

基于混沌序列的 SCMA 码本设计及系统性能分析

赵耿^{1,2}, 马艳艳^{1,2}, 马英杰²

(1. 西安电子科技大学通信工程学院, 陕西 西安 710071; 2. 北京电子科技学院网络空间安全系, 北京 100070)

摘要: 稀疏码多址接入 (SCMA) 技术是新一代 5G 通信技术的多址技术方案之一。针对 5G 海量用户传输需求问题, 提出了用户传输信息时采用 logistic 混沌序列代替原始系统中的随机序列来选择码本。在编码端利用基于网格编码调制 (TCM) 的子集分割法设计星座图, 结合映射矩阵生成码本, 用户信息经信道传输后在解码端通过消息传递算法 (MPA) 进行解码。仿真结果表明, 利用混沌的伪随机序列选择码字, 系统传输的误码率 (BER) 较低, 且在高过载率情况下系统性能表现良好。

关键词: 稀疏码多址接入; logistic 混沌序列; 码本设计; 基于网格编码调制的子集分割法

中图分类号: TN918

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019026

Design of SCMA codebook based on chaotic signal and system performance analysis

ZHAO Geng^{1,2}, MA Yanyan^{1,2}, MA Yingjie²

1. School of Telecommunication Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China

2. Department of Cyber Space Security, Beijing Electronic Science and Technology Institute, Beijing 100070, China

Abstract: Sparse code multiple access (SCMA) technology is one of the multiple access technology schemes for the new generation of 5G. In order to solve the transmission requirement of massive users, the logistic chaos sequence was proposed instead of the random sequence in the original system to select the codeword. The constellation method based on trellis coded modulation (TCM) subset segmentation with the mapping matrix was used to generate codebook in the encoder, and decoded through message passing algorithm (MPA) detection method. The simulation results show that the bit error rate (BER) is low when the system uses the pseudo-random sequence of chaos to select the codeword, and the system also performs well under the condition of high overload rate.

Key words: SCMA, logistic chaotic sequence, codebook design, TCM subset segmentation

1 引言

随着科技的不断发展和网络的大规模商业化, 5G 技术的研发已成为移动无线网络发展的重要推动力。未来海量设备的连接和种类繁多的物联网业务给无线接入技术带来了巨大的挑战^[1], 对网络效率和系统容量提出了新的需求。高容量和高效率的新型多址技术成为了学科和社会各界关注的热点, 其中稀疏码多址接入 (SCMA, sparse code multiple

access) 技术脱颖而出, 成为 5G 多址接入候选技术之一^[2-3]。SCMA 技术是一种热门的非正交多址接入方式。在 SCMA 编码系统中, 不需要原始分多址中的调制和扩频, 每个用户都有属于自己的码本 (CB, codebook)^[4], 编码比特流直接映射到 SCMA 码本的一个多维码字上, 且多个用户的码字在资源块上叠加传输, 可以成倍增加用户数量, 从而更好地提升系统整体容量。近些年, 国内外学者都在不断规范码本设计的通用原则, 主要是以低密度签名 (LDS,

收稿日期: 2018-03-13; 修回日期: 2018-06-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61772047, No.61640216)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61772047, No.61640216)

low density signature) 为基础的优化改进算法^[5]。目前,对 SCMA 系统的研究大多以码本设计方法为重点,主要分为两大类:一类是基于格的星座设计原则^[6],比较常用的方法是多维格型星座的设计方法,该方法利用独立 QAM (quadrature amplitude modulation) 星座的笛卡尔积来建立多维星座,从而设计码本^[7];另一类是以旋转为设计原则,比如基于星型 QAM 信号星座图的 SCMA 系统,就是采用旋转相位的方法设计码本^[8]。此外,利用信号空间分级技术解决多维星座设计问题也是一个研究热点,通过代数数论或计算机搜索构造酉矩阵旋转 QAM 星座图,从而建立多用户码本^[9]。

上面提到的设计方法都是通过改变码本的设计规则来提升 SCMA 的系统性能,虽然已经达到良好的效果,但是系统始终采用传统随机序列选择码本。面对未来 5G 海量用户的信息传递需求,系统的安全性必须有更好的保障。本文通过对 SCMA 系统的研究和对混沌序列的理解,打破常规,首次提出不改变码本设计方法,仍采用基于网格编码调制 (TCM, trellis coded modulation) 的子集分割法设计星座图^[10],将混沌序列代替随机序列应用到 SCMA 系统中,改变用户选择码本的方式,并通过实验仿真证明了这一方法在不改变编码效率的条件下进一步降低了系统的误码率。

2 基于混沌序列的 SCMA 系统分析

2.1 logistic 混沌序列的动力学特性

混沌现象从确定非线性系统的演化过程来看是指内在的随机性,它们在混沌区的行为都表现出随机不确定性,然而这种不确定性不是来源于外部环境的随机因素,而是系统自发产生的^[11]。用于 SCMA 系统的混沌序列通常通过映射模型产生,其中 logistic 混沌映射是一个被广泛研究的非线性系统^[12],由于其形式简单且具有复杂的动力学行为,是一个由倍分期分叉到达混沌状态的典型例子。该映射的方程为

$$x_{n+1} = \mu x_n(1 - x_n), x_n \in (0,1) \quad (1)$$

其中, $1 \leq \mu \leq 4$, μ 被称为分形参数, logistic 混沌映射的动力学行为与 μ 密切相关。当 $3.566 \leq \mu < 4$ 时,系统处于混沌状态,产生的混沌序列具备非周期性且对初始状态极其敏感;当 $\mu=4$ 时,称为 logistic 满混沌映射,此时映射的输出信号如图 1 所示,相轨迹如图 2 所示。

由图 1 和图 2 可知,此时输入区间与输出区间的分布都在(0,1)区间,且图 1 的输出的序列值呈随机分布。满混沌映射的概率密度函数如式(2)所示。

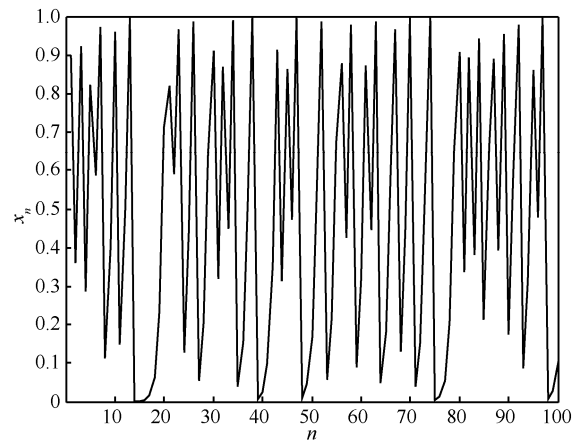


图 1 logistic 满混沌映射输出信号

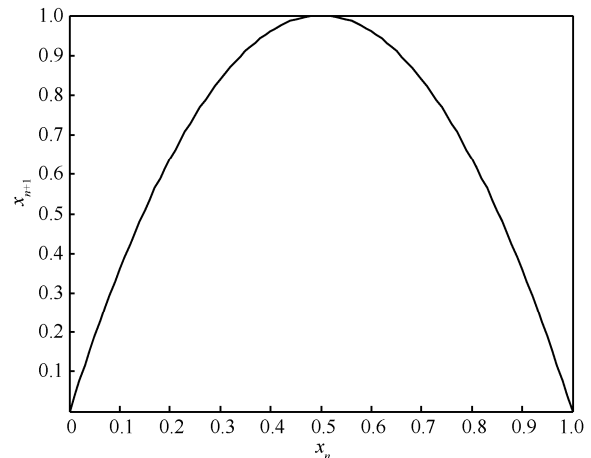


图 2 logistic 满混沌相轨迹

$$\rho(x) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sqrt{x(1-x)}}, & 0 < x < 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)计算得到序列的均值如式(3)所示,自相关函数如式(4)所示。

$$x = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^{N-1} x_i = \int_0^1 x \rho(x) dx = 0.5 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} R_{ac}(m) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - x)(x_{i+m} - x) \\ &= \int_0^1 x f^m(x) \rho(x) dx - x^2 = \begin{cases} 0.125, & m = 0 \\ 0, & 1 \leq m \leq N-1 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, m 表示序列间隔。

给出 2 个不同的初始值 x_{10} 和 x_{20} ，迭代产生 2 条不同的序列，它们的互相关函数如式(5)所示，可见序列几乎互不相关。

$$R_{cc}(m) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^{N-1} (x_{1i} - x)(x_{2(i+m)} - x) = \int_0^1 \int_0^1 x_1 f^m(x_2) \rho(x_1) \rho(x_2) dx_1 dx_2 - x^2 = 0 \tag{5}$$

其中， $f^m(x) = f(f \cdots f(x) \cdots)$ 。

由式(3)可知序列的平均值为 0.5，因此二值量化的判决门限可以选为 0.5，量化方法如式(6)所示。对量化后的 logistic 混沌序列进行相关性能的仿真，其自相关性如图 3 所示，互相关性如图 4 所示。

$$x(n) = \begin{cases} 0, & x(n) < 0.5 \\ 1, & x(n) \geq 0.5 \end{cases} \tag{6}$$

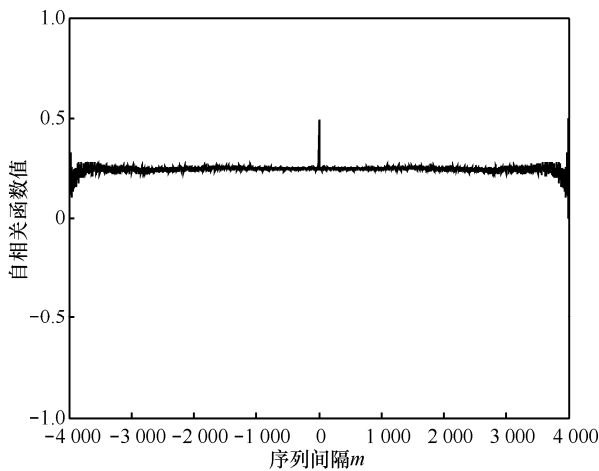


图 3 二值量化后序列自相关性

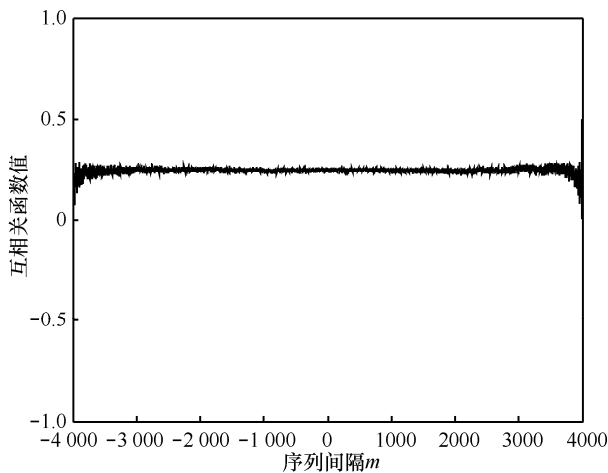


图 4 二值量化后序列互相关性

由图 3 和图 4 可知，二值量化后 logistic 混沌序列的自相关函数值和互相关函数值都非常小，基本稳定在 0.2~0.3，相关性能良好。

2.2 SCMA 编码原理

假设 6 个用户在 4 个资源块上传输信息，采用四点星座图调制，由 SCMA 基本原理可知，用户将被分配到属于自己的码本，是一个 4×4 的复数矩阵，矩阵的行代表资源块，列代表码本的码字。设每个用户每次传输的比特数为 b ，则需要占用的星座数为

$$B = 2^b \tag{7}$$

即分别对应 2^b 个码字。用户将数据流通过信道编码映射到预定义码本的码字上，在这里假设每个用户传输 2 bit 信息，所以有 4 种可能，用(0,0)、(0,1)、(1,0)、(1,1)表示，对应 4 个码字，分别是码本的第 1~4 列，如图 5 所示。

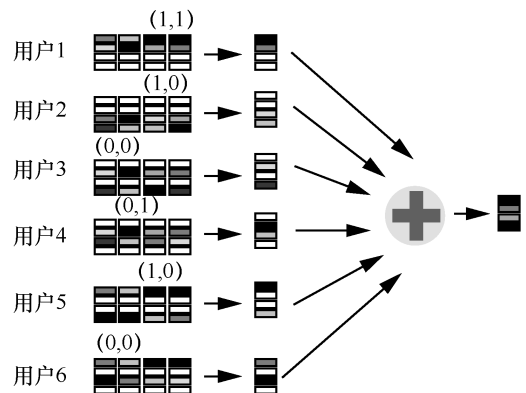


图 5 SCMA 编码原理

6 个用户同时发送消息，假设用户 1 传输(1,1)，用户 2 传输(1,0)，用户 3 传输(0,0)，用户 4 传输(0,1)，用户 5 传输(1,0)，用户 6 传输(0,0)，各用户分别对应各自码本的第 4、3、1、2、3、1 列码字。6 个用户的码字叠加后在 4 个资源块上进行传输，白色的块表示用户不占用该资源块。在 SCMA 系统中，为了表示方便，引出映射矩阵 F 的概念，矩阵中元素 1 的位置表示该资源块上有信号进行传输，0 表示没有信号，一般通过手动设计得到。故图 5 对应的映射矩阵 F 为

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{8}$$

每个用户仅利用 2 个资源块，例如用户 1 只在资源块 1 和资源块 2 上进行传输。而每个资源块只有 3 个有效用户，例如第 1 资源块只有用户 1、3、5 使用。因此，在使用相同频谱的情况下，SCMA 通过多址码域的引入，大大提升了频谱效率。

3 基于 logistic 混沌序列的 SCMA 系统设计

3.1 系统设计方案

SCMA 是以扩频码分多址 (CDMA, code division multiple access) 为基础发展而来的一种多址接入方式^[13]。它将 QAM 映射器与 CDMA 扩频器结合起来，通过星座调制和映射矩阵扩频生成码本。各用户的输入信号由 SCMA 编码器编码后，由 logistic 混沌序列选择出对应码本的码字，叠加后经高斯信道到达解码端。由于 SCMA 系统具有稀疏特性的优点，采用复杂度较低的 MPA (message passing algorithm) 算法在解码端进行解码，可以实现近似用户最大似然解码^[14]，系统方案如图 6 所示。

SCMA 编码器是将二进制比特流映射为一个 N 维码字的过程。用户通过 SCMA 编码器将输入的信号 (二进制数据比特流) 分别映射到多维码本的码字上，用户 k 的 SCMA 编码器可表示为

$$x_k = f_k(b) \tag{9}$$

其中， b 为用户 k 输入的比特流， f_k 为用户比特流到码本的映射关系函数， x_k 为用户 k 对应的 N 维码本。

在多用户传输时，每个用户都对应属于自己码本的码字，经 logistic 混沌序列选择后叠加，通过

高斯信道传输至系统的接收端，接收到的用户层的叠加信号为

$$y = \sum_{j=1}^J \text{diag}(h_j)x_j + n \tag{10}$$

其中， x_j 是用户 j 的 N 维码字， h_j 是用户 j 的信道向量， n 是均值为 0、方差为 σ^2 的高斯白噪声。

3.2 SCMA 码本的设计

SCMA 采用设计好的多维码本替代 QAM 调制器和稀疏序列扩频器，使系统具有多维星座的赋形增益^[15]，通过码本的多维星座能提高频谱效率，并实现过载，此外，还可保持较低的译码复杂度。

3.2.1 设计资源块上的星座图

SCMA 系统中一个资源块上重载的用户越少，系统产生的碰撞越少，越能降低误码率。但是一旦用户数变多，尤其面对未来海量用户的接入，同一个资源上互相影响的用户数量必然增加。用户的码字是由信息比特流通过多维星座映射得到的，因此要求用户对应的星座点在同一个资源块上不能重合，那么设计有效的多维星座是系统设计的关键点之一。

本文采用基于 TCM 子集分割法的星座图设计方法^[10,16]，使用现有的调制星座图，如 PSK (phase shift keying) 星座，采用 TCM 子集分割法产生各用户对应的有效星座集合。由式(7)可知，若每个用户每次传输的比特数为 b ，则需要占用的星座点数为 B 个，假设每个资源块上有 M 个有效用户，则每个资源块上总的星座点数为

$$B_s = BM \tag{11}$$

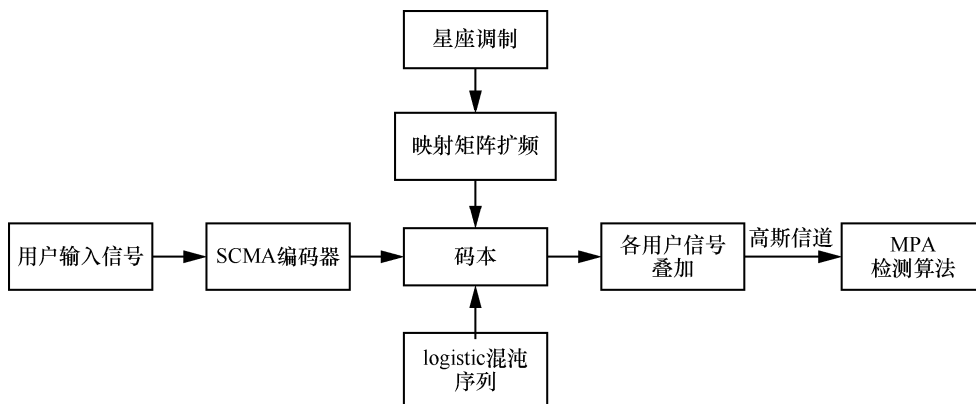


图 6 系统方案

于是采用 B_s 点 PSK 星座, 然后进行 TCM 子集分割, 得到 M 个子集, 分别对应资源块上 M 个有效用户。

3.2.2 构造映射矩阵

映射矩阵 F 可以反映出每个资源块上的用户数以及资源块的利用情况。假设 SCMA 系统的子载波数为 N , 即码字的长度, K 表示非零元素数, 那么 SCMA 系统的最大用户数为

$$J_{\max} = \binom{N}{K} = C_N^K \quad (12)$$

每个资源块上传输的实际用户数为

$$M = \binom{N-1}{K-1} = \frac{JK}{N} \quad (13)$$

过载率为

$$\lambda = \frac{J}{N} \quad (14)$$

实际用户数也影响了 MPA 检测的复杂度, 编码后的码字拥有的非零项越少, MPA 检测的复杂度越低。由于映射矩阵与低密度奇偶校验码 (LDPC, low density parity check code) 的校验矩阵具有相似性^[17], 只需知道系统的资源块数、用户数、行重 (每个资源块上的有效用户)、列重 (每个用户利用资源块数), 就可以通过设计规则的 LDPC 校验矩阵来得到具有较好性质的映射矩阵, 也可以手动设计。

3.2.3 生成码本

将星座图与映射矩阵结合起来生成星座矩阵。星座矩阵中星座的位置对应映射矩阵中元素 1 的位置, 且每个资源块上的有效星座子集位置是随机的, 只需保证选择的星座子集是不重复的。然后将每一列展开为 $n \times m$ 矩阵, n 为矩阵第一维, 表示资源块数; m 是第二维, 表示码字; 第三维是用户。 $n \times m$ 矩阵即为每个用户的码本。

4 SCMA 码本设计仿真研究

6 个用户在 4 个资源块上传输, 每个用户仅占用 2 个资源块, 且每个资源块上实际有效用户只有 3 个。由式(7)可得, 每个用户每次传输的比特数为 2 bit, 则需要占用的星座点数为 4。由式(11)可得, 每个资源块上的总星座数为 $4 \times 3 = 12$ 个, 采用

12 点 PSK 星座进行子集分割, 得到 3 个子集, 分别对应资源块上 3 个有效用户, 如图 7 所示。

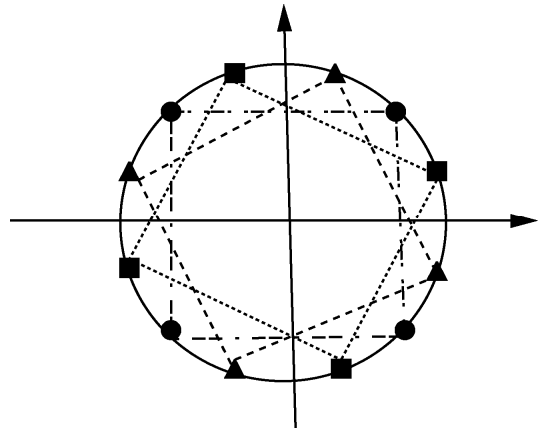


图 7 12 点 PSK 星座分割子集

图 7 中, 圆点星座用 A_1 表示, 三角星座用 A_2 表示, 方形星座用 A_3 表示, 根据要求手动设计 F 矩阵如式(15)所示。

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

结合图 7 和式(15)可以得到用户与资源块的星座矩阵图。每个资源块上实际的有效用户只有 3 个, 且这 3 个用户选择子集星座是随机的, 但是 3 个子集组合起来正是 12 点 PSK 星座图。因此, 用户与子集星座之间有多种对应关系, 随机选择一种如图 8 所示。

用户 1	用户 2	用户 3	用户 4	用户 5	用户 6
A_1	A_2	A_3	0	0	0
A_3	0	0	A_1	A_2	0
0	A_3	0	A_2	0	A_1
0	0	A_2	0	A_1	A_3

图 8 星座矩阵

假设第 1 个码字到第 4 个码字分别对应星座图上的第一象限到第四象限的值, 由图 8 可知, 用户 1 的第一列码字的 4 个元素分别为 A_1 的第一象限值、 A_3 的第一象限值、0、0; 第二列码字的 4 个元素分别为 A_1 的第二象限值、 A_3 的第二象限值、0、0。以此类推可以得到 6 个用户的 TCM 码本如下。

用户 1

$$\begin{bmatrix} 0.7071+0.7071i & -0.7071+0.7071i & -0.7071-0.7071i & 0.7071-0.7071i \\ 0.9659+0.2588i & -0.2588+0.9659i & -0.9659-0.2588i & 0.2588-0.9659i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

用户 2

$$\begin{bmatrix} 0.2588+0.9659i & -0.9659+0.2588i & -0.2588-0.9659i & 0.9659-0.2588i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9659+0.2588i & -0.2588+0.9659i & -0.9659-0.2588i & 0.2588-0.9659i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

用户 3

$$\begin{bmatrix} 0.9659+0.2588i & -0.2588+0.9659i & -0.9659-0.2588i & 0.2588-0.9659i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2588+0.9659i & -0.9659+0.2588i & -0.2588-0.9659i & 0.9659-0.2588i \end{bmatrix}$$

用户 4

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7071+0.7071i & -0.7071+0.7071i & -0.7071-0.7071i & 0.7071-0.7071i \\ 0.2588+0.9659i & -0.9659+0.2588i & -0.2588-0.9659i & 0.9659-0.2588i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

用户 5

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2588+0.9659i & -0.9659+0.2588i & -0.2588-0.9659i & 0.9659-0.2588i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7071+0.7071i & -0.7071+0.7071i & -0.7071-0.7071i & 0.7071-0.7071i \end{bmatrix}$$

用户 6

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7071+0.7071i & -0.7071+0.7071i & -0.7071-0.7071i & 0.7071-0.7071i \\ 0.9659+0.2588i & -0.2588+0.9659i & -0.9659-0.2588i & 0.2588-0.9659i \end{bmatrix}$$

4.1 不同信号下性能分析

在高斯白噪声下，系统采用 logistic 混沌序列选择用户对应码本中的码字，与文献[10]中使用传统随机序列选择码字进行对比，并进一步使用文献[11]中改进的 logistic 混沌序列代替系统的 logistic 混沌序列进行对比。采用 $\frac{1}{2}$ 码率 Turbo 编码，在 MPA 算法译码下，迭代 8 次，用户传输 1 000 bit 信息，得到的误码率 (BER, bit error rate) 对比仿真曲线如图 9 所示。其中，横坐标为信噪比 (SNR, signal noise ratio)。

由图 9 可以看出，采用 logistic 混沌序列选择 SCMA 系统的码字时，在不改变编码效率的条件下误码率低于传统随机序列。当信噪比达到 10 dB 时，系统误码率出现小幅度降低，并且随着信噪比的增大，降低幅度不断增大，当信噪比等于 14 dB 时，误码率明显降低。若使用改进的 logistic 混沌序列选择码本时，系统的误码率又有了非常明显的降低，特别是当信噪比达到 14 dB 时，系统的误码率骤降。这一方面说明 logistic 混沌序列的随机性和非相关性虽然很强，但是仍可以进一步改进；另一方面，SCMA 系统充分利用了星座的赋形增益，有效降低了接收

端解码复杂度, 消除了用户之间的干扰。

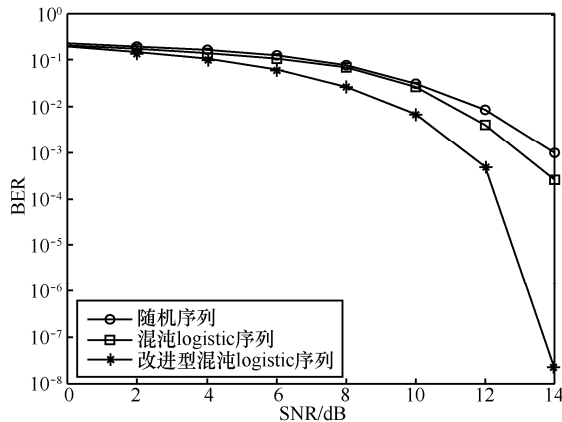


图9 采用不同序列误码率对比

4.2 不同过载条件下性能分析

系统采用 logistic 混沌序列来选择用户对应码本的码字。假设有 6 个资源块, 每个用户实际利用的资源块为 2 块, 那么最大用户数为 15。分别取用户数为 6、9、12 这 3 种情况, 则对应的过载率为 100%、150%、200%, 以上 3 种情况仍采用 $\frac{1}{2}$ 码率 Turbo 编码和 MPA 算法译码, 迭代 8 次, 得到的 BER-SNR 性能仿真曲线如图 10 所示。

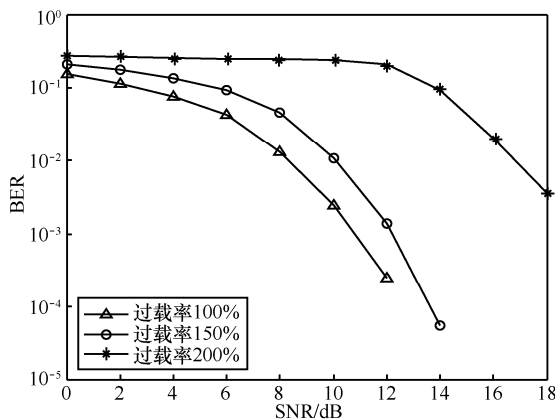


图10 不同过载率条件下误码率对比

由图 10 的仿真结果可得以下结论。当用户数一定时, 系统误码率随着信噪比的增加而显著减小。当信噪比相同时, 系统未达到过载, 即 $\lambda = 1$, 系统的误码率较低; 达到过载后, 随着过载率的增大, 用户干扰增加, 系统的误码率明显增大。信噪比越大, 过载率对系统误码率的影响也越大。这是因为过载能力越大, 接入用户越多, 用户之间干扰增大, 彼此间竞争也增大, 并且解码也变得比较困

难。因此, 合理选择过载率, 对提高系统的误码率性能至关重要。

5 结束语

在 SCMA 系统传输过程中, 设计出好的码本可以在不增加频带利用率、不改变编码效率的前提下有效降低误码率, 提高系统的容量和效率。面对未来 5G 海量用户的需求, 不仅需要好的码本, 高效性和安全性也是需要重视的问题。本文设计使用 logistic 混沌序列来选择用户对应码本的码字进行用户信息传输。仿真结果表明, 与使用传统随机信号相比, 本文系统传输的误码率明显降低, 且改进型的 logistic 混沌序列效果更优。这不仅说明了 SCMA 系统具有安全性和高效性, 更有力证明了混沌序列的伪随机特性。并且在不同过载率的条件下, 系统的性能依然良好。

参考文献:

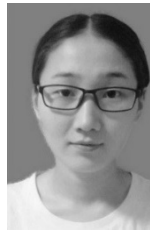
- [1] PIRINEN P. A brief overview of 5G research activities[C]//International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity. 2015:17-22.
- [2] SUN W. Components of a new air interface-building blocks and performance[M]. Air Interface, 2015.
- [3] LAURIDSEN M, GIMENEZ L C, RODRIGUEZ I, et al. From LTE to 5G for connected mobility[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(3):156-162.
- [4] NIKOPOUR H, YI E, BAYESTEH A, et al. SCMA for downlink multiple access of 5G wireless networks[C]//IEEE Global Communications Conference. 2014: 3940-3945.
- [5] LI L, MA Z, WANG L, et al. Cutoff rate of sparse code multiple access in downlink broadcast channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017(99): 1.
- [6] TAHERZADEH M, NIKOPOUR H, BAYESTEH A, et al. SCMA codebook design[C]//Vehicular Technology Conference. 2014:1-5.
- [7] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse code multiple access[C]// International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. 2013:332-336.
- [8] YU L, FAN P, LEI X, et al. BER analysis of SCMA systems with codebooks based on star-QAM signaling constellations[J]. IEEE Communications Letters, 2017(99): 1.
- [9] BAO J, MA Z, DING Z, et al. On the design of multiuser codebooks for uplink SCMA systems[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(10):1920-1923.
- [10] 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[J]. 2017, 34(9): 1001-1005.
- LIANG Y, YU B, TONG K M. Simple SCMA codebook design in AWGN channel[J]. Application Research of Computers, 2017, 34(9): 1001-1005.

- [11] 陈志刚, 梁涤青, 邓小鸿, 等. Logistic 混沌映射性能分析与改进[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(6): 1547-1551.
CHEN Z G, LIANG D Q, DENG X H, et al. Performance analysis and improvement of logistic chaotic mapping[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(6):1547-1551.
- [12] CECCONELLO M S, DORINI F A, HAESER G. On fuzzy uncertainties on the logistic equation[J]. Fuzzy Sets & Systems, 2017, 328(10): 107-121.
- [13] HOSHYAR R, WATHAN F P, TAFAZOLLI R. Novel low-density signature for synchronous CDMA systems over AWGN channel[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(4): 1616-1626.
- [14] YANG L, LIU Y, SIU Y. Low complexity message passing algorithm for SCMA system[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(12): 2466-2469.
- [15] UNGERBOECK G. Channel coding with multilevel /phase signals[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1982, 28(1): 55-67.
- [16] 宋孝先. 基于 TCM-OFDM 自适应调制技术的宽带数据链系统[J]. 指挥信息系统与技术, 2017, 1(6):71-75.
SONG X X. Wideband data link system based on TCM-OFDM adaptive modulation technology[J]. Command Information System and Technology, 2017, 1(6):71-75.
- [17] 史治平, 任亚军, 吕凤橙. 基于 LDPC 码的安全可靠通信方法研究[J]. 电子科技大学学报, 2017, 46(5): 641-647.
SHI Z P, REN Y J, LV F C. Research on secure and reliable communications method based on LDPC codes[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2017, 46(5): 641-647.

[作者简介]



赵耿 (1964-), 男, 四川苍溪人, 博士, 北京电子科技学院教授, 主要研究方向为混沌保密通信、信息安全。



马艳艳 (1994-), 女, 河南洛阳人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为 5G、混沌保密通信。



马英杰 (1979-), 女, 吉林通化人, 北京电子科技学院副教授, 主要研究方向为通信系统、混沌保密通信。