

doi:10.14132/j.cnki.1673-5439.2020.06.005

基于交替编码的 SCMA 码本设计新方法

邓 豪,何雪云,孙林慧

(南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏 南京 210003)

摘要:第五代移动通信技术由于其极高的数据传输速率,海量的用户接入数,低设备功耗和低数据传输时延的优点,带动了诸如远程医疗、物联网等新兴领域的发展。其中,非正交多址接入技术为第五代移动通信的核心技术之一。文中在传统 QAM 调制的基础上,提出了一种新的码本设计方式,即根据用户出现的次数来决定编码顺序,同时找到近似最优的星座图参数。仿真结果证明,相较于传统的 QAM 码本设计,文中提出的交替编码方案可以有效降低接收端消息传递算法(Message Passing Algorithm,MPA)的误码率。

关键词:SCMA 系统;传统 QAM 编码;交替编码;消息传递算法;码本扩展

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-5439(2020)06-0028-08

The new method of codebook design for SCMA system based on alternate coding

DENG Hao, HE Xueyun, SUN Linhui

(College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: In the fifth generation mobile communication technology, due to its extremely high data transmission rates, massive user accesses, low device power consumption, and low data transmission delays, it has driven the development of emerging fields such as tele-medicine and the Internet of Things. The non-orthogonal multiple access technology is one of the core technologies of the fifth generation mobile communication technology. Based on the traditional QAM modulation, the optimal constellation parameters are found and a new codebook design method is proposed, that is, determining the order of coding according to the number of the users occurred. Simulation results show that compared with the traditional QAM codebook design, the alternative coding scheme proposed in this paper can effectively reduce the error rate of the message passing algorithm (MPA) at the receiver.

Keywords: SCMA system; traditional QAM coding; alternate coding; message passing algorithm; codebook extension

收稿日期:2020-03-21;修回日期:2020-07-21 本刊网址:<http://nyzr.njupt.edu.cn>

基金项目:国家自然科学基金(61501248,61901227)和江苏省高等学校自然科学研究(19KJB510049)资助项目

作者简介:邓豪,男,硕士研究生;何雪云(通信作者),女,博士,副教授,hexy@njupt.edu.cn

引用本文:邓豪,何雪云,孙林慧.基于交替编码的 SCMA 码本设计新方法[J].南京邮电大学学报(自然科学版),2020,40(6):28-35.

第五代移动通信技术推动了移动通信领域的发展,不论是低数据传输时延还是高数据传输速度都为人类未来的生产和生活带来了无限的可能^[1]。但是,传统的无线通信是基于正交多址接入的方式。例如 OFDM 正交频分复用技术,不同用户占用不同资源块进行通信,虽然具有较好的抗信道衰落能力和抗载波间干扰能力,但较低的频谱资源利用率远不能满足海量用户接入的需要^[2]。因此,支持若干个用户数据在同一个资源块上叠加传输的稀疏码分多址接入技术(Sparse Code Multiple Access, SCMA)被有关学者提出,并很快被确定为 5G 的核心接入技术。

在稀疏码分多址系统中,发送端为每个用户都设定了不同的码本(Codebook, CB)。本地的码本选择器根据用户发送的 0-1 比特选择相应的高维稀疏复数域码字,这一点取代了传统码分多址中的调制器和扩频器模块。并且由于一个资源块上叠加了多个用户的传输数据,因此系统的最大用户接入数和系统承载率可以得到进一步提升。此外,通过观察接收端消息传递算法(Message Passing Algorithm, MPA)可知,优秀的码本可以降低接收端的判决难度,使误码率性能得到相应的改善^[3]。

传统的基于 QAM 调制的 SCMA 码本设计^[4]和基于 PSK 调制的 SCMA 码本设计^[5]从固定单个资源块的角度出发,根据该资源上叠加的用户数和单个用户采用的调制进制数来设计星座图,但两种方案都只考虑到了同一资源的不同用户的同

一码字的距离和同一资源的同一用户不同码字的距离。因此,通过观察接收端消息传递算法的迭代步骤,本文在传统 QAM 码本设计的基础上,提出了一种新的码本设计方案:根据调制的进制数 M 设计 $M/2$ 个以原点为圆心的同心圆,并且根据一个资源块上叠加的用户数 d_f 将圆形 d_f 等分;其他资源块上的星座图则是在第一个资源块的星座图基础上进行角度为 β 的逆时针旋转,并根据用户出现的次数进行交替格雷编码。通过交替编码,可以有效提高不同资源上同一用户同一码字的距离,使得消息传递算法中同一用户同一码字传递给不同资源块的置信信息的差值增大,进而降低了接收端判决的难度,即 SCMA 系统的误码率下降。仿真结果表明,相较于传统的 SCMA 码本设计方案,本文提出的交替编码算法确实降低了基于 MPA 接收的系统误码率。

1 系统模型

稀疏码分多址系统在发送端通过编码器和码本选择器将用户数据映射为 SCMA 码字,在接收端通过用户检测和消息传递算法恢复出编码比特^[6]。其中,SCMA 码本设计是稀疏码分多址系统的核心,且主要包含因子矩阵和星座图设计两大部分。从图 1 中可以看出,单个用户根据指定码本将 $\log_2 4$ 个二进制比特符号映射为四维稀疏的复数域码字后,与其他用户的码字叠加在一起,并通过发送端信道调制后,经射频天线送入信道中进行传输。

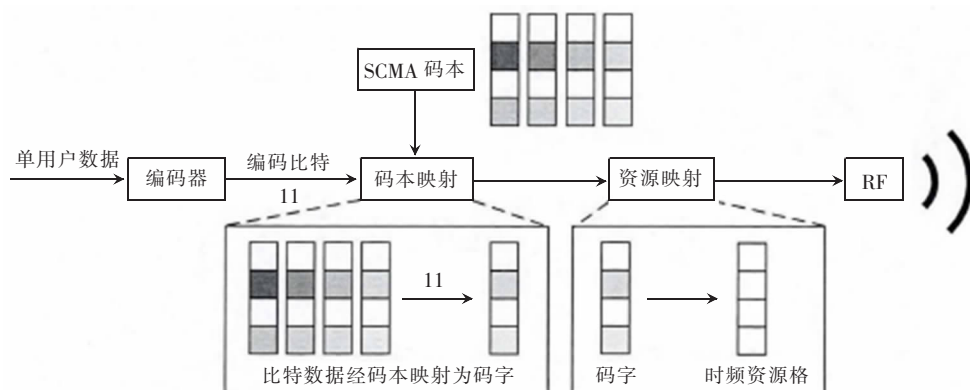


图 1 单用户 SCMA 发送端模型

图 1 为上行 SCMA 系统发送端的流程框图,用户数据经过信源编码后的 0-1 比特符号根据 SCMA 码本选择器被映射为稀疏高维复数域码字。假设 M 为系统调制阶数, K 为资源总数,每个用户占据的资

源数为 N ,则用户的码本由 M 个 K 维复数码字组成,每个复数码字含有 N 个非零元素,其中 $N < K$ 。由图 1 可知,调制阶数 M 为 4,资源数 K 为 4。因此,用户的码本由 4 个四维码字组成,且非零元素的

位置相同,均位于第二和第四资源块上,如图 1 所示。

上行传输场景中,用户的码字数据经过资源映射后与其他用户的码字数据在无线信道中叠加后传输^[7],观察图 2 可知, $K=4$ 时频资源上共叠加了 $J=6$ 个用户的码字数据,实现了 $\lambda = J/K = 150\%$ 的多用户过载。

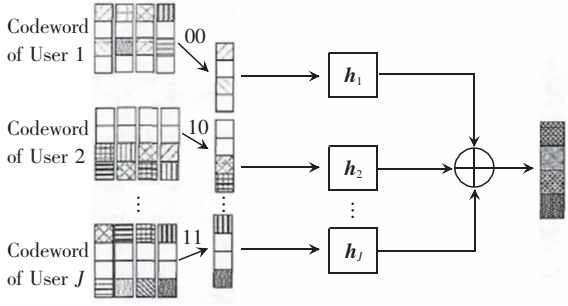


图 2 多用户 SCMA 发送端模型

文中用因子图矩阵 F 表示多用户数据与多个资源块之间的对应关系,如图 3 所示。

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

图 3 SCMA 用户-资源因子矩阵

图 3 为 SCMA 用户-资源因子矩阵,行代表资源块 $k(k=1,2,\dots,4)$,列代表用户数 $j(j=1,2,\dots,6)$ 。矩阵满足一定的稀疏性, $F_{k,j}=1$ 表示用户 j 占据(使用)了资源块 k ,相对应的 $F_{k,j}=0$ 表示用户 j 没有占据(使用)资源块 k 。从图 3 中可以看出,一个用户占据了两个资源块,在总资源数为 4 的情况下,系统的最大可容纳用户数为 $C_4^2=6$ 。单个资源上叠加的用户数 d_f 为 3。在确定因子矩阵 F 的条件下,SCMA 系统的发送端将用户的二进制 0-1 比特流按照各用户码本映射为高维稀疏的复数域码字 $\mathbf{x}_j \in \mathbb{C}^K$ 。

以上行 SCMA 系统为例,由于一个资源块上叠加了多个用户传输的数据,故接收端在任何时刻观测到的接收信号可以表示为^[8]:

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

其中, $\mathbf{x}_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{Kj})^T$ 为第 j 个用户发送的 K 维稀疏复数域码字; $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_K)^T$ 为接收端观测到的接收信号; $\mathbf{h}_j = (h_{1j}, h_{2j}, \dots, h_{Kj})^T$ 为用户 j 的

信道传输矩阵; $\mathbf{n}$ 为加性噪声向量,并服从均值为零、方差归一化的 K 维复高斯分布。

在获得接收信号后,接收端采用 MPA 译码算法,算法流程图可由图 4 表示。以小规模 SCMA 系统($K=4, J=6$)为例,通过公式介绍 MPA 算法步骤(其中 v 表示用户数据节点, g 表示资源节点)。

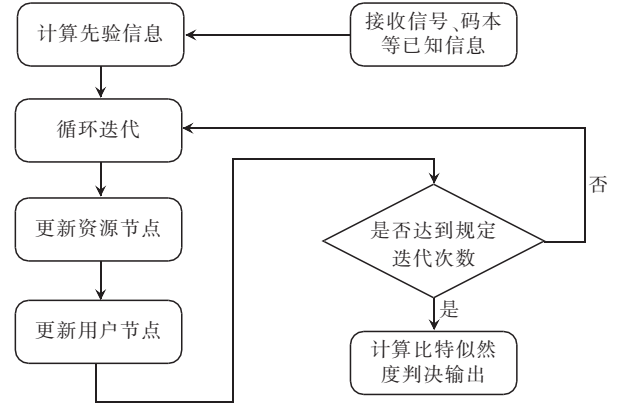


图 4 消息传递算法流程图

Step1: 初始化更新资源节点,即每个用户向该用户所占的资源块发送置信信息,以用户六为例,操作如式(2)所示。该式具体含义可参见 Step2 中对式(5)的说明。

$$I_{v6 \rightarrow g^3}^0(m_6) = \frac{1}{M} \quad (2)$$

$$I_{v6 \rightarrow g^4}^0(m_6) = \frac{1}{M}$$

Step2: 开始消息传递算法的迭代,根据置信信息公式更新用户和资源节点。

$$\begin{aligned} I_{g^4 \rightarrow v^6}^t(m_6) &= \sum_{m_3=1}^M \sum_{m_5=1}^M \phi_4(y_4, m_3, m_5, m_6, \mathbf{n}_4, \mathbf{h}_4) \cdot \\ &\quad (I_{v3 \rightarrow g^4}^{(t-1)}(m_3) I_{v5 \rightarrow g^4}^{(t-1)}(m_5)), m_6 = 1, 2, \dots, M \\ I_{g^3 \rightarrow v^6}^t(m_6) &= \sum_{m_2=1}^M \sum_{m_4=1}^M \phi_3(y_4, m_2, m_4, m_6, \mathbf{n}_4, \mathbf{h}_4) \cdot \\ &\quad (I_{v2 \rightarrow g^3}^{(t-1)}(m_2) I_{v4 \rightarrow g^3}^{(t-1)}(m_4)), m_6 = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \phi_k(y_k, m_1, m_2, m_3, \mathbf{n}_k, \mathbf{h}_k) &= \exp \left(\frac{-1}{\mathbf{n}_k} \left\| y_k - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. (h_{k1}x_{1k}(m_1) + h_{k2}x_{2k}(m_2) + h_{k3}x_{3k}(m_3)) \right\|^2 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

更新用户节点时,每个资源块应向该资源块上叠加的所有用户发送置信信息。以资源块三和资源块四为例,置信信息公式主要由两部分组成^[9]:一是式(4)计算得到的似然度信息,其中 y_k 为资源块 k 上的接收信号, $\mathbf{h}_k = (h_{k1}, h_{k2}, \dots, h_{Kj})$ 为资源块 k 的信道传输向量, $\mathbf{n}_k$ 为资源块 k 上叠加的零均值、

方差归一化的复高斯噪声向量;二是在上一次更新资源节点的过程中,和该资源节点相连的用户节点传递的置信信息,如式(3)所示。

$$\begin{aligned} I_{i6 \rightarrow g3}^t(m_6) &= \text{normalize}(p_{i6}(m_6)I_{g4 \rightarrow i6}^{t-1}) \\ I_{i6 \rightarrow g4}^t(m_6) &= \text{normalize}(p_{i6}(m_6)I_{g3 \rightarrow i6}^{t-1}) \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)为更新资源节点时的置信信息公式,其中 $I_{i6 \rightarrow g3}^t(m_6)$ 表示在第 $t(t \geq 1)$ 次迭代中,用户六向资源三传递的,且该用户选择发送第 m_6 个码字时的置信信息。 $p_{i6}(m_6)$ 指明发送端用户六选择发送第 m_6 个码字的概率, $\text{normalize}()$ 指明对数据进行归一化计算。从式(5)中可以看出,当计算用户节点 v_6 向资源节点 g_3 传递置信信息时,需要用到本次迭代中资源节点 g_4 向用户节点 v_6 传递的置信信息。此外,在首次迭代前,用户节点向资源节点传递的置信信息应初始化为 $1/M$, M 为系统调制阶数,如式(2)所示。

Step3:判断消息传递算法的迭代次数 t 是否达到最大迭代次数 $t_{\max}$ 。如果达到,接收端判决输出。如果未达到,则 $t \leftarrow t + 1$,并返回 Step2 进行下一次迭代^[6]。

2 交替编码

通过观察消息传递算法的迭代步骤可知,SCMA 码本设计的优劣直接影响了接收端用户检测的误码率性能^[10]。由文献[7]可知,SCMA 码本结构由星座图 $\mathbf{C}$ 和映射矩阵 $\mathbf{V}$ 联合决定。以因子矩阵 $\mathbf{F}_{4 \times 6}$ 为例,其中第 $\mathbf{F}_j$ 列可以表示为 $\mathbf{F}_j = \text{diag}(\mathbf{V}_j \mathbf{V}_j^T)$,例如:

$$\mathbf{V}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{F}_1 = \text{diag}(\mathbf{V}_1 \mathbf{V}_1^T) = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

若最佳映射矩阵 $\mathbf{V}^*$ 已知,则最佳因子矩阵 $\mathbf{F}^*$ 已知,此时 SCMA 码本的设计问题转变为设计 K 个不同的星座图 $\mathbf{C} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{d_f}\}$, $\mathbf{x}_i \in \mathbb{C}^M$, $i = 1, 2, \dots, d_f$, 其中每个星座包含 Md_f 个星座点, M 为系统的调制进制数。虽然目前 SCMA 码本星座图的最优设计准则依然未知,但是一个抽象的星座图结构可以表示为:

$$\mathbf{C}^* = \arg \max_{\mathbf{C}} m(\delta(\mathbf{V}^*, \mathbf{C}; J, M, N, K)) \quad (7)$$

其中, m 表示星座图的设计方案, N 表示每个用户占据的资源个数。由于式(7)属于非凸二次约束

二次规划(QCQP)问题,而非凸 QCQP 问题是 NP 难问题,故很难求解。截止目前为止,有关学者仍未寻找到最佳星座 $\mathbf{C}^*$ 的闭合表达式,因此只能通过优化已知的一些码本设计以获得近似最优码本^[11]。

本文在基于 QAM 的 SCMA 码本设计的基础上,提出了一种简易的码本设计方式。以小规模 SCMA 系统为例,其中,接入用户数 $J = 6$ 、单个用户占用的资源数 $N = 2$ 、资源总数 $K = 4$,并采用 $M = 4$ 进制调制。因为资源块数 $K = 4$,因此需要设计 4 个不同的星座图,且每个星座图包括 Md_f 个星座点,其中 $d_f = 3$ 为每个资源块上叠加的用户数。文献[4]提出的基于 QAM 调制的 SCMA 码本设计方法如下。对于资源块一,因为 $M = 4$,所以绘制两个以原点为圆心的同心圆,且 $r_2 = \alpha r_1$ 。然后将圆 d_f 等分,且任何一条等分线与两个圆的 4 个交点按照格雷编码为 00, 01, 11, 10, 如图 5 所示。而对于剩下的资源块($k = 2, 3, 4$)的星座图,则以资源一的星座为母星座,逆时针旋转生成。在文献[4]中,内外半径比 α 固定为 0.33。

同时,接收端基于消息传递算法的用户检测性能取决于 3 个指标^[12]:不同资源块上同一用户的同一码字的距离;同一资源块上不同用户的同一码字的距离;同一资源上同一用户不同码字的距离。而文献[4]中基于 QAM 的 SCMA 码本设计只考虑到了后两个指标。因此,为了使不同资源块上同一用户的同一码字的最小距离最大化,在本文提出的交替编码中规定,当用户出现的次数为偶数次时,编码顺序为 10, 11, 01, 00;当用户出现的次数为奇数次时,编码顺序为 00, 01, 11, 10。以用户一为例,当用户一在资源一上第一次出现时,星座图从下到上 4 个星座点的编码顺序为 00, 01, 11, 10, 如图 6(a) 所示。当用户一在资源二上第二次出现时,星座图从下到上 4 个星座点的编码顺序为 10, 11, 01, 00, 如图 6(b) 所示。从图 7 可以看出,通过采用交替编码,资源一和资源二上的用户一的同一码字的距离明显增大,这将使得接收端 MPA 算法中同一用户同一码字传递给不同资源块的置信信息的差值增大,从而使接收端的误码率下降。另外,同文献[4]中将内外半径比 α 固定为 0.33 的做法不同,本文提出的交替编码算法通过仿真获得更优的内外半径比,从而使系统获得更低的误码率。

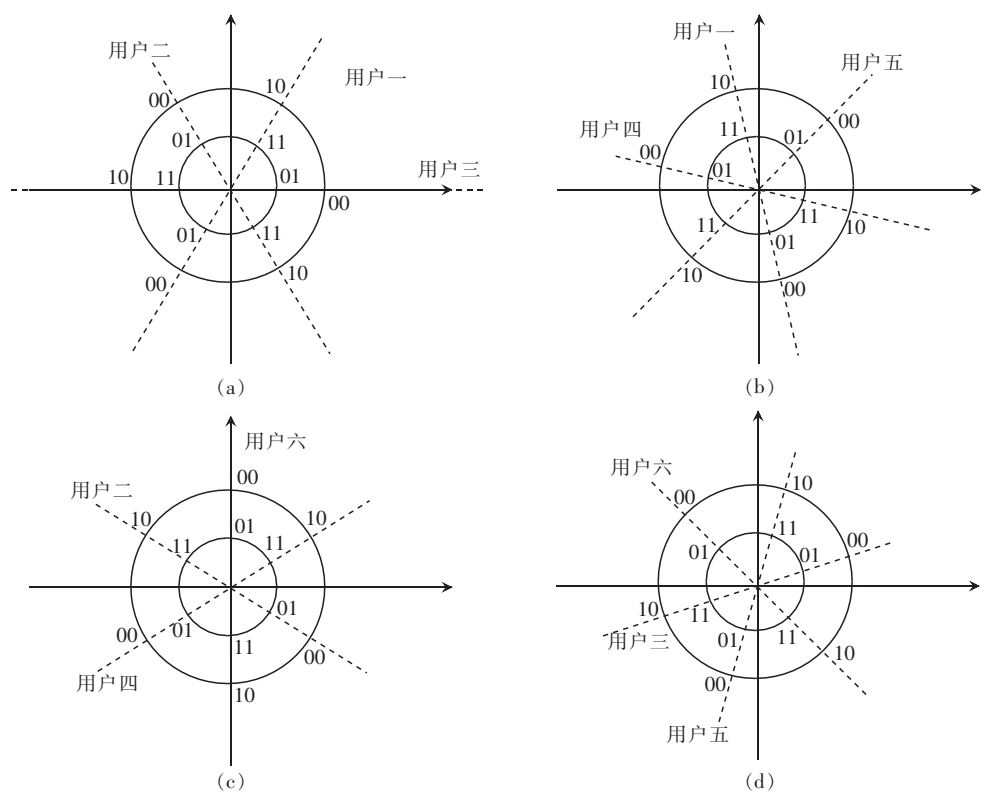


图 5 基于传统 QAM 调制的 SCMA 码本设计

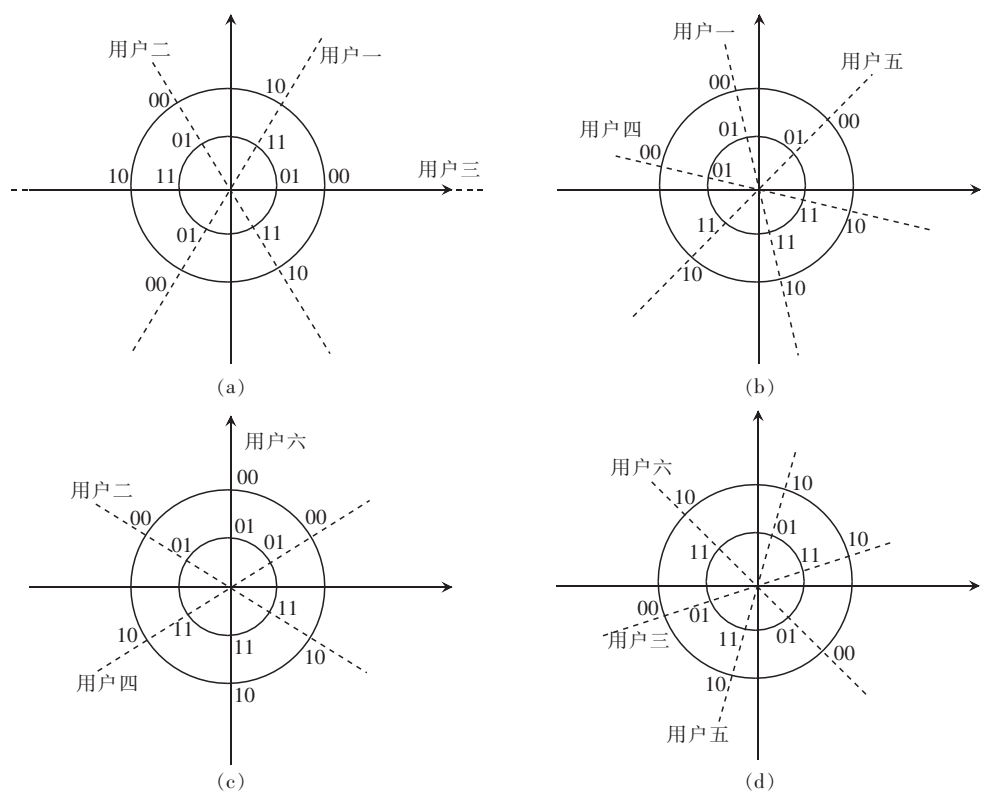


图 6 基于交替格雷编码的 SCMA 码本设计

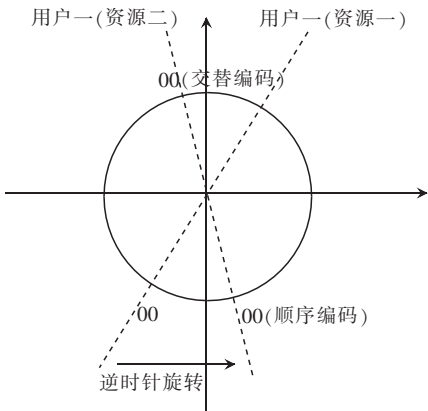


图 7 交替编码的原理

3 系统仿真

以下行 SCMA 系统为模型,在加性高斯白噪声的信道条件下,对基于交替编码的 SCMA 码本设计进行了误码率性能的仿真。首先研究交替编码中不同的星座图的参数设定,以找到近似最优的 SCMA 码本,再将该码本设计与传统的 SCMA 码本设计应用于同一系统时的误码率性能进行比较。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数	设置
资源总数 K	4
用户数 J	6
稀疏度 N	2
调制阶数 M	4
接收机 MPA 算法迭代次数	15
信道类型	加性高斯白噪声信道

3.1 交替编码算法的星座图参数优化

本文提出的交替编码方案核心思想是根据用户在资源块上出现的次数来决定格雷编码的顺序。基于传统 QAM 的码本设计内外环半径比固定为 0.33,资源块之间的旋转角固定为 $\pi/6$ 。在本文提出的交替编码方案中内外环半径比和旋转角应该如何设置才能使得性能最佳呢? 本文做了如下仿真: 将内外圆环的半径比设置为 0.20,0.26,0.33,0.40,资源块之间的旋转角设置为 $\pi/12,\pi/6,\pi/4$, 本文对相应的码本应用于系统时的系统误码率进行仿真统计,仿真结果分别如图 8、图 9 所示。当基于交替编码的 QAM 星座图码本设计在内外环半径比为 0.2,资源块之间的旋转角度为 $\pi/6$ 时,系统的误码率达到最低。原因是该参数设置下,同一资源块上同一用户不同码字的距离足够大,因此误码率的

性能得到了进一步改善。

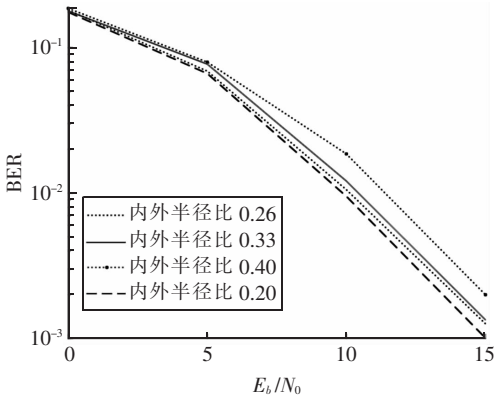


图 8 资源块内外同心圆半径比对 SCMA 系统误码率的影响

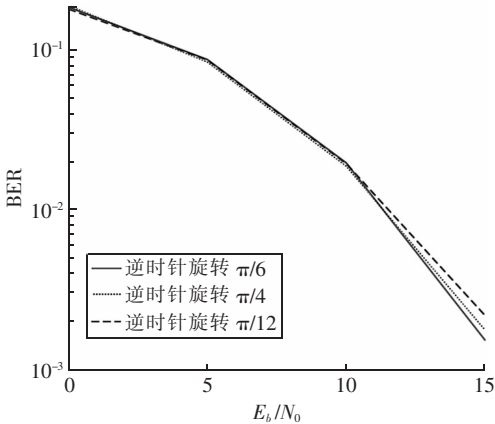


图 9 资源块旋转角度对 SCMA 系统误码率的影响

3.2 多种 SCMA 码本设计方式的误码率性能对比

通过对交替编码的星座图参数优化,本文找到了近似最优的 SCMA 码本设计方法。本文将该码本设计方法与现有其他不同的码本设计方法进行比较,主要仿真分析不同码本应用于系统之后的误码率性能,结果分别如图 10、图 11 所示。

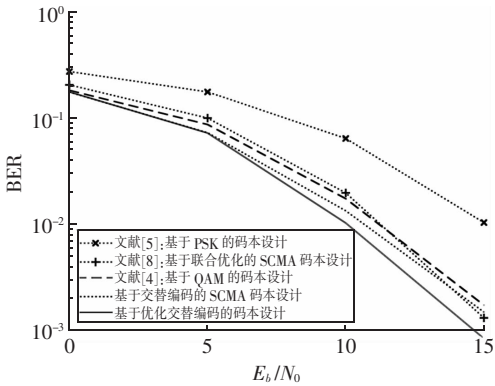


图 10 交替编码与常见 SCMA 码本设计方法的误码率性能比较

从图 10 可以看出,半径比为 0.33 的交替格雷编码的误码率性能明显优于基于传统 QAM 和 PSK

的 SCMA 码本设计。这是因为通过观察消息传递算法的置信信息式(2)、式(3)可知,MPA 消息传递算法的性能取决于 3 个指标:不同资源块上同一用户的同一码字的距离;同一资源块上不同用户的同一个码字之间的距离;同一资源上同一用户不同码字的距离。基于 PSK 调制的星座图由于等幅度的特点,没有充分利用星座图的幅度空间导致各星座点距离较小,因此误码率性能最差。传统的基于 QAM 调制的 SCMA 码本设计并没有考虑到不同资源块上同一用户的同一码字的距离,而本文提出的交替编码算法增加了该距离,使得在本次迭代中,不同资源块传给同一用户的置信信息差值大。与此同时,由于同一用户传给不同资源的置信信息取决于本次迭代中不同资源块给同一用户的置信信息。因此,经过多轮迭代后,有效降低了接收端判决的难度。

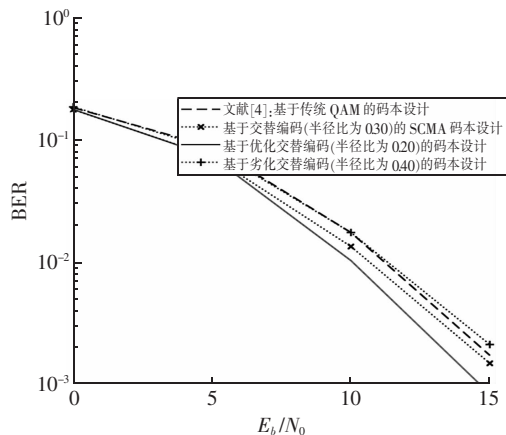


图 11 交替编码与基于 QAM 的 SCMA 码本设计方式的误码率性能比较

图 11 给出了文献[4]传统的基于 QAM 调制的 SCMA 码本设计和本文提出的交替编码算法在不同同心圆内外半径比下的误码率性能。当交替编码算法也采用与文献[4]方法相同的内外半径比(0.33)时,使用交替编码算法的误码率也低于文献[4]的方法。当把交替算法中的同心圆内外环半径比设置为 0.20 时,误码率的性能相较于半径比为 0.33 时得到了较大的改善。因此,本文提出的交替算法优于文献[4]的方法来源于两个因素,一个是交替编码策略,另一个是精心选取的同心圆内外环半径比。因为这两个因素都增大了同一资源上同一用户不同码字的距离,从而导致用户取不同码字的置信信息的差值增大,使得误码率减小。

4 结束语

在 SCMA 系统的通信过程中,优秀的用户码本

可以在固定资源总数的情况下,提高系统的最大用户接入数,并降低接收端消息传递算法的误码率即判决难度。本文研究了基于理想高斯白噪声信道条件下的稀疏码分多址系统(SCMA)的码本设计。首先,从传统的 QAM 星座图码本设计出发,并考虑到不同资源块上同一用户的同一码字的距离,提出交替编码的方法。同时,本文通过多次调整星座图的参数并仿真来找到较优的半径比和旋转角度。仿真结果表明,本文提出的基于交替编码的 QAM 星座图码本设计在内外环半径比为 0.20,旋转角度为 $\pi/6$ 时,误码率性能要明显好于基于 PSK 调制和 QAM 调制的 SCMA 码本设计。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(5): 551–563.
YOU Xiaohu, PAN Zhiwen, GAO Xiqi, et al. The 5G mobile communication: the development trends and its emerging key techniques[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2014, 44(5): 551–563. (in Chinese)
- [3] 杨正. 5G 移动网络非正交多址接入及相关技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
YANG Zheng. Investigation of non-orthogonal multiple access and related techniques for the 5th generation mobile networks[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [4] YANG C, JING S S, LIANG X, et al. A low-complexity codebook design for large-scale SCMA[C]//IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems. 2018: 195–198.
- [5] 赵耿, 马艳艳, 马英杰. 基于混沌序列的 SCMA 码本设计及系统性能分析[J]. 通信学报, 2019, 40(2): 137–144.
ZHAO Geng, MA Yanyan, MA Yingjie. Design of SCMA codebook based on chaotic signal and system performance analysis[J]. Journal on Communications, 2019, 40(2): 137–144. (in Chinese)
- [6] ALAM M, ZHANG Q. Designing optimum mother constellation and codebooks for SCMA[C]//IEEE International Conference on Communications. 2017: 1–6.
- [7] ALAM M, ZHANG Q. Performance study of SCMA codebook design[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2017: 1–5.
- [8] ZHAI D S, SHENG M, WANG X J, et al. Joint codebook design and assignment for detection complexity minimization in uplink SCMA networks[C]//IEEE 84th Vehicular

Technology Conference (VTC-Fall). 2016:1 – 5.

[9] YANG L, MA X Y, SIU Y. Low complexity MPA detector based on sphere decoding for SCMA[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(8):1855 – 1858.

[10] YU L S, LEI X F, FAN P Z, et al. An optimized design of SCMA codebook based on star-QAM signaling constellations[C] //International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. 2015:1 – 5.

[11] 刘英杰. NOMA 与 SCMA 非正交多址接入系统仿真分析[D]. 成都:西南交通大学, 2016.

LIU Yingjie. Simulation and analysis of NOMA and SCMA non-orthogonal multiple access systems [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)

[12] 杨维, 侯健琦, 赵懿伟. 基于串行的 SCMA 低复杂度多用户检测算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(2):106 – 111.

YANG Wei, HOU Jianqi, ZHAO Yiwei. Serial based low complexity multiuser detection algorithm for SCMA system [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(2):106 – 111. (in Chinese)

声 明

为适应我国信息化建设的需要,扩大作者学术交流渠道,实现期刊编辑、出版工作的网络化,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》全文数据库、《万方数据——数字化期刊群》和《中文科技期刊数据库》,并已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中,以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文,作者著作权使用费随本刊稿酬一次性给付。如不同意将文章编入相关数据库,请在来稿时声明,本刊将做适当处理。

本刊编辑部