设计。该算法依据其在复平面上的正六边形特性, 选择合适的半径环来构造星座点, 该星座点与每个资源块上承载的用户数一一对应, 这样最终即可得到总星座图, 仿真结果表明所提算法构造的码本具有较好的成型增益。参考文献[7]研究了signature矩阵的设计规则, 并在此基础上分别构造了“Latin”矩阵和“Semi-Latin”矩阵。仿真结果表明“Latin”矩阵构造的不同码本系统性能优于“Semi-Latin”矩阵构造的码本。

本文针对更高维度的码本设计, 提出一种基于GAM的分割扩展母码本 (Divide Dextended Mother Codebook, DEMC) 来构造SCMA码本。首先通过引入码字中符号间的功率和相位依赖关系, 生成扩展母码本 (EMC); 然

后根据调制指数 M 的不同将EMC分割成若干个母码本; 最后将对应的码本分配给对应的用户即可得到可变比特率的VBR-GAM码本, 从理论分析可以看出VBR-GAM的码本结构与传统的GAM码本结构是兼容的。仿真结果表明VBR-GAM码本可以灵活满足不同业务的需求, 且可以通过不同的调制技术实现误码率的进一步降低。

1 SCMA系统模型

SCMA码本的优化问题可以描述为^[8]

$$\mathbf{V}^*, \mathbf{g}^* = \arg \max_{\mathbf{V}, \mathbf{g}} D(\mathbf{S}(\mathbf{V}, \mathbf{g}; J, M, N, K)) \quad (1)$$

其中, D 表示设计准则, $\mathbf{S}(\mathbf{V}, \mathbf{g}; J, M, N, K)$ 表示SCMA的码字组成。

通过映射矩阵即可确定每个资源块上复用的用户个数及其所处位置, 其稀疏特性也决定了MPA检测算法的计算复杂度^[7]。映射矩阵 $\mathbf{V}$ 的设计规则如下

$$\mathbf{V}_j \in \mathbb{B}^{K \times d_v} \quad (2)$$

$$\mathbf{V}_i \neq \mathbf{V}_j, \forall i \neq j \quad (3)$$

$$\mathbf{V}_j^{[0]} = \mathbf{I}_{d_v} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{V}_j^{[0]}$ 指的是 $\mathbf{V}_j$ 除去全0行。由于式(1)的优化问题不易直接求解, 所以参考文献[2]采用了次优解。该方法在初始阶段生成多维调制星座^[9-10], 随后将得到的星座与多个稀疏码本进行一一对应, 这样码本优化问题可进一步简化为

$$\mathbf{g}^* = \arg \max_{\mathbf{g}} D(\mathbf{S}(\mathbf{V}^*, \mathbf{g}; J, M, d_v, K)) \quad (5)$$

在此基础上假设每层用户对应的星座点由旋转操作得到, 即

$$\mathbf{g}_j = (\Delta_j) \mathbf{g}, \forall j \quad (6)$$

其中, Δ_j 表示进行星座变换的操作符。结合式(5)和式(6), SCMA系统的码本优化问题最终可转换为

$$\mathbf{g}^*, [\Delta_j]_{j=1}^J = \arg \max_{\mathbf{g}, [\Delta_j]_{j=1}^J} m(\mathbf{S}(\mathbf{V}^*, \mathbf{g} = [(\Delta_j) \mathbf{g}]_{j=1}^J; J, M, N, K)) \quad (7)$$

根据式(7), 即可获取母星座和星座算符。

图1给出了16点SCMA母星座构造实例, 首先对两个结构相同的2维基础星座进行星座旋转操作, 该操作必须尽可能最大化星座点间的欧氏距离^[8]。之后将X1、X2和Y1、Y2进行坐标置换, 即可得到重新排列组合后的2维16点SCMA母星座。

2 黄金角度GAM调制

传统的码本设计方案主要还是针对 4×6 的低维度码

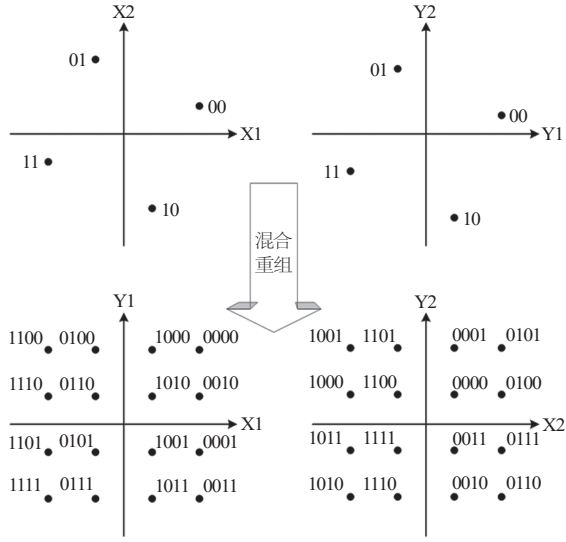


图1 16点SCMA母星座构造实例

本进行研究,而且所设计的码本方案大部分在QAM、TCM、Lattice上展开,而对于高维度码本很少有人涉足与研究,对此本文主要聚焦一种新型码本设计——黄金角度调制(Golden Angle Modulation, GAM)。

参考文献[11]从花瓣、叶子的螺旋结构中得到启发,提出了一种形状多样、圆形对称的调制方式——GAM,现有的传统调制随着信噪比的增加其所达到的容量与香农极限相比有 $\pi e/6 \approx 1.53$ dB的差距,而GAM在高信噪比条件下能弥补这个差距并趋近于香农极限。

GAM自身拥有很多特性。

(1) 天生星座点索引具有唯一性。相比其他APSK、QAM调制方式没有固定索引排序而言,GAM只需通过信号相位或半径即可实现星座点的唯一标识。

(2) 星座点分布接近理想圆形设计。圆形的星座点设计可以提供更高的互信息、最小欧氏距离、误符号率、PAPR性能。

(3) GAM在保持均匀分布的同时,星座点呈径向对称分布。

(4) 旋转(和增益)不变量:每个信号星座都有一个唯一可识别的相位和增益。

SCMA码本的设计完全可以依据GAM特性进行选择。首先每个星座点的复振幅与指数的关系是唯一确定的,据此即可确定星座点之间的功率分集;其次可以从GAM的低峰均比中受益,通过GAM星座点和SCMA码本对应元素的映射关系,构建低峰均比的SCMA码本。

假设GAM中有 N 个星座点,每个星座点被调制的概率都相等,均为 $p_n = 1/N$,则第 n 个星座点可表示为

$$s_n = r_n e^{j2\pi\varphi n}, n = \{1, 2, \dots, N\} \quad (8)$$

其中, r_n 为第 n 个星座点的半径, $2\pi\varphi n$ 表示为GAM的弧度值, $\varphi = 1 - (\sqrt{5} - 1)/2$ 。根据 r_n 设计方式的不同,可将GAM分成圆盘型GAM和几何钟型GAM^[11]。

(1) 圆盘型GAM

圆盘型GAM,也称作不塑性GAM,是GAM的基准设计方式。如果 r_n 或者 p_n 其中之一发生改变,则会导致该星座发生转变。当 p_n 固定不变时,即 $p_n = 1/N$,对于第 n 个星座点的半径可表示为

$$r_n = c_{\text{disc}} \sqrt{n}, n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (9)$$

$$c_{\text{disc}} = \sqrt{\frac{2\bar{P}}{N+1}} \quad (10)$$

其中, $\bar{P}$ 为平均功率约束,此外从式(10)可以推出平均功率的归一化为

$$\bar{P} = \sum_{n=1}^N p_n r_n^2 = \sum_{n=1}^N \frac{1}{N} n = c_{\text{disc}}^2 \frac{N+1}{2} \quad (11)$$

结合式(9)、式(10)和式(11)可得到圆盘型GAM星座图,如图2所示。

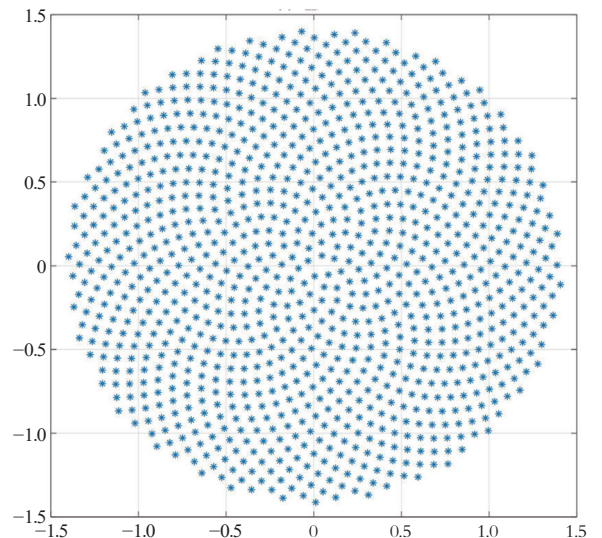
(2) 几何钟型GAM

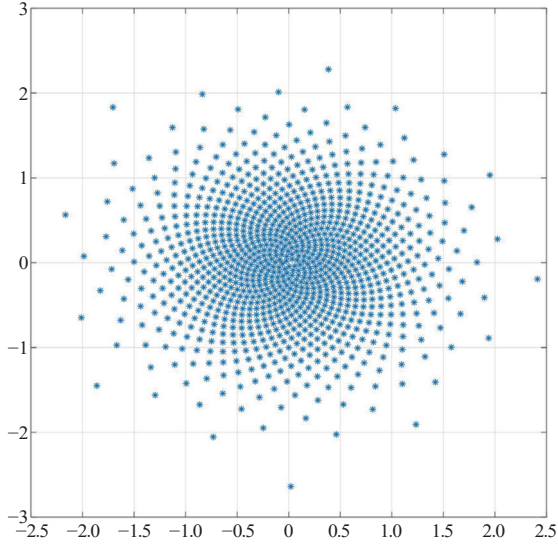
几何钟型GAM和圆盘型GAM一样假设 $p_n = 1/N$,对于第 n 个星座点的半径可表示为

$$r_n = c_{\text{gb}} \sqrt{\ln\left(\frac{N}{N-n}\right)}, n \in \{0, 1, \dots, N-1\} \quad (12)$$

$$c_{\text{gb}} = \sqrt{\frac{N\bar{P}}{N \ln N - \ln(N!)}} \quad (13)$$

由此可以得到几何钟型GAM星座图,如图3所示。

图2 圆盘型GAM星座图 $N = 2^{10}$

图3 几何钟型GAM星座图 $N = 2^{10}$

3 基于VBR-GAM的高维度码本设计

在传统的码本设计过程中，所有用户都具有相同大小的码本，这样的码本可以称为恒比特率（Constant Bit Rate, CBR）码本，但是这样的设计限制了SCMA的发展与应用。本节使用DEMC方法来设计不同规模的可变比特率（Variable Bit Rate, VBR）SCMA码本。

VBR码本有以下几点优势。

（1）VBR码本具有兼容性。通过VBR构造的SCMA码本与CBR码本具有相同的码本结构，因此可以使用消息传递算法进行多用户检测。

（2）VBR码本能够灵活地满足各种不同业务的需求。由于涉及的信道条件或仿真场景可能会十分复杂，而VBR码本又能向用户提供不同调制方式的符号速率，因此该方式生成的码本更能自适应满足不同用户的业务需求。

（3）VBR码本具有高效的传输速率。用户完全可以在不增加传输功率和带宽的情况下，申请高阶码本以获取更高的信息传输速率。

本节提出一种基于GAM的分割扩展母码本的方法来构造SCMA码本。首先通过引入码字中符号间的功率和相位依赖关系，生成扩展母码本。然后根据调制阶数 M 的不同将EMC分割成若干个母码本，最后将对应的码本分配给对应的用户即可。

3.1 VBR码本的设计规则

在自适应信息传输速率通信系统中，VBR码本可以灵活地满足业务需求。然而传统的SCMA码本只提供从

单个母码本推导而来的CBR码本，为了设计VBR码本只能放弃现有的SCMA码本设计过程，通过DEMC构造一种具有不同调制顺序的新型码本，可以提供不同的传输速率。为了与传统的CBR-SCMA码本兼容，新的码本设计方法遵循以下3个原则。

原则1：每个资源块使用的符号数量相同，即CBR码本与VBR码本具有相同的因子矩阵。

原则2：引入参数 $\gamma = K / N$ 。 γ 表示分组数量，其中 K 和 N 的取值必须满足 γ 是一个整数，这样有助于在VBR码本设计中有效划分EMC。

原则3：所用用户都应被分到对应分组里，且每个用户能且只能与一个分组进行对应，被分配到同一个分组里的用户应具有相同的调制系数。

满足这3个原则后即可对VBR码本进行设计。

3.2 构建DEMC

有关VBR-GAM码本设计仍采用圆盘型GAM，首先生成初始星座点的数量为

$$N_p = \frac{M_1 + M_2 + \dots + M_{d_f}}{2} \quad (14)$$

其中， $M_1, M_2, \dots, M_{d_f}$ 为不同用户的调制系数，这样可以得到第 n 个星座点的调制符号为

$$y_{n_p} = r_{n_p} e^{j2\pi\eta n_p}, n_p = 1, 2, \dots, N_p \quad (15)$$

$$r_{n_p} = c_{\text{disc}} \sqrt{n_p} \quad (16)$$

将所得调制符号添加旋转因子 $\phi_f = e^{j(n-1)/N}$ ，进一步优化星座图

$$Y_{n,:} = y \cdot e^{j(n-1)/N}, n = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

然后进一步引入码字中符号间的功率和相位依赖关系，通过引入相关性减少旋转、迭代、最大化最小欧氏距离等操作，降低运算复杂度

$$Y_{n+N/2,:} = \angle Y_{n,:} \cdot \text{fliplr}(|Y_{n+N/2,:}|), n = 1, 2, \dots, N \quad (18)$$

由于圆盘型GAM具有对称性，所以可以直接生成另一半调制符号

$$Y' = -Y \quad (19)$$

紧接着将所得到的 Y 和 Y' 进行交织操作，即可得到所需扩展母码本为

$$\begin{aligned} \text{EMC}_{:,1:2:N_p \times 2} &= Y \\ \text{EMC}_{:,2:2:N_p \times 2} &= Y' \end{aligned} \quad (20)$$

最后将扩展母码本进行分割。由于一个用户不会占用由因子矩阵决定的所有资源，如果此时任意设置用户的调制顺序，这样每个资源块上所叠加的星座点个数将不能保持一致，而且还会增加码本设计的复杂度，所以

依据用户索引从小到大的顺序进行调制,调制阶数也随着索引从小到大增加。有关VBR码本分段过程由式(21)确定

$$\text{MC}^{(k)} = \text{EMC}_{1,1+\sum_{a=1}^{k-1} M_{a^* \gamma}; \sum_{a=1}^k M_{a^* \gamma}}, \quad k=1,2,\dots,d_f \quad (21)$$

其中, $\gamma = K/N$, 并且规定 $\sum_{a=1}^0 M_{a^* \gamma} = 0$ 。在此步骤中, 如果将这些取反得到的调制符号分配至不同的码本中, 在接收端可能会出现相同的调制符号重叠在一块的情况, 这将导致SCMA在解调过程中产生混淆。为了避免该问题的出现, 需要将这些相反的调制符号分配至同一个码本。这样不仅能将各个调制符号区分开, 而且还能增大码字间的最小欧式距离。

这里可以举一个简单例子来区分CBR码本与VBR码本, 假设均采用式(22)因子图进行设计。

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

CBR的调制阶数为 $M=4$, VBR的调制阶数分别为 $M_1=2, M_2=4, M_3=8$, CBR码本与VBR码本比较见表1。

表1 CBR码本与VBR码本比较

码本	资源块	组1		组2		组3		星座点总数/个
		U1	U2	U3	U4	U5	U6	
CBR	RN1	0	4	4	0	4	0	12
	RN2	4	0	4	0	0	4	12
	RN3	0	4	0	4	0	4	12
	RN4	4	0	0	4	4	0	12
VBR	RN1	0	2	4	0	8	0	14
	RN2	2	0	4	0	0	8	14
	RN3	0	2	0	4	0	8	14
	RN4	2	0	0	4	8	0	14

由表1中信息可以看出, 无论是CBR码本还是VBR码本, 每个资源块上所叠加的星座点个数是一样的。生成VBR码本后, 在实际应用中用户可以根据自己的业务需求申请不同的码本。如果用户需要提高传输速率, 完全可以在CBR调制阶数为 $M=4$ 的基础上提高到 $M=8$, 在特殊情况下用户甚至可以分配多个码本来满足更高速率的通信要求。如果需要降低SCMA系统译码端的算法复杂性, 用户可以选择更低调制阶数 $M=2$ 进行通信。所以在自适应信息传输速率通信系统中, VBR码本比CBR码本更加灵活高效。

3.3 生成各用户码本

为了提高系统误码率性能, 进一步基于最大欧式距离或最大积距离对MC码字中不同资源块间的符号进行配对, 并通过尝试所有可能的组合找到最优解。暴力求解策略的计算复杂度为 $d_f \cdot (M!)^{N-1}$, 随着码本规模的增加, 显然这种暴力求解的方式并不可行。然而通过引入功率和相位相关约束将调制符号进行一一配对, 即可大大降低译码算法的计算复杂度。这类类似于CDMA中引入的扩频技术, 可以进一步提高系统误码率性能。最终生成的各用户码本可表示为^[12]

$$x_j = V_j \cdot \text{MC}^{\left\lfloor \frac{(j-1)d_f}{J} + 1 \right\rfloor}, \quad j=1,2,\dots,J \quad (23)$$

综上, 可得到VBR-GAM的码本设计算法, 具体见算法1。

算法1 VBR-GAM的码本设计算法

输入: N, K, J, d_f 和 $M_j, j \in \{1, 2, \dots, J\}$

1: 计算 $\gamma = K/N$

2: 根据调制顺序将用户划分为 d_f 组

3: 计算初始星座点数 $N_p = (M_1 + M_2 + \dots + M_{d_f})/2$

4: 根据式(15)、式(16)生成 N_p 个调制符号 y

5: 根据式(18)、式(19)、式(20)生成EMC

6: for $k=1:d_f$ do

7: 根据式(21)生成 $\text{MC}^{(k)}$

8: end for

9: for $j=1:J$ do

10: 根据式(22)生成各用户码本

11: end for

12: 输出: 各用户码本 $x_j, j=1, 2, \dots, J$

4 仿真参数及结果分析

为了验证所设计码本的性能, 将其与传统GAM码本——即CBR-GAM码本进行系统性能仿真对比。仿真中各参数的设置见表2。

图4和图5分别展示了调制阶数为4和8时不同维度下的CBR码本和VBR码本BER性能对比。其中当调制阶数为4时, VBR-GAM码本采用了 $M=2$ 和 $M=4$ 的不同调制方式; 而当调制阶数为8时, VBR-GAM码本采用了 $M=2$ 、 $M=4$ 和 $M=8$ 的不同调制方式。

由图4可知, 除了过载率 $\lambda=200\%$, 其他维度下的CBR-GAM码本BER性能都会优于不同调制阶数的VBR-GAM码本, 这是因为 $M=4$ 的调制方式每个用户在星座图上只占有4个星座点, 当用户数量较少时星座点之间的最小欧式距离较大, 不容易造成译码错误; 而随

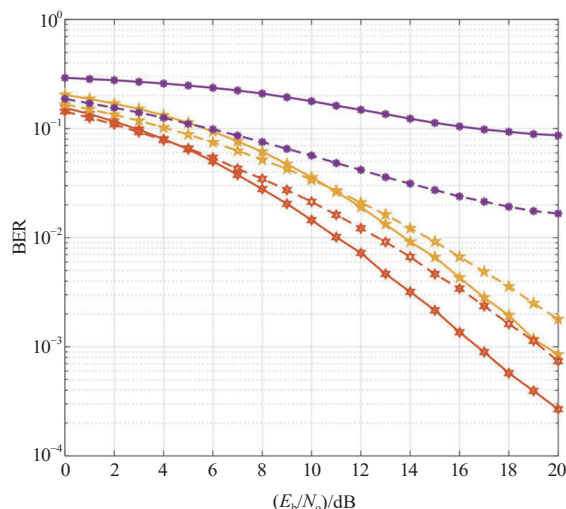
表2 仿真参数

参数	取值
资源块数 K	8块
每个用户码本的非零维数 d_u	2
过载率 λ	150%、200%、250%
每个资源块上复用的用户数 d_r	3个
每个用户码本的非零维数 d_u	2
最大迭代次数 N_{iter}	1次、5次
信道条件	Rayleigh信道
各码本设计	CBR-GAM、VBR-GAM码本
检测算法	并行调度MPA算法

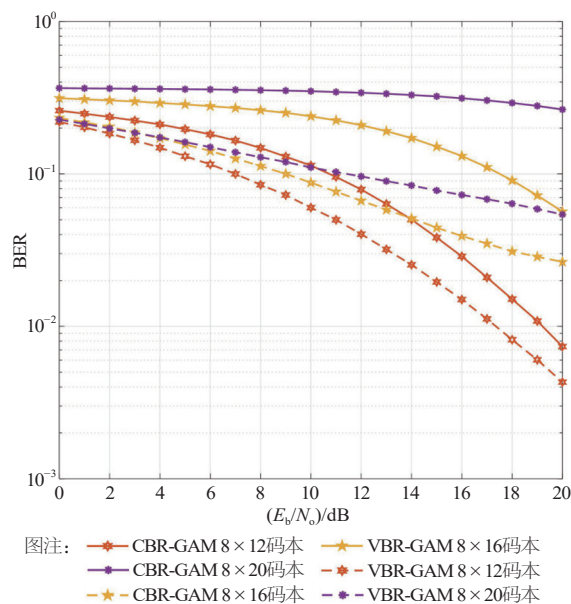
着用户数量的增长星座图中的星座点个数将会增多，此时星座点之间的最小欧式距离将会变小，从而导致译码的差错概率增大，所以BER会有所增大。但此时如果将部分用户的调制阶数降到 $M=2$ ，小调制阶数VBR-GAM码本的用户具有更低的功率效率，其星座点在星座图上的分布将会比 $M=4$ 和 $M=8$ 时的分布间距增大，这样可以使得译码差错概率降低，所以当 $\lambda=200\%$ 时，VBR-GAM码本的BER性能要比CBR-GAM码本好。

这样的现象在图5中显得特别明显。从图5中可以明显看到，CBR-GAM码本在调制阶数为 $M=8$ 时，不同调制阶数的VBR-GAM性能都会比CBR-GAM码本好；特别是当码本维度为 8×20 时，CBR-GAM码本的系统性能提升十分缓慢，而不同调制方式的VBR-GAM码本可以拥有更好的性能。原因也很明显，CBR-GAM码本在调制阶数提升时其星座点会越来越密集，即星座点之间的最小欧式距离会随着码本维度的增加而不断变小，其BER性能会变得越来越差。此时如果能灵活地调整各个码本之间的调制阶数，即给部分用户更低的调制阶数，这样不同用户星座点之间的最小欧式距离就会有所增大，此时系统整体性能有所提升。因此当用户数量增大时，完全可以通过降低部分用户的调制阶数来保证整个SCMA系统性能的提升。此外还可以发现VBR-GAM在码本维度为 8×12 时比 8×16 的码本提升了4 dB增益，这是因为尽管可以灵活调整各个用户的调制阶数，为部分用户分配更低的调制阶数，但是当用户数增大时 8×16 码本用户之间的最小欧式距离也会在 8×12 码本的基础上持续变小，所以性能会变得更差，但是仍会比CBR-GAM码本的性能要好，这也进一步说明了VBR-GAM码本的优越性。

结合图4和图5还可以发现与CBR-GAM码本相比较，采用高阶指数调制的VBR-GAM码本对应用户的发射功率更高，而采用低阶调制的用户具有更低的功率效率



图注：—○— CBR-GAM 8×12 码本 —★— VBR-GAM 8×16 码本
—○— CBR-GAM 8×20 码本 —○— VBR-GAM 8×12 码本
—★— CBR-GAM 8×16 码本 —○— VBR-GAM 8×20 码本

图4 $M=4$ 时不同维度下的CBR码本和VBR码本BER性能对比图5 $M=8$ 时不同维度下的CBR码本和VBR码本BER性能对比

率，也就是说可以通过牺牲一定的功率来实现码本的变速率传输。这样完全可以对多用户的优先级进行排序，优先级高的用户可以享用更高调制阶数的码本进行数据传输，相反优先级低的用户可以通过低阶调制的码本来降低发射功率。

5 结束语

本文研究了基于VBR-GAM的高维度码本设计。通过引入多维码字中与符号功率以及相位相关的约束设计了扩展母码本,并由此设计了可变比特率的VBR-GAM码本,从理论分析可以看出VBR-GAM的码本结构与CBR-GAM的码本结构是兼容的。仿真结果表明VBR-GAM码本可以灵活满足不同业务的需求,且可以通过不同的调制技术实现误码率的进一步降低。此外还能发现,优先级高的用户可以在增加一定的传输功率和带宽的情况下,申请高阶码本以获得更快的信息传输速率。

参考文献:

- [1] 朱立东,卓永宁,吴廷勇. 空间信息传输与处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
ZHU L D, ZHUO Y N, WU T Y. Spatial information transmission and processing[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2017.
- [2] TAHERZADEH M, NIKOPOUR H, BAYESTEH A, et al. SCMA codebook design[C]//Proceedings of 2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-5.
- [3] YU L S, LEI X F, FAN P Z, et al. An optimized design of SCMA codebook based on Star-QAM signaling constellations[C]//Proceedings of 2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [4] 桂毅恒. 卫星通信稀疏码多址技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
GUI Y H. Research on sparse code multiple access technology in satellite communications[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [5] 梁燕,余贝,童开蒙. 高斯信道下SCMA简易码本设计[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(9): 2744-2747, 2752.
LIANG Y, YU B, TONG K M. Simple SCMA codebook design in AWGN channels[J]. Application Research of Computers, 2017, 34(9): 2744-2747, 2752.
- [6] LIU Z L, XIAO P, MHEICH Z. Power-imbalanced low-density signatures (LDS) from Eisenstein numbers[C]//Proceedings of 2019 IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [7] 刘珍. 高维度SCMA码本设计与低复杂度译码算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
LIU Z. Research on high dimensional SCMA codebook design and low complexity detecting algorithm[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [8] 王显俊. SCMA系统多用户检测算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
WANG X J. Research for SCMA multiuser detection algorithm[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [9] FORNEY G D, 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.
- [10] BOUTROS J, VITERBO E, RASTELLO C, et al. Good lattice constellations for both Rayleigh fading and Gaussian channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1996, 42(2): 502-518.
- [11] LARSSON P. Golden angle modulation[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(1): 98-101.
- [12] CHEN Y M, CHEN J W. On the design of near-optimal sparse code multiple access codebooks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(5): 2950-2962.

[作者简介]



邓旭 (1996-), 男, 硕士, 主要研究方向为无线与移动通信系统。



储珂 (2000-), 女, 硕士, 主要研究方向为卫星通信。



朱立东 (1968-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为卫星通信、星地网络融合。