

多用户共享接入系统扩展序列优化与改进

邵凯^{*①②} 赵小丽^① 王光宇^① 武汉^③
^①(重庆邮电大学移动通信重点实验室 重庆 400065)
^②(坦佩雷理工大学电子与通信工程系 芬兰 FI-33101)
^③(中兴通讯股份有限公司南宁办事处 广西 530022)

摘要: 多用户共享接入是一种非正交多址接入技术, 由于采用了复数域扩频技术, 其性能必然受到扩展序列的影响, 因此需要对扩展序列进行优选和改进。针对现有序列优选算法在进行互相关优选时只考虑了互相关峰值的影响, 该文提出一种改进的序列优选算法, 该优选算法同时考虑了互相关峰值和互相关均方值的影响, 仿真分析表明, 系统使用该文提出的优选算法比使用现有的优选算法优选出的序列在相同 BER 时, 可以改善 0.9 dB 左右的 SNR 性能。此外, 扩展序列的随机选取会导致序列发生碰撞, 为降低碰撞概率, 该文利用星座图的增益指数特性, 提出一类改进的复扩展序列。该文提出的改进复序列比 MUSA 使用的三元复序列具有更高的星座图增益指数, 经过优选后, 可以优选出数量更多的优良序列, 在相同 BER 下与优选后的三元复序列相比, 可以改善 1 dB 左右的性能, 在 BER 为 10^{-3} 时, 用户过载率可以提高 15% 左右, 进一步改善系统性能。

关键词: 多用户共享接入; 非正交多址接入; 复数域扩频; 扩展序列; 星座图增益指数

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)04-0832-07

DOI: 10.11999/JEIT170618

Optimization and Improvement of the Spreading Sequence in Multi-user Shared Access System

SHAO Kai^{*①②} ZHAO Xiaoli^① WANG Guangyu^① WU Han^③

^①(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(Department of Electronics and Communications Engineering, Tampere University of Technology, Finland FI-33101, Finland)

^③(Nanning Office of Zhongxing Telecommunication Equipment Corporation, Guangxi 530022, China)

Abstract: Multi-User Shared Access (MUSA) is a non-orthogonal multiple access technology, and its performance will be affected by the spreading sequence due to the usage of complex domain spread spectrum technology, so the spreading sequences should be optimized and improved. Considering the problem that only the influence of cross-correlation peak is taken into account in the process of cross-correlation optimization in the existing optimization algorithm, an improved spreading sequence optimization algorithm is proposed. Both the influences of cross-correlation peak and the cross-correlation mean square are taken into consideration. The simulation results show that the proposed algorithm can promote 0.9 dB SNR performance in the same BER than the existing algorithm. In addition, the random selection of the spreading sequences will lead to the collision of the sequence. In order to reduce the collision probability, a set of improved complex spreading sequences based on constellation figure of merit is proposed. The proposed complex sequence has a higher constellation figure of merit than the triple-level complex spreading sequence. Additionally, more excellent spreading sequences can be obtained after optimization, and when compared with the optimized triple-level complex spreading sequence, the SNR performance can promote about 1 dB in the same BER and the user overloading ratio can improve 15% when BER is 10^{-3} , which can further promote the performance of MUSA system.

Key words: Multi-User Shared Access (MUSA); Non-orthogonal multiple access; Complex domain spread spectrum; Spreading sequence; Constellation figure of merit

收稿日期: 2017-06-28; 改回日期: 2017-11-20; 网络出版: 2017-12-12

*通信作者: 邵凯 shaokai@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX03001010), 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1704098)

Foundation Items: The National Science and Technology Major Project (2016ZX03001010), The Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJ1704098)

1 引言

移动通信系统中，多址接入技术是满足多个用户同时通信的必要手段^[1]。从第 1 代移动通信(1G)到第 4 代移动通信(4G)分别采用 FDMA, TDMA, CDMA 和 OFDMA 作为主要的多址接入方案，它们都是正交多址接入方式。而为了满足第 5 代移动通信(5G)海量连接、高频谱效率、高可靠低时延等要求，非正交多址接入方案成为研究的热点^[2-4]。现有的非正交方案中，中兴提出的多用户共享接入^[5](Multi-User Shared Access, MUSA)实现了免调度传输，并且支持 300% 以上的用户过载；华为提出的稀疏码分多址^[6](Sparse Code Multiple Access, SCMA)使得信道过载能力提升了 300%；大唐电信提出的图样分割多址^[7](Pattern Division Multiple Access, PDMA)降低了复杂度。

MUSA 是一种码域的，基于扩频通信的多址接入方案，每个用户从一组复数域三元序列中随机选取各自的扩展序列作为扩频码，并将各自的调制符号进行扩展，然后在相同的时频资源里叠加发送；在接收端，使用基于串行干扰消除的多用户检测技术解调和分离出每个用户的数据。由于 MUSA 使用了复数域扩频技术，因此扩展序列对 MUSA 系统而言是至关重要的。文献[5]中提出扩展序列会直接影响 MUSA 的性能以及接收机复杂度。文献[8]中指出，设计出具有更低相关性的扩展序列是未来工作的研究重点。文献[9]中指出，序列碰撞会导致误码率的增加，从而使得系统总的吞吐量严重下降。因此，对扩展序列的研究中，寻找数量更多、性能更优的扩展序列以及避免序列间的碰撞是研究的重点。

三元复序列的优点在于序列数量较多，但其中有部分序列因为性能较差并不适合作为扩展序列，必须对序列进行优选。而现有的序列优选算法只考虑了互相关峰值的影响，没考虑互相关均方值的影响，针对现有算法存在的问题，本文提出一种改进的序列优选算法，该算法同时考虑了互相关峰值和互相关均方值的影响。仿真分析表明，本文所提序列优选算法优选出的序列性能更优，能够提高系统性能。由于序列是随机选取的，存在碰撞的可能，为了降低序列碰撞概率，本文利用星座图增益指数提出一种改进的复扩展序列，理论分析和仿真结果表明：改进扩展序列能够优选出数量更多的优良序列，可以进一步提高系统性能。

2 系统模型

MUSA 是一种基于复数域多元序列的新型非正交多址接入技术，它是一种上行多址接入方案，其原理模型如图 1 所示。

首先，在发送端，各个用户使用复数域多元序列将用户的调制符号扩展到相同的时频资源发送；在接收端，使用 SIC 接收机分离出各个用户的数据。

假设有 M 个接入用户，每个用户随机选取扩频序列，然后将其调制符号扩展到相同的时频资源，经过信道后的接收信号可以表示为

$$y = \sum_{m=1}^M h_m t_m + n \tag{1}$$

其中， $t_m \equiv s_m * x_m \equiv [t_m(1), t_m(2), \dots, t_m(NL_1)]$ 表示经过扩频后的符号， $s_m * x_m$ 表示 s_m 和 x_m 进行扩频后的符号，是扩频操作， $x_m = [x_m(1), x_m(2), \dots, x_m(L_1)]$ 表示发送的调制符号， s_m 是扩频信号， N 和 L_1 分别表

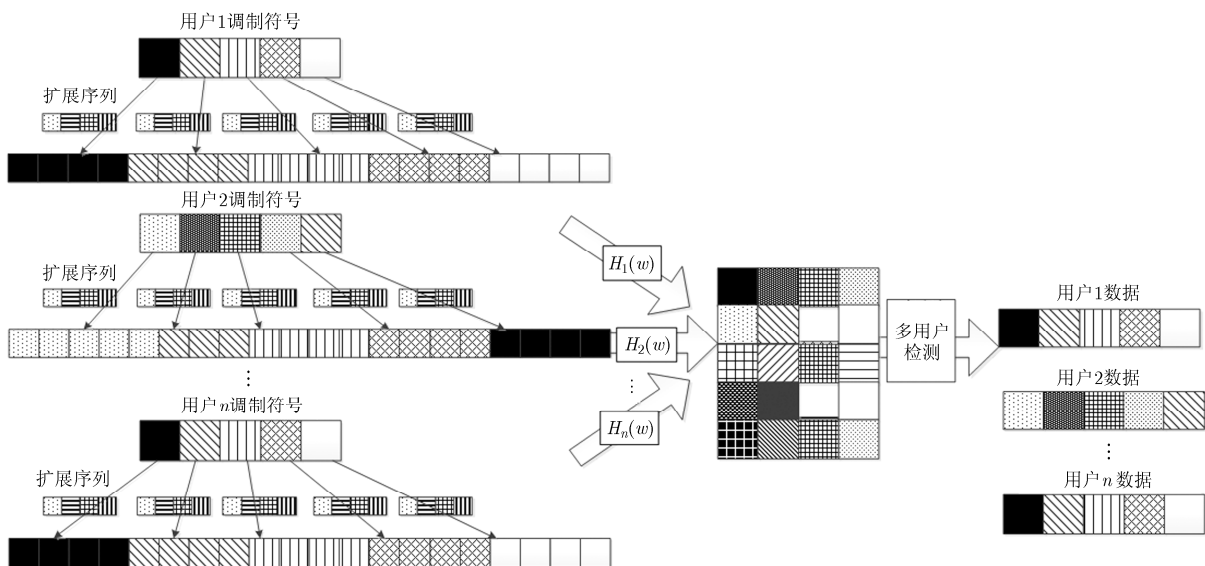


图 1 MUSA 系统模型

示扩展序列的长度和发送调制符号的长度, \mathbf{n} 是均值为 0, 方差为 σ^2 的加性高斯白噪声。

为了更加方便的使用 MMSE 权重矩阵估计发送信号 \mathbf{x} , 可以将接收信号表示成矢量的形式:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)^H$, \mathbf{H} 是用户信道增益和扩展序列组成的等效信道矩阵, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_M)^H$, $\mathbf{n} = (n_1, n_2, \dots, n_N)^H$, $(\mathbf{x})^H$ 表示的是矩阵 \mathbf{x} 的埃尔米特(Hermitian)矩阵形式。

3 复扩展序列

MUSA 系统所使用三元复序列, 其序列的实部和虚部分别取值于一个三元集合 $\{-1, 0, 1\}$, 该序列中元素的星座图如图 2 所示。

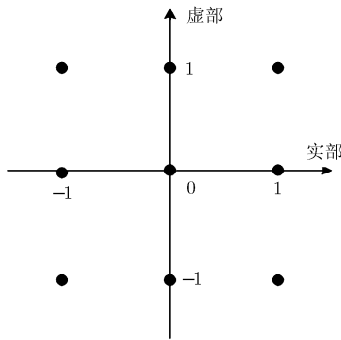


图 2 三元复序列元素星座图

该类序列的优点在于即使序列很短, 如长度为 8 甚至为 4 也能够取得较好的互相关性能, 并且短的扩展序列能够避免较长的时频展宽, 节省发射功率以及降低接收机复杂度。但是该类序列的缺点也很明显, 首先, 由于 MUSA 系统本身所使用的扩展序列是随机选取的, 虽然能够取得较好的效果, 但是随机生成的三元复序列中有部分序列由于性能较差不适合作为扩展序列。为了进一步提升 MUSA 系统性能, 需要对扩展序列进行优化, 选出一组性能较好的扩展序列集。其次, 用户随机选取的扩展序列存在碰撞的可能, 而序列碰撞会影响系统性能, 因此希望构造出数量更多的扩展序列集合。

4 序列优化与改进

4.1 序列优选

由于三元复序列中有部分序列性能较差不适合作为扩展序列, 需要对序列进行优选。而现有的序列优选算法在进行互相关优化时只考虑了互相关峰值的影响, 没有考虑互相关均方值的影响^[10]。因此需要对优选算法进行改进, 在进行互相关优选时, 需同时考虑互相关峰值和互相关均方值的影响。

对扩展序列的优化中, 一般考虑平衡性准则、相关性准则, 由于 MUSA 使用的三元复序列中包含元素 0, 因此对其优化时需要考虑元素 0 的影响。

4.1.1 优选准则以及阈值选取

(1) 0 元素准则: 扩展序列中 0 元素个数过多, 会导致用户数据的丢失, 增大系统的误码率, 但要是扩展序列中不允许 0 元素的存在, 所构造出的扩展序列的数量相对于原三元复序列要少得多。因此, 元素 0 还是要继续保留下来, 只需要对其个数进行限制即可。为了更好地分析序列中元素 0 的个数对系统性能的影响, 本节做了以下仿真, 仿真场景设置如下:

3 组用户, 每组 4 个用户, 其中组 1 用户均随机选取扩展序列, 另外二组用户作为对比, 组 2 中的 3 个用户随机选取序列, 另外一个用户选取包含 1 个 0 元素的特定序列, 组 3 中的 3 个用户随机选取序列, 另外一个用户选取包含 2 个 0 元素的特定序列, 模拟序列中 0 的个数对系统的影响。图 3 为仿真结果。由于扩展序列的每一个元素均是从 $\{-1-i, -1+i, -i, -1, 0, 1, i, 1-i, 1+i\}$ 这 9 个元素中随机选取的, 对于长度为 4 的扩展序列来说, 通过排列组合, 一共可以构造出 $9^4 = 6561$ 个序列, 所以用户就是从这个 6561 个序列集合中随机选取扩展序列。

仿真参数设置如下: 每组用户数为 4, 使用长度为 4 的三元复序列, AWGN 信道, 1/2 速率的 Turbo 编码, QPSK 调制, 本文仿真图中 BER 均为所有用户的平均 BER。

从图 3 中可以看出, 用户组 3 对应的系统性能最差, 用户组 1 和用户组 2 对应的系统性能相当。这是因为用户组 3 中有一个用户的扩展序列包含 2 个 0, 0 元素过多导致用户有效信息损失较大, 最终导致系统性能较差。因此, 对于长度为 4 的扩展序列, 其元素中 0 的个数不能多于 1 个。

(2) 平衡性准则: 对于三元复扩展序列来说,

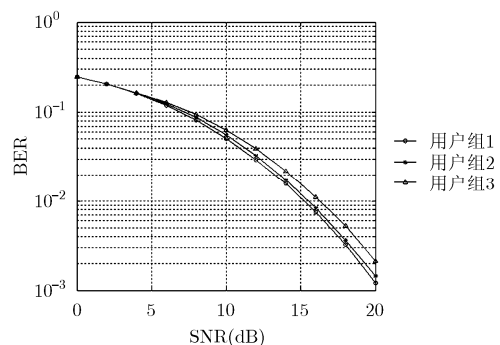


图 3 扩展序列中 0 对系统的影响

若该序列中各个元素的个数之差小于等于 1，则称该序列是平衡的^[11]。文献[12]中指出，序列的平衡性与载波抑制程度有关，具有较好平衡性的扩展序列对载波抑制程度较好，而不平衡性的序列会导致载波的泄露。因此若序列是平衡的，则保留该序列，否则丢弃。

(3)相关性准则：扩展序列具有优良的相关性是扩频系统的关键，对系统性能影响较大。相关性又分为自相关特性和互相关特性两个方面，自相关特性与序列的检测密切相关，互相关特性与多址干扰有关。自相关和互相关又分别包含两个方面，即自相关旁瓣最大值 R_M 、自相关旁瓣均方值 R_A 和互相关峰值 C_M 、互相关均方值 C_A ，其分别表征了多径干扰和多址干扰对系统的最坏影响和平均影响。

通过分析三元复序列以及参考现有关于四相序列的文献[13,14]，上述 4 个值分别取值于由 $\{1, -1, i, -i\}$ 组成元素不重复的等长扩展序列集对应的平均值，通过计算，其值分别为 0.5197 和 0.1806 以及 0.6326 和 0.1651。

4.1.2 改进优选算法描述 序列优选流程如图 4 所示。待优选序列集合为所有三元复序列构成的集合。通过上述优选准则优选可以得到性能较优的扩展序列。进行序列互相关优选时，序列两两互相关特性的计算量一般都比较大会比较大，需要通过相应的算法来实现。现有的优选算法进行互相关优选时，只考虑了互相关峰值的影响，没有考虑互相关均方值的影响。本文提出的改进序列优选算法在进行序列互相关优化时同时考虑了互相关峰值和互相关均方值的影响，提出的改进算法实质上就是对序列互相关特性的优选。在进行互相关优选时，主要是利用序列互相关均方值矩阵对序列进行优选。

序列两两互相关均方值矩阵如表 1 所示， C_{ij} 表示序列 i 和序列 j 的互相关均方值，若序列的互相关均方值及其峰值均小于所设定的阈值，则 $C_{ij} = 1$ 对应的矩阵中的值设置为 1，否则设置为 0。若 $i = j$ ，则 $C_{ij} = 1$ ，它所对应的是互相关均方值矩阵的对角线元素，也即序列的自相关值，由于进行多级互相关优选的序列都是满足自相关特性的，因此互相关均方值矩阵中对角线上的元素全部设置为 1。并且根据对称性可知， $C_{ij} = C_{ji}$ 。

表 1 互相关均方值矩阵

序列	序列 1	序列 2	...	序列 n
序列 1	1	C_{12}	...	C_{1n}
序列 2	C_{21}	1	...	C_{2n}
⋮	⋮	⋮	1	⋮
序列 n	C_{n1}	C_{n2}	...	1

算法具体步骤如下：

步骤 1 计算矩阵中每一行的和，取和最大的一行(若有多个最大值，取序号最小的一行)，在此行中找出元素为 1 的下标，这些下标对应的行即是满足互相关准则的序列所在的行。求满足互相关准则的序列所在行元素之和(将上述最大值所在行除去)，并取和最大的那行(如有多个最大值，按上述方法处理)。将以上所求和最大的两行逐位进行与运算，借助 MATLAB 中的 Find 函数找出运算结果中元素为 0 的下标，这些元素 0 的下标所对应的扩展序列是不满足互相关准则的，在均方值矩阵中，应当将这些 0 元素所对应的下标所在的行和列全部舍弃。

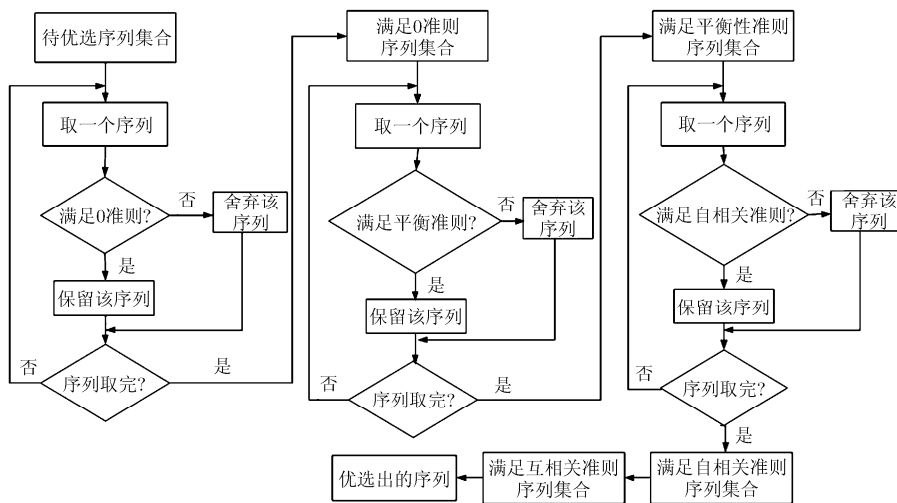


图 4 扩展序列优选流程图

步骤 2 对于步骤 1 所生成的矩阵, 计算元素不全为 1 的每一行的和, 并找出和最大的那一行(如有多个最大值, 按上述方法处理), 并借助 Find 函数找出这一行中元素为 0 的下标, 将这些元素 0 所在的行和列舍去。

步骤 3 重复步骤 2, 直至矩阵中不包含元素 0, 该矩阵中的扩展序列即可满足互相关准则, 即两两互相关都小于设定的阈值, 这些就是最终优选出的扩展序列, 使用这些优选出的序列作为 MUSA 的扩展序列可以保证系统的性能较好。

对于长度为 4 的复三元序列, 扩展序列的每一个元素都是从 $\{-1-i, -1+i, -i, -1, 0, 1, i, 1-i, 1+i\}$ 这 9 个元素中随机选取的, 共有 $9^4 = 6561$ 个序列, 根据 ‘0’ 准则, 应舍弃 417 个序列; 在满足 ‘0’ 准则所构成的序列集合中, 根据平衡性准则, 其中有 264 个序列不符合平衡性要求; 对于满足平衡性准则的序列集中, 有 1448 个序列不满足自相关准则。由于序列互相关对系统影响较大, 互相关阈值设定的比较小, 经过互相关准则优选之后, 最终优选出 130 个扩展序列。

4.1.3 改进序列优选算法性能分析 为了分析本文改进优选算法的性能, 首先比较了 MUSA 系统采用未优选的三元复序列、文献[10]中优选算法优选出的序列以及本文所提改进优选算法优选出的序列作为扩展序列时系统 BER 曲线。仿真参数如表 2 所示。

图 5 为扩展序列长度 $N = 4$, 用户数 $M = 4$,

表 2 仿真参数设置

参数名	参数取值
扩展序列长度 N	4
用户数 M	4, 8
调制方式	QPSK
Turbo 编码速率	1/2
信道模型	高斯信道, 瑞利信道
信道估计	理想

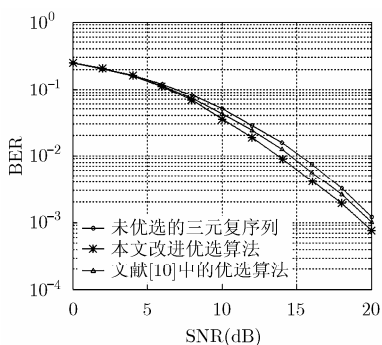


图 5 不同优选算法系统 BER 性能比较

AWGN 信道下, 采用本文改进优选算法优选出的序列、文献[10]优选算法优选出的序列以及原三元序列作为扩展序列时, 系统 BER 性能比较曲线。从该图可以看出, 未优选的三元复序列的性能最差, 文献[10]中的优选算法优选出的序列作为扩展序列的性能次之, 本文改进的优选算法优选出的序列性能最好。通过仿真发现, 虽然 MUSA 使用的三元复序列的确可以取得较好的性能, 但是由于三元复序列中有一些序列的性能较差, 并不适合作为 MUSA 系统的扩展序列, 因此对应的 BER 性能最差。通过 ‘0’ 准则、平衡性准则以及相关性准则对序列优选, 可以保证优选出的序列性能较好, 从而进一步提升系统的性能。文献[10]中的优选算法只考虑了互相关峰值的影响, 而未考虑互相关均方差的影响, 优选出的序列性能不是最优的。而本文改进算法同时考虑了互相关峰值和互相关均方差的影响, 保证优选出的序列性能更好, 其对应的系统 BER 性能比采用文献[10]中的算法更好。

与此同时, 将 MUSA 与 OFDMA 结合, 验证本文所提改进优选算法在多载波条件下的性能, 其中, 每个用户使用 4 个资源块, 与 LTE 中每个用户单独使用一个或者多个资源块不同的是, MUSA 允许一个或者多个资源块可以被多个用户共用。图 6 给出了其在瑞利衰减信道条件下系统 BER 性能曲线。其中用户使用 4 个资源块, 其他仿真参数与表 2 对应的参数相同。从图 6 可以看出, 虽然在多载波条件下系统整体性能有所下降, 但是本文提出的改进优选算法对应的性能仍是最优的, 未进行优选的序列对应的性能最差。在 BER 为 10^{-2} 级别时, 使用改进优选算法比文献[10]中的算法所需 SNR 要低 1 dB 左右, 与图 5 得出的结论相一致, 从而验证了改进算法的有效性。

4.2 序列改进

由于序列是随机选取的, 存在碰撞的可能, 并且序列碰撞会影响系统性能。为了降低序列碰撞概

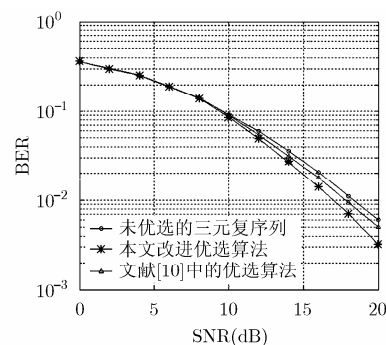


图 6 不同优选算法在多载波条件下系统 BER 性能比较

率提升系统性能，希望构造出数量更多的优良序列。基于此，本文提出一种改进的复扩展序列，该类改进序列可以优选出数量更多优良扩展序列。

4.2.1 改进扩展序列 改进复扩展序列元素星座图如图 7 所示，为了更好地比较本节所提新的复序列和 MUSA 使用的三元复序列的性能，首先引入星座图增益指数(Constellation Figure of Merit, CFM)这一概念，它反映了星座图的效率，在星座图维度较小时，CFM 越大则星座图的误码率也就越低^[15]。因此，设计具有较低误码率的星座图的问题就可以转换成最大化 CFM 的问题。对于 2 维星座图来说，CFM 可以表示为

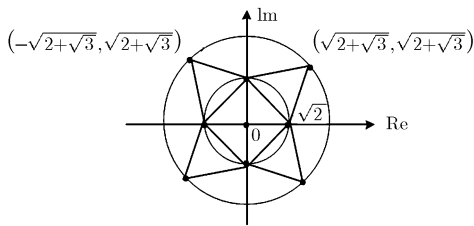


图 7 改进复扩展序列元素星座图

$$CFM = d_{\min}^2 / E_{\text{avg}} \quad (3)$$

其中， d_{\min} 表示的最小欧氏距离， E_{avg} 表示的是星座图的平均功率。

由图 2 和图 7 可知，MUSA 使用的三元复序列元素对应的星座图的最小欧式距离 $\bar{d}_{\min} = 1$ ，平均功率 $\bar{E}_{\text{avg}} = 12/9$ ；而本节所提改进复序列元素对应星座图的最小欧氏距离 $\bar{d}_{\min} = 2$ ，平均功率 $\bar{E}_{\text{avg}} = (24 + 8\sqrt{3})/9$ 。MUSA 的三元复序列和本节所提改进的复序列的 CFM 值分别为 0.75 和 0.95，因此本节所提改进的复序列星座图性能要优于 MUSA 所使用的复数域三元序列对应的星座图。基于此，考虑使用本节提出的改进复序列作为扩展序列，并与原三元复序列进行比较。

4.2.2 改进扩展序列性能分析 为了比较本节所提改进的复数域扩展序列的性能，同样使用 4.1 节中的序列优选算法对该类序列进行优选，并且选择和前一节对三元复序列优化时相同的阈值。由于采用的优选标准是一致的，因此，可以根据优选后所得到的扩展序列的数量进行性能比较，若本节所提改进复数域序列经过优化后的序列数量比 MUSA 使用的三元复序列要多，则称本节所提改进复序列要优于三元复序列。因为两种复序列结构的相似性，因此，通过‘0’准则和平衡性准则所舍弃的序列数量是一样的，因此在对新的复序列进行优化时，可

以不用再进行‘0’准则和平衡性准则的优化而直接给出相应的结果。

经过‘0’准则和平衡性准则优选后，分别有 417 和 264 个序列不满足相应的条件，应舍弃；经过自相关旁瓣最大值和自相关旁瓣均方值准则优选后，分别有 1064 和 32 个序列不满足相应的条件；经过互相关优化算法进行优选后，最终剩余 216 个序列。

表 3 列出了序列经过相应优选准则优选出的序列数。

表 3 优选结果

序列	0 准则	平衡性	自相关	互相关
三元复序列	6144	5880	4432	130
改进复序列	6144	5880	4784	216

通过上述分析可知，改进复序列可以优选出数量更多的扩展序列，在此将从 MUSA 系统的 BER 和过载率两个方面对改进复序列的性能做进一步的仿真分析。

图 8 为 $N = 4$ ，AWGN 信道下，使用不同扩展序列系统用户过载率与 BER 关系曲线。从图 8 可以看出，使用不同扩展序列在同一 BER 下所对应的系统用户过载率不同，未进行优化的三元复序列所能支持的用户过载率最小，本文所提改进复序列能支持的用户过载率最大。在 BER 为 10^{-3} 时，改进复序列和优化后的三元复序列比未优化的三元复序列分别多 25% 和 15% 左右的用户过载。这是由于未进行优选的三元复序列有部分序列的性能较差，从而导致系统性能较差，经过优选后的三元序列可以在一定程度上改善系统性能，而本文提出的改进复序列经过优选后可以构造出更多性能优良的序列，能够进一步降低序列发生碰撞的概率。因此使用改进的复序列相对于优化后的三元复序列，MUSA 系统能够支持更大的用户过载率，从而进一步证明了选择数量更多、性能更优的序列作为扩展序列能够改善 MUSA 系统的性能。

图 9 为 $N = 4$ ， $M = 4$ ，每个用户使用 4 个相同资源块，瑞利衰落信道下，使用不同扩展序列系统在多载波条件下 BER 性能比较。从图 9 可以看出，即使 MUSA 与 OFDMA 结合，本文改进复序列性能依然是最好的，在 BER 为 10^{-2} 时，使用改进复序列比优化后和未优化的三元复序列分别低 1 dB 和 2 dB 左右，从而表明优良序列的数量越多，系统性能越好，验证了本文所提改进复序列的性能。

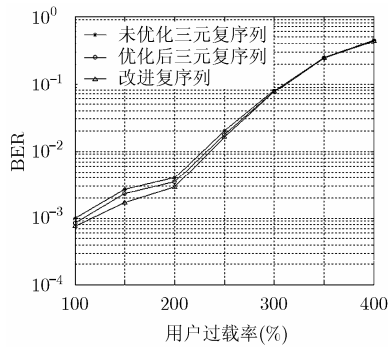


图8 不同序列系统过载率与BER关系曲线

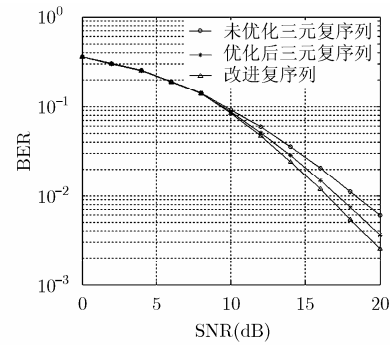


图9 不同序列在多载波条件系统BER性能比较

5 总结

本文主要针对 MUSA 系统, 提出了一种改进的序列优选算法。该改进算法由于同时考虑了互相关峰值和互相关均方值的影响, 经过该算法优选出的扩展序列, 能够保证更好的互相关性能, 克服了现有算法只考虑了互相关峰值的缺点, 仿真分析表明, 系统使用本文提出的优选算法比使用现有的优选算法优选出的序列在 BER 和用户过载方面具有更好的性能。此外, 本文利用星座图增益指数的特性提出了一类改进的复扩展序列, 经过优选, 该类序列可以优选出数量更多的序列。仿真分析与结果表明: 使用本文所提改进复序列可以进一步提升系统性能。

参考文献

- [1] DAVID Tse and PRAMOD Viswanath. Fundamentals of Wireless Communication[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 2-3.
- [2] IMT-2020 (5G)推进组. 5G 概念白皮书[R]. 2015: 1-18. IMT-2020(5G) Promotion. 5G concept white paper[R]. 2015: 1-18.
- [3] 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]. *Science China: Information Sciences*, 2014, 44(5): 551-563.
- [4] YUAN Yifei and ZHU Longming. Application scenarios and enabling technologies of 5G[J]. *Communications China*, 2014, 11(11): 69-79.
- [5] 袁志锋, 郁光辉, 李卫敏. 面向 5G 的 MUSA 多用户共享接入[J]. 电信网技术, 2015(5): 28-31. YUAN Zhifeng, YU Guanghui, and LI Weimin. Multi-User Shared Access for 5G wireless networks[J]. *Telecommunications Network Technology*, 2015(5): 28-31.
- [6] NIKOPOUR H and BALIGH H. Sparse code multiple access[C]. IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, London, 2013: 332-336.
- [7] 康绍莉, 戴晓明, 任斌. 面向 5G 的 PDMA 图样分割多址接入技术[J]. 电信网技术, 2015(5): 43-47. KANG Shaoli, DAI Xiaoming, and REN Bin. Pattern division multiple access for 5G[J]. *Telecommunications*

Network Technology, 2015(5): 43-47.

- [8] WANG Bichai, WANG Kun, LU Zhaohua, et al. Comparison study of non-orthogonal multiple access schemes for 5G[C]. IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, Belgium, 2015: 1-5.
 - [9] 袁志锋, 曹伟, 黄伟芳, 等. MUSA: 面向 5G IoT 的免调度高过载接入方案[J]. 电信网技术, 2016(11): 37-42. YUAN Zhifeng, CAO Wei, HUANG Weifang, et al. MUSA: A grant-free high overloading multiple access scheme for 5G IoT[J]. *Telecommunications Network Technology*, 2016(11): 37-42.
 - [10] 罗冬梅, 何世彪, 谷诚. 一种新的混沌扩频序列优选算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(24): 99-101. LUO Dongmei, HE Shibiao, and GU Cheng. New optimized selection algorithm of chaotic spread-spectrum sequences[J]. *Computer Engineering*, 2010, 36(24): 99-101.
 - [11] 凌聪, 孙松庚. 混沌扩频序列产生器[J]. 电子与信息学报, 1998, 20(2): 235-240. LING Cong and SUN Songgeng. A chaotic spreading sequences generator[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 1998, 20(2): 235-240.
 - [12] GU Junrong, HWANG J H, HAN Ning, et al. Analysis of an interleaved chaotic spread spectrum sequence[C]. International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing, Dalian, China 2008: 1-6.
 - [13] SARWATE D. Quadrature sequences for spread-spectrum multiple-access communication[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1984, 30(3): 520-529.
 - [14] BOZTA S, HAMMONS R, and KUMAR P Y. 4-phase sequences with near-optimum correlation properties[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1992, 38(3): 1101-1113.
 - [15] 吴昊, 张建秋, 宋汉斌. 一种基于格理论构造高维星座图的方法[J]. 电子学报, 2014, 42(9): 1672-1679. WU Hao, ZHANG Jianqiu, and SONG Hanbin. A lattice based approach to the construction of multi-dimensional signal constellations[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(9): 1672-1679.
- 邵凯: 男, 1977年生, 副教授, 研究方向为新型多载波调制技术、新型多址接入技术。
 赵小丽: 女, 1992年生, 硕士生, 研究方向为新型多载波调制技术。
 王光宇: 男, 1964年生, 教授, 研究方向为高速多载波通信理论。
 武汉: 男, 1991年生, 硕士生, 研究方向为新型多址接入技术。