

水声通信中的混沌跳频技术研究

赵宝珍, 申晓红, 王海燕, 张 奎

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘要: 为了提高水声通信的保密性能, 提出了一种简洁的混沌跳频图案实现方法。研究了量化 logistic 混沌序列产生的跳频图案性能, 给出了平衡性、相关性、跳频间隔的仿真结果, 验证了近距离水声通信中采用混沌跳频技术的可行性。

关键词: 水声通信; 混沌; 跳频图案

中图分类号: TB567 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3630(2005)-03-0137-03

Chaotic frequency hopping in underwater communication

ZHAO Bao-zhen, SHEN Xiao-hong, WANG Hai-yan, ZHANG Kui

(College of Marine Engineering, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to enhance security of underwater communication, a method to realize the pattern of frequency hopping is proposed. Performance of the hopping pattern generated by quantized logistic chaotic sequence is studied. Feasibility of chaotic hopping technique used in short-range acoustic underwater communication is verified by simulated results in balance property, correlation and hopping gap.

Key words: underwater communication; chaos; frequency hopping pattern

1 引 言

跳频通信作为一种具有保密性能的通信系统, 被广泛用于各种军事无线电通信中。跳频通信系统用伪随机序列来控制发射频率, 伪随机码的选取不仅影响信息的保密, 而且对整个通信系统的性能及实现有很大的关系。一个最佳跳频系统的伪随机码应具有以下特点: 1. 伪随机码要在各个频隙处出现概率基本相等。2. 根据跳频通信同步及多址的要求, 还要求它具有很好的相关性。3. 伪随机码还要有一定的跳频间隔, 加强它的抗干扰性能^[1,2]。

目前水声通信中主要采用 PSK、FSK、MFSK 等技术, 旨在降低误码率、提高数据传输速率与抗干扰性能。跳频通信作为一种有效抑制水中多途影响的通信技术, 有关报道较少, 美国 LinkQuest 公司也使用宽

带扩频技术、混合调制方法, 加上信道均衡、差错控制技术, 形成系列化的高速率水声 Modem, 通信速率一般在 2kb/s 左右。对于近距离水声通信, 在一定数据传输速率的条件下, 采用混沌跳频技术提高系统的保密性能、有效降低多径影响、降低误码率等方面的文献还未见报道。本文旨在进行这方面的研究。

2 混沌跳频方法和跳频图案的特性

混沌现象是非线性动力系统中一种确定性的、类似随机的过程, 混沌信号具有非周期、连续宽带频谱、类似噪声的特性, 特别适合于保密通信。

针对近距离水声通信, 这里只研究一维的混沌映射, 其可以表示为

$$T: x_{n+1} = f(x_n) \quad (1)$$

其中 $x_n \in I$, $n=0, 1, 2, \dots$, $f: I \rightarrow I$ 为非线性映射。混沌系统通常具有: 有界性、遍历性、内随机性、可统计等性质, 同一混沌系统在给定不同的初始条件下, 能够产生大量的不相关的、类似噪声的信号^[3]。本文研

究的 logistic 映射是一类一维的混沌映射。

对于 logistic 映射其表达式为：

$$x_{n+1}=ux_n(1-x_n) \tag{2}$$

当迭代初值 $0<x_0<1$ ，参数 $3.569946<u\leq 4$ 时，系统进入到混沌状态。用 logistic 映射产生混沌序列时，本文式(2)中取参数 $u=4$ 。

由于水声信道的有限带宽，以及通信设备的性能限制，我们在通信带宽内选取了 $q=32$ 个频率，进行跳频研究。由于 logistic 序列是非均匀分布序列，需对由式(2)产生的序列进行量化，采用 cos 映射经 $N-1$ 步迭代可以产生长度为 N 的跳频图案。

由式(2)所产生的序列的密度 ρ 为

$$\rho=1/\pi\sqrt{x(1-x)} \quad x\in[0,1] \tag{3}$$

它的 Lyapunov 指数为 1，取 cos 映射产生的量化分区为

$$E=\left\{E_j=\left(\sin^2\left(\frac{j\pi}{2q}\right),\sin^2\left(\frac{(j+1)\pi}{2q}\right)\right)\right\} \tag{4}$$

$j=0,1,\cdots,q-1$

由此可以得到具有均匀分布特性的量化混沌序列（混沌跳频图案）。其平衡性、相关性与跳频间隔如下。

混沌跳频序列的平衡性参数 δ 为：

$$\delta=\frac{q}{N}\sqrt{\frac{1}{q}\sum_{i=0}^{q-1}(c_i-\frac{N}{q})^2} \tag{5}$$

式中 q 为频隙个数， N 为序列长度， c_i 为第 i 个频率出现的次数。 δ 越趋近于 0，说明平衡特性越好，即在每个频率处出现次数相等。

混沌跳频图案相关性用汉明相关 $H_{XY}(\tau)$ 表示，为 $H_{XY}(\tau)=|\{n|0\leq n\leq N-1,X_{n+\tau}=Y_n\}|,0\leq \tau\leq N-1 \tag{6}$

当两个长度均为 N 的混沌序列 X,Y 延时 τ 时，两序列在一个周期 N 内的重合次数 $H_{XY}(\tau)$ ，亦称为击中次数。

混沌跳频图案的跳频间隔是指任意相邻的两个跳频码之间的间隔，即 $d=|X_{n+1}-X_n|$ 。相应一个混沌跳频图案的平均跳频间隔定义为

$$D=\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N-1}|X_{n+1}-X_n| \tag{7}$$

3 仿真与验证

由于水声信道特性是非常复杂的，基于混沌序列的水声通信是难于实现的。但在近距离低功耗的水声通信中，对于一定的数据传输率，采用混沌跳频技术可以提高水声通信的保密性能，降低误码率以及抗多

径影响。这就要求由式(2)产生的 logistic 混沌序列具有空间无线电通信中伪随机序列的特点。

3.1 混沌跳频图案的平衡性

应用式(2)产生 $N=32768$ 的混沌序列，给定 $q=32$ ，由式(4)获取量化的混沌序列，统计其分布结果示于图 1。对不同长度的序列统计其平衡性参数 δ 示于表 1。

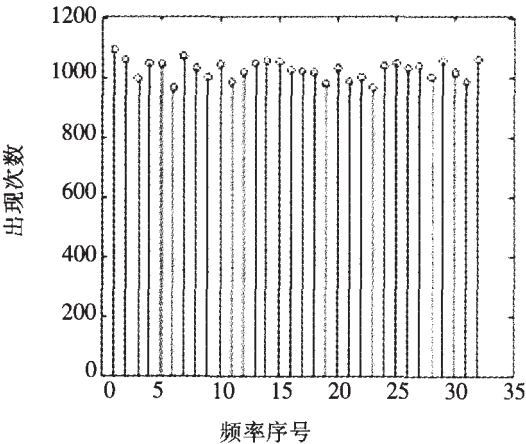


图 1 $N=32768$ 混沌序列的统计结果
Fig.1 Statistic results of chaotic sequence,when $N=32768$

表 1 平衡性参数统计结果
Table 1 Statistic results of balance property parameter

序列长度	2048	4096	8192	16384	32768	65536
δ	0.1275	0.0955	0.0653	0.0434	0.0275	0.0184

从以上结果可以看出，在 32 个跳频的频率上出现的次数是近似平衡的，即出现的概率是近似相等的。当序列长度增加时 δ 值减小，并趋近于 0，即序列在各个频隙上出现次数趋于相等。显然这样的结果使得在水声通信频带内跳频信号的频谱是均匀的，非常有利于提高系统的抗干扰性及保密性。

3.2 混沌跳频图案相关性

相关性关系到跳频图案的多址以及同步性能，简单的来说，自相关性的好坏关系到同步实现的难易，互相关性的好坏关系到多址性能的优劣。

由于混沌对初值的敏感，假设 X,Y 是两个长度都为 $N=32768$ 的不同初值的混沌序列，它们是相互独立的。量化后的混沌序列 X,Y 均服从贝努力分布（二项分布）。当序列长度 N 远远大于量化个数 q 时，它则是渐进的高斯函数，从而有：

$$P(H_{XY}(\tau)=l)=(\frac{N}{l})\left(\frac{1}{q}\right)^l\left(1-\frac{1}{q}\right)^{N-l}\approx \frac{1}{\sqrt{2\pi N(1-\frac{1}{q})/q}}\exp\left\{-\frac{(l-\frac{N}{q})^2}{(2N(1-\frac{1}{q})/q)}\right\} \tag{8}$$

它的均值为 $\overline{H_{xy}} = N/q$, 方差为 $O(\sqrt{N(1-\frac{1}{q})/q})$ 。

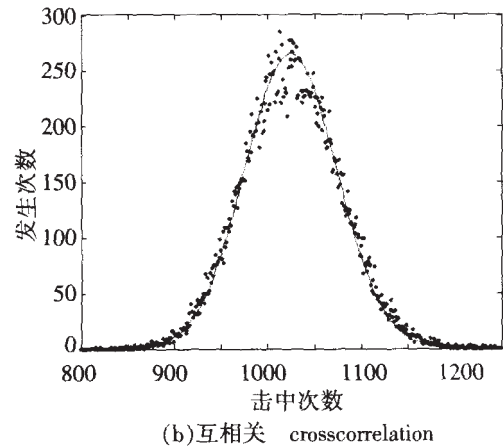
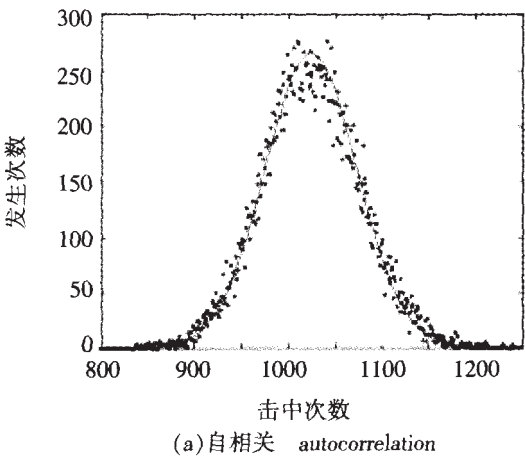


图 2 混沌序列的相关性
Fig.2 Correlation of chaotic sequence

图 2(a)给出了量化后混沌序列的汉明自相关曲线(点分布)和式(8)的高斯分布曲线(实线),图 2(b)给出了两量化后混沌序列的汉明互相关曲线(点分布)和式(8)表示的曲线(实线)。图 2 表明本文设计的水声通信中的混沌序列的相关性较好,且近似于高斯分布,整体上满足跳频图案的性能要求,易于实现跳频多址与同步。

3.3 跳频间隔

选取 logistic 映射初值从 0.101 到 0.201, 对不同初值产生的序列的平均跳频间隔统计结果如表 2 所示。

表 2 跳频间隔统计结果
Table 2 Statistic results of hopping gap

初值	0.111	0.121	0.131	0.141	0.151	0.161	0.171	0.181	0.191	0.201
间隔	10.65	10.66	10.64	10.64	10.60	10.73	10.59	10.58	10.59	10.65

由此产生的混沌序列平均跳频间隔接近理论值 $q/3^{[4,5]}$ 。根据实际需要可选取适当的 q 值,使之满足

宽间隔跳频,宽间隔跳频图案更加有利于抗水声通信中严重的多径干扰,同时也有利于系统同步的实现,降低误码率。

4 跳频图案的实现

由于混沌迭代本身的特点使它在实现时对器件精度要求很高。可以先使用计算机产生混沌序列并进行量化,而后置于存储器中。根据水声通信的信息量,图 3 给出了利用单片机加载 DDS 的混沌跳频实现框图,产生的混沌跳频信号是可靠的。

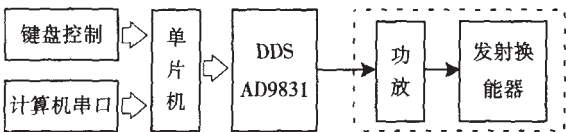


图 3 混沌跳频的实现框图
Fig.3 Implementation diagram of chaotic FH

5 结 论

(1) 采用 logistic 混沌映射产生的跳频图案在近距离水声通信中具有较好的平衡性、相关性以及跳频间隔。可增强通信的抗多径干扰的能力,降低误码率,提高保密性。

(2) 通过大量的仿真实验,验证了不同初值的混沌迭代均可以产生很好的跳频图案,说明混沌跳频图案可以应用在水下跳频保密通信中。

(3) 所设计的混沌跳频图案实现硬件适用于小型的近距离水声通信技术研究。

在水声通信中采用混沌跳频通信,当然要受一些因素的制约。由于混沌迭代运算的有限字长效应,如果器件精度不高很容易造成循环,从而恶化了混沌序列的性能。若水下通信使用跳频技术,采用混沌序列作为跳频图案具有更高的保密性,随着器件性能的提高,在今后的水声保密通信中采用混沌跳频技术将会越来越成熟。

参 考 文 献

[1] 郝士琦,蔡剑铭.混沌跳频序列[J].通信工程学院学报, 1997,11(3):26-31.
HAO Shiqi,CAI Jianming. Chaotic frequency hopping sequences [J]. Journal of Communication Engineering College,1997,11(3):26-31.

据此构建舰船目标特征矢量： $(D_1, \dots, D_5)$ 。

根据以上三类特征的分析,本文构建 30 维的舰船辐射噪声小波变换域特征矢量 $(Z_1, Z_2, \dots, Z_{30})$ 。

4 实验分析

实验应用基于三种核函数下的支持向量机算法对两类舰船目标进行分类识别。其中两类目标的训练样本各为 15 个,测试样本各为 50 个。实验选取的参数都为实验中获取最优结果时的参数,实验结果如下:

表 2 支持向量机对水中目标的实验结果

Table 2 Experimental results of the underwater target classification by using SVM with different kernels

核函数	参数	训练集识别率		测试集识别率	
		I 类	II 类	I 类	II 类
多项式核	$q=2$	100%	100%	90%	82%
径向基核	$\sigma=0.4$	100%	100%	90%	84%
组合核	$q=1 \quad \sigma=0.4$ $d_1=0.007 \quad d_2=0.9$	100%	100%	92%	90%

实验结果显示由单独核函数构成的支持向量机对 I 类舰船目标识别较好,对于 II 类目标径向基核函数支持向量机的识别率要好于多项式核函数构成的支持向量机。组合核函数支持向量机对于 I、II 类目标的识别效果要好于由单独核函数构成的支持向量机。由实验结果可以证明组合核函数可以提高支持向量机对舰船目标的识别效果。

5 结 论

本文通过对两种常用的核函数进行学习和推广

(上接第 139 页)

[2] 梅文华,杨义先.跳频通信地址编码理论[M].北京:国防工业出版社.1996.

MEI Wenhua, YANG Yixian. Theory on address coding of frequency-hopping communication[M]. Beijing:National Defence Industry Press.1996

[3] 陈奉苏.混沌学及其应用[M].中国电力出版社.1998.

CHEN Fengsu. Chaos and Applications [M]. Chinese Electric Power Press. 1998.

能力的分析,提出了一种基于组合核函数的方法来提高支持向量机的分类识别性能,并实际运用于水中目标识别中。由于不同核函数的学习和推广能力各有优劣,通过组合可以使得由组合核函数构成支持向量机兼具良好的学习能力和推广能力。实验结果也显示,基于组合核函数的支持向量机的识别性能要优于使用单独核的情况。未来的研究方向是对于不同数据分布,构造新的核函数以期获得更好的效果。可以相信,支持向量机作为一种新兴的模式识别方法,在水中目标识别问题上必将会有广阔的发展前景。

参 考 文 献

[1] Vapnik V. The nature of statistical learning theory [M]. New York:Springer-Verlag.1995.

[2] Vapnik V. An overview of statistical learning theory [J]. IEEE Transaction on Neural Networks,1999,10(5):998-998.

[3] TAN Ying, WANG Jun. A support vector machine with a hybrid kernel and minimal vapnik-chervonenkis dimension [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2004,14(4):385-395.

[4] 张学工.关于统计学习理论与支持向量机[J].自动化学报,2000,26(1):32-42.

ZHANG Xue gong. Introduction to statistical learning theory and support vector machines [J]. Acta Automatica Sinica,2000,26(1):32-42.

[5] 王海燕.基于信息融合与数据挖掘技术的目标识别分类研究[D].西北工业大学博士论文,2004. 49-52.

WANG Hai yan. Research on recognition and classification of underwater target based on information fusing and data mining[D]. The doctor's dissertation of North-western Polytechnical University,2004. 49-52.

[4] LING Cong, SUN Songgeng. Chaotic frequency hopping sequences [J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(11):1433-1437.

[5] 甘良才,吴燕翔.基于混沌的宽间隔跳频序列[J].通信学报, 1999, 20(4):72-76.

GAN Liangcai,WU Yanxiang. FH sequences with given minimum gap based on chaos [J]. Journal on Communications,1998,46(11):1433-1437.