

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209042

基于 SCMA 的水声隐蔽通信方案研究*

刘卓 王黎明 韩星程 罗秀丽 韩凯越

(中北大学信息探测与处理山西省重点实验室 太原 030051)

摘要: 针对传统隐蔽水声通信误码率高、频谱利用率低等问题,提出一种基于稀疏多址接入技术(SCMA)的水声隐蔽通信方案。该方案在发射端利用艾森斯坦整数和 Logistic 混沌序列生成新的 SCMA 码字,再通过映射矩阵生成码本。在接收端,通过多用户检测算法和译码,恢复出原始信息。最后,通过实验仿真验证了该方案的可行性,分析了不同用户数量对水声通信性能的影响。同时将稀疏多址通信方案与扩频通信方案进行对比,仿真结果表明,前者误码率更低,性能更优。

关键词: 隐蔽通信;稀疏多址接入技术;混沌映射;码本

中图分类号: TN918 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Research on underwater acoustic covert communication scheme
based on SCMA

Liu Zhuo Wang Liming Han Xingcheng Luo Xiuli Han Kaiyue

(Shanxi Key Laboratory of Signal Capturing and Processing, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A novel underwater acoustic covert communication scheme based on sparse multiple access (SCMA) is proposed to solve the problems of high bit error rate (BER) and low spectrum utilization in traditional covert underwater acoustic communication. The scheme generates new SCMA codewords at the transmitter using Eisenstein integer and Logistic chaotic sequences, and then a codebook via a mapping matrix. At the receiving end, the original information is recovered by multi-user detection algorithm and decoding. Finally, the feasibility of the scheme is verified by experimental simulation, and the influence of different number of users on the performance of underwater acoustic communication is analyzed. At the same time, the sparse multiple access communication scheme is compared with the spread spectrum communication scheme, the simulation results show that the former has lower bit error rate and better performance.

Keywords: covert communication; sparse multiple access technology; chaotic map; codebook

0 引言

海洋面积约占地球面积的 70.8%,其中包括大量的海洋矿物资源和海洋生物资源,对国家经济的增长和社会的发展具有重要意义。水声通信作为海洋技术中的一项重要技术,对国家安全、深海探测起到了关键作用^[1]。然而由于水声信道的可用带宽往往很窄,信号的能量在水声信道中会随着通信距离的增加而减小,因此,如何在有限的信道带宽内优化通信性能,是水声通信领域的一个重要研究方向^[2]。另外,水声通信的隐蔽性也极为重要,尤其在军事安全领域,发送的信息如果被敌人截获,可能会对人民的人身和财产安全造成巨大的威胁,为此各国纷纷投入对水声隐

蔽通信的研究。

徐志江等^[3]提出了一种基于随机噪声调制的新型隐蔽通信系统,将联合正态分布噪声叠加到传统数字通信系统调制器的输出,实现了信息的隐蔽传输。罗志勇等^[4]提出一种用于隐蔽通信的低检测概率波形设计,发送方通过使用正交小波函数来对预调制星座符号进行信号变换,产生白噪声特征的 I 路和 Q 路信号,随后利用扩频、跳频和跳时方式对信号进行处理,可以实现理论上的最佳隐蔽性能。Huang 等^[5]根据混沌信号和舰船辐射噪声的时频特性,生成含有秘密信息的模拟舰船辐射噪声,实现了水声通信的隐蔽传输。但是以上隐蔽通信方案普遍存在着频谱利用率低、误码率高等问题。

收稿日期:2022-02-20

* 基金项目:山西省青年科技研究基金(201901D211250)、山西省高等学校科技创新项目(2020L0301)、中北大学校基金(XJJ201927)项目资助

在提高频谱利用率、突破系统容量、降低误码率方面^[6],非正交多址(NOMA)技术作为一种很有前途的解决方案,吸引了世界各地的学者对其进行研究。目前,NOMA 技术主要分为功率域 NOMA (power dimension NOMA, PD-NOMA)、稀疏码 NOMA (sparse code NOMA, SCMA)等多种研究分支。稀疏码多址接入技术本质上来讲是一种扩频技术,但与传统的码分多址接入技术不同,该技术是将信号扩到多个资源块上,并且是一种码域非正交多址技术^[7]。它实现了在有限资源上复用多个用户的设想,提高了频谱利用率,在业界和学术界得到了越来越多的关注。梁渊博等^[8]提出了基于非正交复用的可见光通信系统,资源利用率和可靠性得到有效提升。侯天为^[9]针对无人机基站能量受限的问题,将非正交多址接入技术与无人机通信结合,提升了无人机通信系统的频谱效率和能量效率。

本文将非正交多址接入技术与水声混沌通信技术相结合,利用混沌映射的类噪声性,使发送的数据信息进行有效隐藏,保证了水声通信的安全性,同时利用非正交多址接入技术提高了水声通信的频谱利用率和可靠性。最后,通过实验仿真验证了该方案的可行性。在某种意义上,本文所提出的通信方案对水声隐蔽通信的发展具有重要意义。

1 基于混沌序列的隐蔽水声通信分析

自 20 世纪 60 年代 Lorenz 发现混沌现象以来,混沌系统及混沌现象的识别、建立以及利用一直都是学术界关注的焦点^[10]。时间离散的混沌系统实现的是状态空间的映射,通常称之为混沌映射^[11]。混沌映射可以提供具有良好伪随机性、遍历性、有界性和复杂性的对初始值高度敏感的伪随机序列^[12],因此被广泛应用于隐蔽通信中。

1.1 Logistic 混沌序列

隐蔽通信中的加扰序列选用的是 Logistic 混沌序列。它是混沌系统中的一个经典模型,被广泛应用于混沌保密通信的各个领域^[13]。虽然它的迭代方程看上去简单,但它表现出了复杂的混沌行为。其非线性方程可由式(1)表示:

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

式中: μ 为分形参数,Logistic 映射的混沌状态随着 μ 值的不同而改变,表现出明显的周期性。当分形参数 $\mu \in (3.57, 4]$ 时,系统处于混沌状态。当 $\mu = 4$ 时, x_n 的值均匀分布在区间 $[0, 1]$ 内,此时 Logistic 系统称为满混沌映射。

1) Lyapunov 指数

Lyapunov 指数是衡量系统动力学特性和判断系统是否存在混沌运动的重要依据,它可以表征系统在相空间中相邻轨道间发散或收敛的平均指数率^[14]。图 1 为 Logistic 混沌映射的 Lyapunov 指数仿真图,由图 1 可知,当 $3.569\ 945\ 6 \dots < \mu \leq 4$ 时, Lyapunov 指数 > 0 , Logistic 系统中存在混沌运动。并且,当分形参数 μ 越接近 4 时,混沌特性表现得越明显。

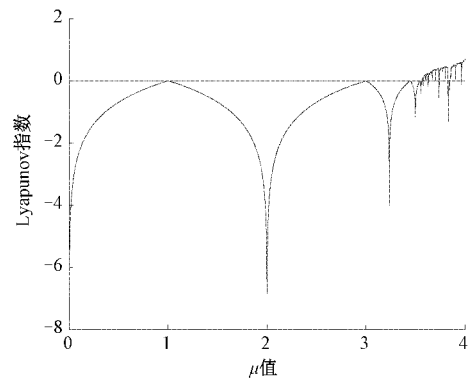


图 1 Lyapunov 指数图

由此可知,即使系统是由混沌方程所确定,但也有可能因为参数设置不当,导致其混沌程度较低。通过仿真可知,当 $\mu = 4$ 时, Logistic 映射的混沌程度最高,所以本文选择 $\mu = 4$ 时的混沌序列作为 SCMA 的加扰序列。

2) 初值敏感性

初值敏感性是混沌映射最重要的特点之一,是其成为隐蔽通信和保密通信中的重要技术的关键^[15]。图 2 为初值不同的两个混沌映射的运动轨迹,初值分别设置为 0.996 265 1 和 0.996 265 2,两者相差 0.000 000 1。从图 2 中可以观察到,虽然两个混沌序列的初始值相差较小,但其运动轨迹也有着较大的差别。

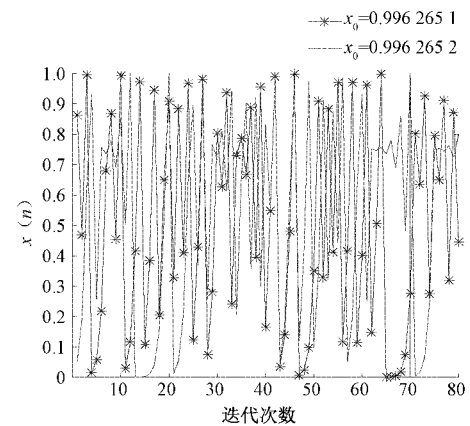


图 2 运动轨迹图

1.2 SCMA 技术原理

SCMA 是一种基于稀疏码本的新型非正交多址接入技术,其核心是将多维调制和矩阵扩频相结合,在时间和频率相同的条件下,实现多用户传输。在 SCMA 发送端,用户信息经过 SCMA 编码器后,再叠加进入信道。SCMA 编码器的作用是将 \log_2^M 比特映射为 K 维调制符号组成的码字,定义如下:

$$f := \mathbf{V}g, x = f(b) = \mathbf{v}g(b) \quad (2)$$

式中: \mathbf{V} 为映射矩阵, x 代表码本, \mathbf{V} 由因子矩阵 \mathbf{F} 决定。假设系统用户数为 6,资源块为 4,那么因子矩阵可由式(3)表示:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由因子矩阵可以看出,在 SCMA 系统中,用户数据只占用了其中的两个时频资源块进行信息传输,实现了低密度扩频。并且,每个资源块上同时有 3 个用户传输有效数据,相对提高了频谱利用率。

在 SCMA 接收端,通过寻找最大联合后验概率分布函数来进行多用户检测,最后经过译码得到用户信息。

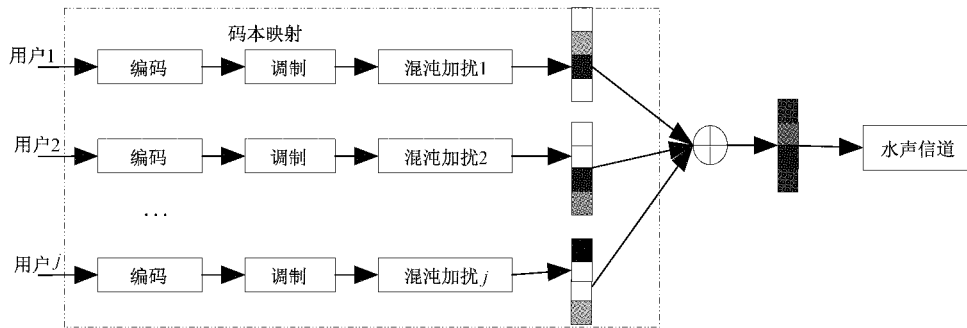


图 3 发送端模型

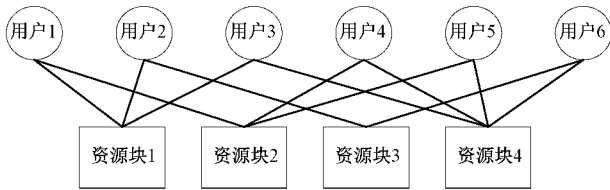


图 4 用户与资源块对应关系

接收机收到的叠加信号为:

$$Y = \sum_{j=1}^J h_j x'_j + n \quad (4)$$

其中, h_j 为第 j 个用户的信道响应; n 为水声信道噪声。接收机信号经过信道均衡后,利用多用户检测算法,从叠加信号中检测出期望用户 j 的信号,之后再经过解扰、译码,输出最终的有用信息。图 5 为 SCMA 系统的接收端模型。

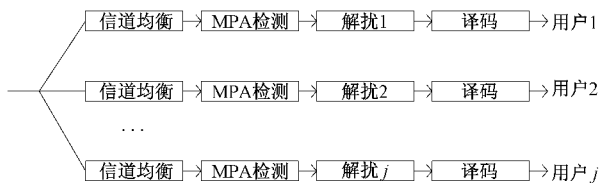


图 5 接收端模型

2.2 SCMA 码本的设计

码本的设计对 SCMA 系统性能十分重要,本文的码本设计基于文献[16]的艾森斯坦整数星座设计方法。将星座图利用艾森斯坦整数生成各码本的星座图集合,其母星座结构如下:

2 基于 SCMA 的水声隐蔽通信方案研究

2.1 系统方案

本文假设系统用户数量为 6,时频资源块为 4,SCMA 系统发送端的模型如图 3 所示。用户的比特信息 $c_j = [c_j^1, c_j^2, \dots, c_j^4]$ 经过编码后,直接被映射为多维稀疏码字,这些码字来自于预先编排的 SCMA 码本,每一个用户被看做一层,每层对应一个 SCMA 码本。基于 SCMA 技术,不同的用户信息被映射到相应的资源块上,其对应关系如图 4 所示,最后发射机将所有用户的数据叠加进行传输。

$$Q_G = \begin{pmatrix} \partial_{G/2}, \dots, \partial_{G/4+1}, \partial_{G/4}, \dots, 1, -1, \dots, -\partial_{G/4}, -\partial_{G/4-1}, \dots, -\partial_{G/2} \\ -1, \dots, -\partial_{G/4}, \partial_{G/4+1}, \dots, \partial_{G/2}, -\partial_{G/2}, \dots, -\partial_{G/4}, -1, \partial_{G/4}, \dots, 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

将式(5)简化得到式(6):

$$Q_G = \begin{pmatrix} \partial & 1 & -1 & -\partial \\ -1 & \partial & -\partial & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

本文以时频资源块为 4,用户数量为 6 的经典系统结构为例。假设一个用户每次传输 $b=2$ bit 的信息,则由公式 $B=2^b$ 可知,一个用户需占用 4 个星座点数。现已知一个资源块上的用户数量为 3,则一个时频资源块上需占用 12 个星座点数。本文利用艾森斯坦整数构成 12 点母星座图,将其分割成 3 个子星座图 S_1 、 S_2 和 S_3 ,如图 6 所示。

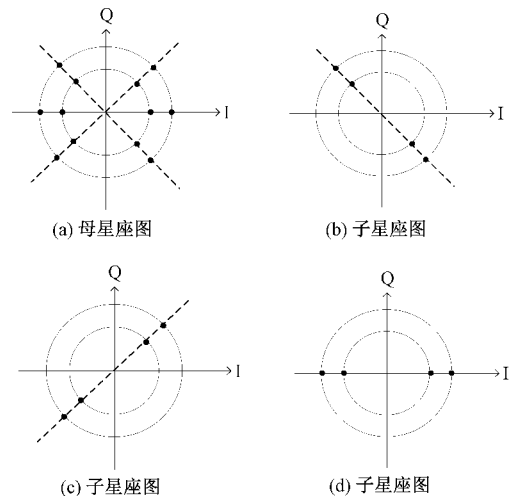


图 6 星座图

由图 6 可得到如下码字:

$$A_1(-0.5-1.732j, 1.5+2.598j, 0.5+1.732j, -1, 5-2.598j)$$

$$A_2(-3, 1, 3, -1)$$

$$A_3(0.5-1.732j, -1.5+2.598j, -0.5+1.732j, 1.5-2.598j) \quad (7)$$

将码字 A_1 、 A_3 向右循环移动一位, 得到新的码字 A_1^* 和 A_3^* :

$$A_1^*(-1.5-2.598j, -0.5-1.732j, 1.5+2.598j, 0.5+1.732j)$$

$$A_3^*(1.5-2.598j, 0.5-1.732j, -1.5+2.598j, -0.5+1.732j) \quad (8)$$

将以上码字与混沌序列进行点乘形成新的码字, 其中选用初始值为 $0.01:0.01:0.05$ 的混沌序列组作为扰码序列, 将组数设置为 $1\sim 5$, 每个码字随机选择不同初始值的混沌序列。例如, A_1 选择 1 组混沌序列; A_3 选择 4 组混沌序列。由于混沌序列具有初始值敏感性, 所以各组加扰序列互不相关。

用户和上述码字的对应关系存在许多种情况, 本文随机选择一种对应关系, 如表 1 所示。最后, 通过映射矩阵, 形成了本文方案的码本。

表 1 用户与码字对应关系

资源块	用户 1	用户 2	用户 3	用户 4	用户 5	用户 6
资源块 1	0	A_3	A_1	0	A_2	0
资源块 2	A_1	0	A_3^*	0	0	A_2
资源块 3	0	A_2	0	A_1	0	A_3
资源块 4	A_2	0	0	A_1^*	A_3	0

3 仿真实验与分析

本节通过实验仿真验证了 SCMA 隐蔽通信方案的可行性。在仿真中采用 MPA 算法进行译码, 具体仿真参数设置如表 2 所示。

表 2 参数设置

参数	SCMA
码长	192
编码	LDPC
编码速率	1/2
迭代次数	6
用户数	4、8
过载率	$\lambda = 100\%$ $\lambda = 200\%$
信道	水声信道
模式设置	1 发 2 收

假设 SCMA 系统在 4 个资源块上传输信息, 将用户数量为 4 和用户数量为 8 时误码率的变化情况进行比较, 得

到仿真结果, 如图 7 所示。由图 7 可知, 当用户数量一定时, 信噪比越大, 误码率越小。当用户数量减小时, 误码率也随之减小。

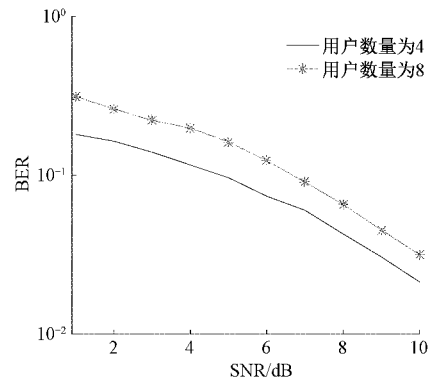


图 7 不同用户数条件下误码率对比

图 8 展示了时不变 15 条径信道与单径信道下, SCMA 隐蔽通信误码率的变化情况。从图 8 中可以观察到, 虽然多径信道下的误码率与单径信道相比较, 但是 SCMA 隐蔽通信方案传输的比特信息在多径信道下并没有完全失真, 具有一定的抗干扰能力。

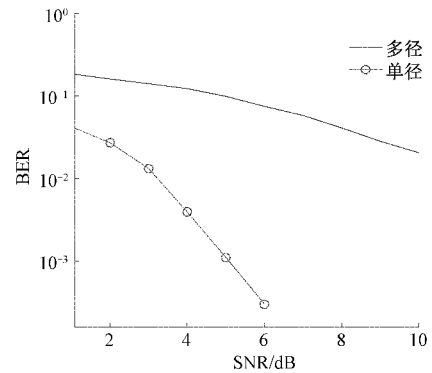


图 8 多径与单径信道条件下误码率对比

图 9 为扩频隐蔽通信和 SCMA 隐蔽通信在时不变多径信道下的性能比较。虽然多径信道对本文通信方案的性能有影响, 但图 9 可证明该方案在多径信道下的抗干扰

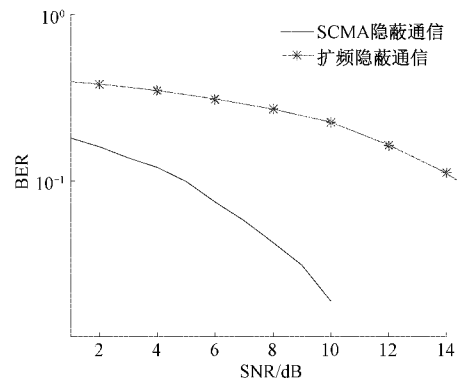


图 9 扩频隐蔽通信和 SCMA 隐蔽通信误码率对比

能力远强于传统扩频隐蔽通信的抗干扰能力,通信性能相对更佳。

4 结 论

针对水声隐蔽通信中存在的问题,提出了基于稀疏多址接入技术的水声隐蔽通信方案。该方案的难点在于通过优化 SCMA 码本,实现符号信息的有效隐藏。文中根据稀疏多址接入技术建立系统模型,利用艾森斯坦整数星座方法和混沌序列设计出新的码本,增强了水声通信的隐蔽性。最后通过实验仿真,验证了 SCMA 隐蔽通信相对于普通扩频通信性能更好,但仍存在信道多径影响的问题。所以下一步的研究工作考虑如何进一步消除水声信道的多径效应,降低通信误码率。

参考文献

- [1] 郭子源,温晓光.直接序列扩频技术在水声通信中的应用[J].舰船科学技术,2020,42(18):139-141.
- [2] 尤凌,管张均.一种低复杂度的水声 OFDM 通信系统子载波分配算法[J].计算机科学,2021,48(S1):387-391.
- [3] 徐志江,季宪瑞,陈芳妮,等.基于随机噪声调制的新型隐蔽通信系统[J].传感技术学报,2019,32(4):586-590.
- [4] 罗志勇,谢映海.一种用于隐蔽通信的低检测概率波形设计[J].信息通信,2018(8):63-64.
- [5] HUANG S, HOU X, LIU W, et al. Mimicking ship-radiated noise with chaos signal for covert underwater acoustic communication[J]. IEEE ACCESS, 2020, 8: 180341-180351.
- [6] 石乐义,兰茹,段鹏飞,等.基于 SCMA 的端信息扩展多用户安全通信系统研究[J].计算机研究与发展,2021,58(11):2444-2455.
- [7] 蒋怡婷.卫星通信系统的稀疏码多址接入技术研究[D].成都:电子科技大学,2020.
- [8] 梁渊博,张峰,赵黎.基于非正交复用的可见光通信系

统[J].探测与控制学报,2021,43(4):86-91.

- [9] 侯天为.基于非正交多址接入的无人机通信系统性能的研究[D].北京:北京交通大学,2021.
- [10] 韩建群.同量分数阶永磁同步电机的混沌运动相电流信号频谱特点仿真研究[J].国外电子测量术,2020,39(4):1-5.
- [11] 郭亚静,王黎明,王琳,等.一种基于 Logistic 映射的水声混沌信号测距方法[J].科学技术与工程,2017,17(5):10-14.
- [12] 胡海,王杰,关鹏,等.基于超混沌理论的网络视频加密应用[J].电子测量技术,2020,43(9):109-113.
- [13] 郭媛,敬世伟,周艳艳,等.一种 Logistic-Fibonacci 级联的混沌映射及其性能分析[J].实验室研究与探索,2020,39(1):4-7,17.
- [14] 万求真,陈思邈,黎婷,等.具有恒 Lyapunov 指数谱的新鲁棒混沌系统及电路实验[J].湖南师范大学自然科学学报,2020,43(5):75-82.
- [15] 桂韵.基于混沌扩频的变换域水声通信[D].厦门:厦门大学,2019.
- [16] 曾慧,李旭东.一种基于艾森斯坦整数的 SCMA 码本的优化[J].现代计算机,2021,27(26):15-20,26.

作者简介

刘卓,硕士,主要研究方向为水声通信、混沌通信。

E-mail:1171948438@qq.com

王黎明(通信作者),博士,教授,主要研究方向为多维信号处理与重建、X 射线图像处理、无损检测技术、无线通信、水声通信。

E-mail:1554116759@qq.com

韩星程,博士,讲师,主要研究方向为水声通信、混沌通信。

罗秀丽,博士,讲师,主要研究方向为水声通信、混沌通信。

韩凯越,本科,主要研究方向为水声通信、混沌通信、信号处理。