

低声能辐射下的两种水声跳频通信方法对比研究

潘地宏, 王海燕, 王 皓, 邱火旺

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘要: 水声信道是一个极其复杂的时变-空变-频变信道, 因而进行水声通信, 必须克服时变多途干扰等困难。将抗干扰能力强的跳频通信技术应用于水声通信领域, 对于隐蔽性、保密性要求高的系统来说, 该体制有着卓越的特性。在仿真环境下, 对比研究了 m 序列和基于二维 logistic 映射的混沌序列的相关性、平衡性、功率谱特性、多址性等性能。构建了一种在低声能条件下的水声跳频通信系统, 给出了系统编解码技术的实现方法。发射的帧信号由激活信号、同步信号、时延信号和三组 (15, 11) 汉明码循环 3 次组成, 采用了时间与频率的双分集技术进行纠错解码, 从而增强了系统的保密性。通过外场试验, 验证了利用 m 序列和混沌序列进行水声跳频通信的可行性, 并对试验结果进行了对比研究。由于混沌序列的数量巨大且性能优异, 非常适用于水声组网通信和保密性要求高的水声通信系统。因此, 混沌序列在今后的水声跳频通信领域应有更广阔的应用前景。

关键词: m 序列; 混沌序列; 跳频; 水声通信

中图分类号: TB567

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2007)-04-0728-04

Comparison of two underwater acoustic frequency-hopping communication schemes under low sound energy condition

PAN Di-hong, WANG Hai-yan, WANG Hao, QIU Huo-wang

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

Abstract: Underwater acoustic (UWA) channel is a complex channel that is time-varying, space-varying and frequency-varying. UWA communications suffer from interferences due to multi-path, ambient noise and Doppler shift. Frequency hopping spread-spectrum (FH-SS) provides good performance to UWA communications that require strict security and interference immunity. In a simulation environment, correlation, balance, power spectrum and multi-address of m -sequence and chaotic sequence based on two-dimension mapping have been studied. An UWA communication framework utilizing FH-SS under low sound energy condition is proposed. Implementation of coding and decoding has been presented. The system is composed of activated signal, synchronization signal, time delay signal and three groups of (15, 11) Hamming code. Dual diversity is employed both in time and frequency for decoding and error correction. System security is improved and error rate reduced. Field experiments show that both m -sequence and chaotic sequence are feasible in UWA FH-SS communications. Comparison has also been made. As the number of chaotic sequences is enormous and they perform excellently in terms of correlation, they are suitable to be applied to multi-access communications and UWA communications requiring high security. Therefore chaotic sequences have good prospects in UWA communication.

Key words: m -sequence; chaotic sequence; frequency-hopping; UWA communication

1 引 言

水声信道是一个极其复杂的时变-空变-频变信

道, 其主要特征是多变性、强多途、随机性和有限的通信带宽。因而利用水声信道进行通信, 必须克服环境噪声干扰、时变多途干扰和多普勒频移等诸多困难。

近年来, 跳频通信技术以其抗干扰能力强的特点在空间无线电通信领域中应用十分活跃。在水声通信领域, 对于隐蔽性、抗干扰性要求高, 而数据传

收稿日期: 2006-05-01; 修回日期: 2006-09-03

作者简介: 潘地宏 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水声信号检测。

通信作者: 潘地宏, E-mail: robustpan8345@sina.com; pandihong@sohu.com

输率要求不高的系统来说, 利用 m 序列、混沌序列等伪随机序列进行跳频通信同样有着卓越的特性。文献[1]利用 m 序列进行信道编码设计, 对多途信号进行相干处理, 提高了处理增益。文献[2]在仿真环境下, 研究了利用一维 logistic 映射的混沌序列进行水声通信的可行性, 取得了较好的结果。目前, 关于水声跳频通信的研究多集中在高能、高信噪比的环境下, 在低能、低信噪比的环境下进行水声跳频通信研究的文献并不多见。

基于以上背景, 本文提出了一种应用于低声能、低信噪比下的水声跳频通信的系统方案, 该方案利用 m 序列和基于二维 logistic 映射的混沌序列作为跳频序列, 通过外场试验, 对比性地验证了方案的可行性。

2 m 序列的生成和仿真分析

m 序列易于产生, 具有周期性, 当特征多项式为本原多项式时, 生成的序列是 m 序列。在仿真环境下, 选取线性移位寄存器的级数 $r=12$, 本原多项式 $f(x)=1+x+x^2+x^3+x^8+x^9+x^{12}$, 由此产生出周期为 4 095 的二元 m 序列。

图 1 为 m 序列的仿真性能图。图 1(a) 表明, 二元 m 序列的自相关特性极优, 主瓣与旁瓣最大值的比值超过 45 倍以上。图 1(b) 中互相关(另一 m 序列由 $g(x)=1+x+x^2+x^6+x^8+x^9+x^{10}+x^{12}$ 生成) 峰值低, 对 100 次仿真结果进行统计, 互相关峰值的平均值为 0.062 42。从图 1(c) 可知, m 序列的平衡性极优, 在一个序

列周期中, 选中任意频隙的概率几乎相同。经过计算, 平均跳频频隙间隔为 16.043 1。图 1(d) 反映出功率谱接近白噪声特性, 这有利于 m 序列进行保密通信。由于码源有限, m 序列在多址性上表现差。

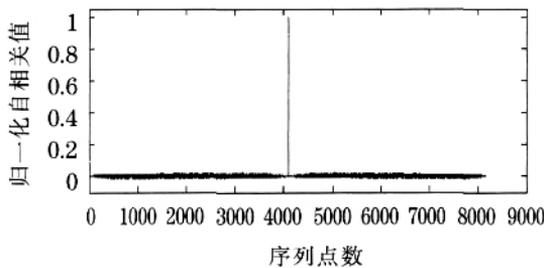
3 混沌序列的产生和仿真分析

混沌是非线性动力学系统所特有的一种运动形式, 其突出特点是对初值和参数选取的高度敏感性和伪随机性, 利用其特点可以产生出数量巨大的伪随机序列码, 并应用于水声跳频通信多址码的产生。本文选用基于二维 logistic 满映射的方法产生混沌序列^[3], 这种方法比文献[2]中的一维 logistic 映射结构简单, 易于对生成值进行量化, 其表达式为:

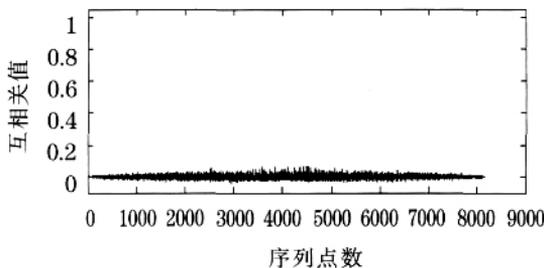
$$x(n+1)=1-2x(n)^2, \quad x \in [-1, 1] \quad (1)$$

经过大量的仿真实验筛选, 选取初值 $x(1)=0.400\ 00$, 序列长度为 4 095, 生成第一组混沌序列。选取另一组初值为 0.400 01, 生成第二组混沌序列, 以进行互相关运算。图 2 给出了混沌序列的性能图。

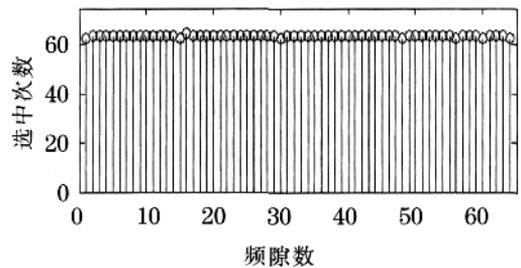
从图 2 可以看出, 混沌序列的自相关特性优, 主瓣与旁瓣最大值的比值超过 20 倍, 较 m 序列差。互相关峰值极低, 对 100 次仿真结果统计的平均值仅为 0.025 91; 平衡性良, 在序列长度为 4 095 的条件下, 选中频隙最多的次数达到 75, 最少的为 49, 理想的平均值应为 63.91。平均跳频频隙间隔为 15.9982。其功率谱特性近似于白噪声特性。由于混沌序列的数目巨大, 因此在多址性和保密性方面表现极优。



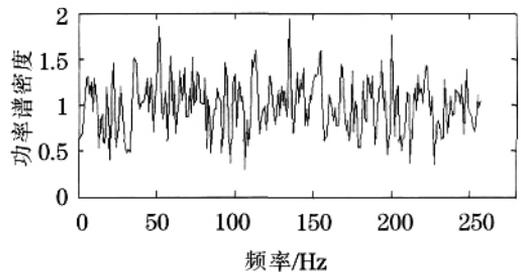
(a) 归一化自相关图



(b) 互相关图



(c) 频隙选中图



(d) 功率谱图

图 1 m 序列性能图

Fig.1 Performance of m sequence

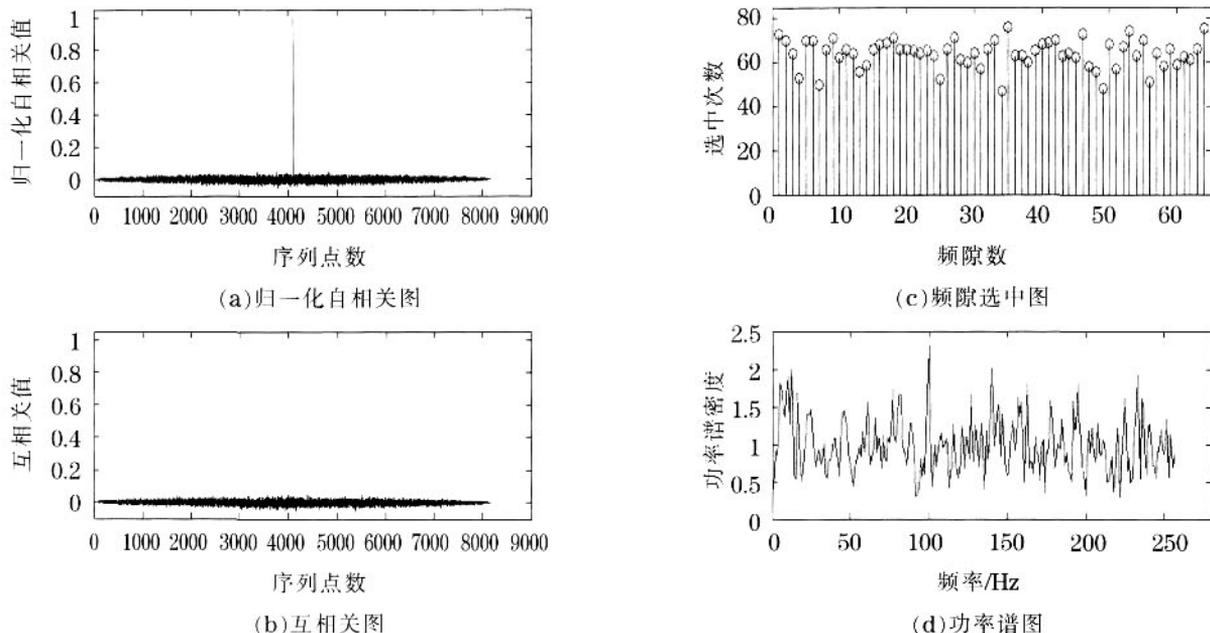


图2 混沌序列性能图
Fig.2 Performance of chaotic sequence

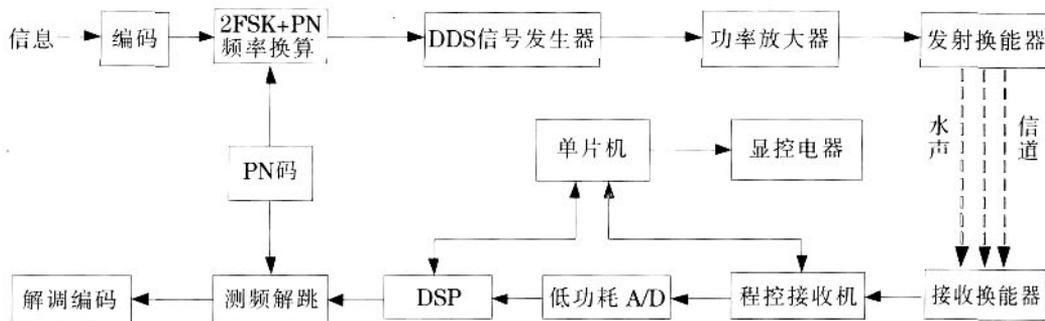


图3 水声跳频通信系统框图
Fig.3 UWA FH-SS communication system

4 水声跳频通信系统架构

跳频的基本原理是信号的载频受伪随机序列的控制,按照跳频图案规律进行不断地变化,相应地进行信道选择。图3给出了本文设计的水声跳频通信系统框图:信息经过编码后,换算成2FSK数字信息,再与由PN码产生的数字信息进行合成,就能得到发射的跳频信号的频率信息,通过DDS信号发生器产生跳频信号,该信号经过功率放大和发射换能器发射,经过信道传输,被程控接收机接收并送后进行数字信号处理,再进行解跳、解调和解码,最终得到发射信息。其中,解跳和解调均采用低信噪比下的 $1\frac{1}{2}$ 维谱分析方法实现,对高斯噪声有很好的抑制作用。

FSK技术被认为是一种稳健的水声通信体制,将其与跳频技术结合,可以更好地克服由于信道多

径引起的码间干扰,为此本文采用了2FSK的调制方式。

本文对常规跳频频隙划分方法进行了局部改进,即将前一个频隙的终点作为下一个频隙的起点,这样通过增加编解码软件设计的开销来换取跳频频隙数目的增加,使得不同的码值也能选中相同的跳频点,从而增强了系统的保密性。

5 跳频编解码技术

一组帧信号由激活信号、同步信号、时延信号和码元编码信号四部分组成,其完整的结构图如图4所示。

单频信号 f_1 的作用是激活程控接收机中的自动增益控制(AGC)模块。同步实现由粗同步和精同步两部分完成,粗同步通过检测信号 f_2 的到达时刻,进而估计出进行精同步的起始时刻。精同步是

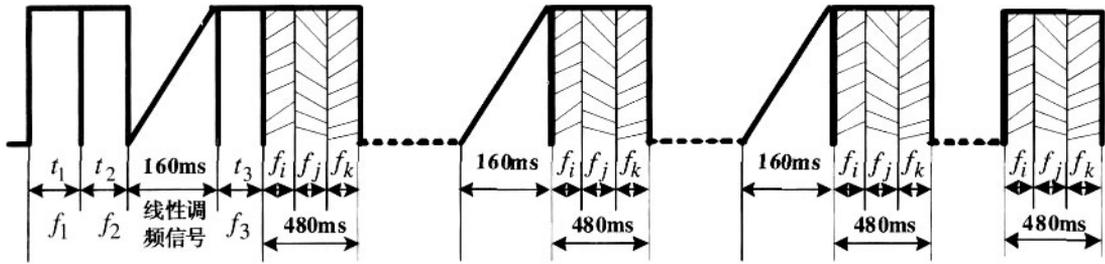


图 4 完整的帧结构图

Fig.4 Complete frame structure

表 1 试验结果

Table 1 Experimental results

SNR /dB	m序列		混沌序列	
	频率错检率	误码率	频率错检率	误码率
0	6/7425=0.08%	0/2475=0	9/7425=0.12%	0/2475=0
- 10	29/7425=0.39%	0/2475=0	41/7425=0.55%	0/2475=0
- 15	68/7425=0.92%	4/2475=0.16%	77/7425=1.04%	5/2475=0.20%
- 20	198/7425=2.67%	11/2475=0.44%	217/7425=2.92%	13/2475=0.53%

由一段线性调频信号作拷贝相关,从而准确计算出码元编码信号到达的起始时刻。 f_3 是一缓冲时延信号。信道编码采用(15, 11)汉明码,这种码制结构简单,易于工程实现,且具有较强的抗干扰能力。码元编码采用快跳频的方式,每个码元中频率跳变3次,这三个频率都代表了同一码元信息。一组完整的帧由 f_1 、 f_2 、 f_3 三组线性调频信号和3组汉明码组成,采用了时间与频率的双分集技术进行纠错解码,从而增强了系统的保密性,降低了系统的误码率。

6 外场试验结果

在仿真实验分析的基础上,进行了外场跳频编码传输与解码试验。水库水域环境:深约35m,长约5km,宽约1km。多途扩展量约在50ms~100ms的量级,限于篇幅,未给出分析曲线。由于水声信道的带宽限制和换能器频率特性的影响,本系统选用10kHz~14kHz作为跳频频带范围。考虑到解跳分辨率的要求和多普勒频移的影响,在本系统中,以 $\Delta f=64\text{Hz}$ 为频隙间隔。通信距离3010m,辐射的声功率为41.7mW,数据传输率为2bit/s。编码分别以m序列和混沌序列作为跳频序列,以m序列跳频图案方式发射 15×5 组,以混沌序列跳频图案方式发射 15×5 组,共计3630位有效信息、4950个码、14850次跳变频率。表1列出了在不同信噪比下,两类伪随机序列控制下的跳频通信对比试验结果。

从表1可以看出,当SNB - 10dB时,利用两类伪随机序列作为跳频序列的水声通信系统的误码率都为0;当SNB - 15dB时,误码已经产生;当

SNB达到-20dB时,误码率值超过千分之四,但系统仍处于可以正常通信的状态。

7 结束语

本文对两类伪随机序列进行了性能对比分析:m序列在自相关性、平衡性上表现极优,在互相关性和频隙间隔上表现优,在多址性方面表现差。混沌序列在互相关性、多址性上表现极优,在自相关性、频隙间隔上表现优,在平衡性上表现良。

从外场试验结果可以看出,在低声能和低信噪比的条件下,将两类伪随机序列应用于的水声跳频通信是完全可行的,m序列的试验结果稍优于混沌序列,经过分析,这与混沌序列的有限字长效应有关。

由于混沌序列的数量巨大且相关性能优异,非常适合应用于水声组网通信和保密性要求高的水声通信系统。因此,随着混沌序列研究的深入,其在今后的水声跳频通信领域应有更广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 艾宇慧, 周瑜丽. m序列扩频谱水声通信研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2001, 21(3): 15-18.
AI Yuhui, ZHOU Yuli. Research on m sequence used in spread-spectrum UWA communication[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2001, 21(3): 15-18.
- [2] 赵宝珍, 申晓红. 水声通信中的混沌跳频技术研究[J]. 声学技术. 2005, 24(3): 137-139
ZHAO Baozhen, SHEN Xiaohong. Chaotic frequency hopping in underwater communication[J]. Technical Acoustics, 2005, 24(3): 137-139.
- [3] LING Cong, SUN Songgeng. Chaotic frequency hopping sequences [J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(11): 1433-1437.