

# M 元混沌扩频多通道 Pattern 时延差编码水声通信<sup>\*</sup>

殷敬伟<sup>†</sup> 惠俊英 王逸林 惠 娟

(哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨 150001)

(2006 年 11 月 27 日收到, 2007 年 2 月 5 日收到修改稿)

Pattern 时延差编码水声通信体制利用信息码元的时延值调制信息, 他的抗多途扩展干扰能力与码型种类及码型脉宽有关. 扩频通信可获得扩频增益, 可胜任远程水声通信, 但其通信速率低是使用受限的重要原因. 提出将扩频通信与 Pattern 时延差编码水声通信体制相结合, 并采用  $M$  元扩频、多通道工作方式, 构成一种新的适用于水声环境的通信方案, 既可获得扩频通信的优良性能, 又可提高通信速率. 湖试结果验证了本文提出的  $M$  元混沌扩频多通道 Pattern 时延差编码水声通信方案的鲁棒性及可行性.

关键词: 水声通信,  $M$  元混沌扩频通信, Pattern 时延差编码体制

PACC: 4330, 0545

## 1. 引 言

无线水声通信具有灵活、方便、经济、不存在电缆缠绕等问题, 是当代海洋资源开发和海洋环境立体监测系统中的重要技术组成部分, 可将水下传感器、实验仪器、AUV/UUV 等获得的数据通过声学途径实时传输到岸上, 亦可将母船的控制命令下传给水下用户, 将具有广阔的应用空间. 因此, 水声通信技术是我国海洋高技术急待研究开发的项目之一.

Pattern 时延差编码通信体制 (PDS)<sup>[1, 2]</sup> 属于脉位编码, 信息调制在码片出现在码元窗的时延差信息中, 具有很好的鲁棒性, 其最大抗多途时延扩展的能力为码元宽度与 Pattern 码个数的乘积. 混沌扩频通信在无线电应用方面备受关注<sup>[3-9]</sup>, 一系列优点将在水声通信中受益. 扩频通信可获得扩频增益, 抗干扰能力强, 可胜任远程水声通信; 由于通信信号的频谱被扩频, 可认为是一种频率分集, 所以多径衰落会大大减小, 扩频码自相关特性优良, 当多径时延超过一个码片宽度时, 则与原码相关性急剧下降而可视

为噪声处理, 因而对多径效应不敏感; 可通过码分复用实现多用户组网通信, 保密性好, 为实现水声通信网络化提供有利条件. 但水声通信可用频带有限<sup>[10]</sup>, 所以扩频序列脉宽通常较大, 这将导致扩频水声通信的通信速率很低, 从而导致扩频通信在水声中的应用受限. 本文提出将 Pattern 时延差编码水声通信体制与扩频通信相结合的一种新的适用于水声环境的通信方案, 具有较好的抗多途扩展特性, 且可明显提高扩频通信速率. 另外, 本文通过采用多进制扩频 ( $M$  元扩频通信,  $M$ -ary) 多通道通信工作方式, 可进一步提高通信速率.

## 2. $M$ 元混沌扩频 Pattern 时延差编码通信原理

### 2.1. Pattern 时延差编码水声通信体制

Pattern 时延差编码水声通信体制属于脉位编码, 信息并非调制在码元波形中, 而是调制在码元出现在码元窗的时延差信息中.

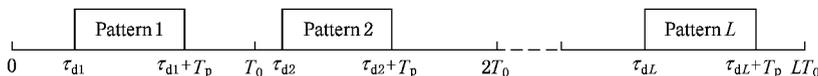


图 1 Pattern 时延差编码体制示意图

<sup>\*</sup> 国家高技术研究发展计划(863)项目(批准号 2006AA09Z105)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: yinjingwei@hrbeu.edu.cn

图 1 给出了一组码元结构,包含  $L$  个相关性优良的 Pattern 码.图中  $\tau_{di}$  为第  $i$  个 Pattern 码对应的时延差值; $T_p$  为 Pattern 码脉宽; $T_0$  为码元宽度;编码时间  $T_c = T_0 - T_p$ . 设每个码元携带  $n$  bit 信息,则将编码时间均匀分为  $2^n$  份,量化间隔  $\Delta\tau = T_c/2^n$ . 时延差  $\tau_{ik} = k\Delta\tau, k = 0, 1, \dots, 2^n - 1$ ,不同的时延差值代表不同的信息.在发射端利用 Pattern 脉冲的时延值进行时延编码;在接收端采用时延估计技术进行时延解码.时延估计的精度越高,编码量化层可以分得越细,每个码元所携带的信息量  $n$  也就可越大,通信速率越高.

为了抑制声信道多途扩展产生的码间干扰,PDS 体制采用多种不同 Pattern 码波形来进行码元分割.利用一组正交的 Pattern 码作为系统的码元.若 Pattern 码有  $L$  个,它们相互正交,这样相邻的同一 Pattern 码型出现时间间隔为  $L \times T_0$ ,此为最大抗多途时延扩展的能力.其优点是所占频带较窄,且能稳健的适应水声多途信道通信.PDS 编码波形可以表示成如下形式:

$$s(t) = \sum_{i=0}^{+\infty} \sum_{j=1}^L p_j [t - (j-1 + Li)T_0 - k_{ij}\Delta\tau],$$

$$k_{ij} = 0, 1, \dots, 2^n - 1, \quad (1)$$

式中  $p_j(t)$  为第  $j$  号 Pattern 波形; $k_{ij}$  为第  $(Li + j + 1)$  号码元的时延差数值.

码型选择取至关重要,直接关系到 PDS 体制抗码间干扰的能力.既要求所选的 Pattern 码型自相关峰尖锐,又要保证 Pattern 码彼此间的互相关性弱,这样才可以保证足够好的抑制码间干扰效果.文献 [2] 通过将 7 个码片移相、移频编码得到了一组 Pattern 码型,但由于所能得到的码型有限且归一化相关系数较大,需进一步改进.由于水声信道可用带宽有限,所以为了选取更多的 Pattern 码型,只能从加大码型脉宽入手.本文借鉴扩频通信的码元选取思想,将扩频通信与 PDS 通信体制相结合,提出一种新的适用于水声环境的通信方案.

## 2.2. 混沌扩频码的产生

在扩频通信中,利用扩频序列对信号实行频谱扩展,获取扩频增益,增强信号的隐蔽性,因此扩频序列的产生是扩频通信系统的重要方面.本文扩频序列选用混沌序列,其具有类随机性和对初始值极其敏感性,这些特性使其在通信中有着广阔应用前景.将其应用于扩频通信,可以获得更好的保密性

能,并可提供更多的具有优良特性的扩频序列.

Logistic 映射<sup>[11]</sup>是从 Logistic 方程演化而来的,差分方程为

$$x_{i+1} = \mu x_i (1 - x_i), \quad (2)$$

式中  $0 < x_i < 1$ ,它实际上是一个迭代过程.随着  $\mu$  的不同,Logistic 映射呈现不同的特性.当取  $\mu = 4$  时,称为改进型 Logistic 映射,工作于混沌状态,且  $x_i$  的分布概率关于  $x = 0.5$  偶对称.改进型 Logistic 映射迭代产生的混沌序列的统计特性与白噪声一致,适用于扩频序列.

给定一个初值  $x_0$ ,则可由(2)式产生实值序列  $\{x_i\}$ ,并由下式得到均值为 0 的混沌序列  $\{a_i\}$ :

$$a_i = x_i - 0.5, \quad (3)$$

式中  $a_i \in [-0.5, 0.5]$ .

给定不同初值,设得到由  $N$  个 chip 构成的混沌序列  $S$  个,记为  $a_1(k), a_2(k), \dots, a_s(k)$ ,则对应得到  $S$  个扩频码型,记为  $c_1(t), c_2(t), \dots, c_s(t)$ .本文直接应用混沌扩频序列对扩频码的 chip 频率进行调制<sup>[12]</sup>,而不需对混沌序列进行量化处理,减小了对混沌序列类随机性的破坏.

下面给出扩频码型  $c_i(t)$  的瞬时频率表达式:

$$f_i(t) = f_0 + B \sum_{j=1}^N a_j(k) \times \{u[t - j\tau] - u[t - (j-1)\tau]\}$$

$$(i = 1, 2, \dots, S). \quad (4)$$

式中混沌序列  $a_i(k)$  的每个 chip 脉宽为  $\tau$ ,则扩频码元宽度为  $N\tau$ ;  $f_0$  为中心频率,  $B$  为系统带宽;  $u(t)$  为单位阶跃函数.

对于第  $i$  个扩频码型  $c_i(t)$  的第  $j$  个 chip,其中心频率为  $f_{i,j} = f_0 + Ba_i(j)$ ,波形可表示为

$$\text{chip}_{i,j}(t) = \cos(2\pi f_{i,j}t + \varphi_{i,j})$$

$$(j = 1, 2, \dots, N), \quad (5)$$

其中  $\varphi_{i,j}$  为该 chip 的初始相位.为保证相位连续性,以减小频谱扩展,应进行相位平滑处理,使初始相位  $\varphi_{i,j}$  满足:

$$\begin{cases} \varphi_{i,j} = 2\pi f_{i,j-1}\tau + \varphi_{i,j-1}, & j = 2, 3, \dots, N; \\ \varphi_{i,1} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

即保持当前 chip 的初始相位与前一 chip 的截止时刻相位相同.  $N$  个 chip 首尾相连构成扩频码型.

图 2 给出了某混沌扩频码元的频谱,图 2(a)为没有经过相位平滑处理时的频谱,图 2(b)为经过相位平滑处理后频谱图.对比两图可以看出,经过相位

平滑处理的混沌扩频码元频谱集中在有效带宽内, 带外频谱扩展小.

### 2.3. $M$ 元扩频 PDS 通信原理

$M$  元扩频通信即多进制扩频通信, 多个信息比

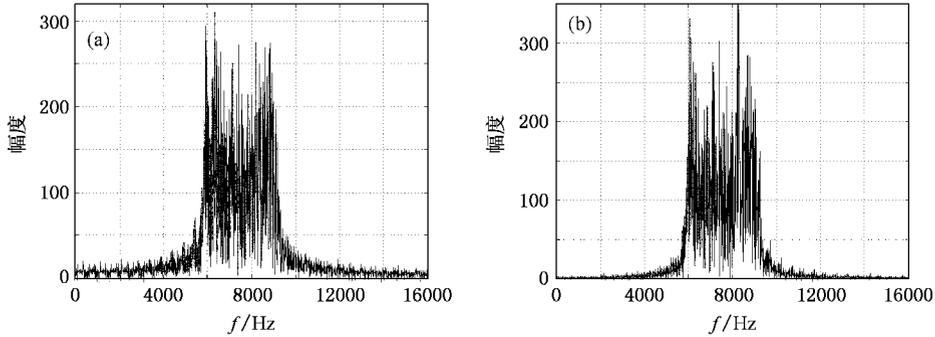


图2 混沌扩频码元频谱图 (a) 没经过相位平滑处理的混沌扩频码元频谱图; (b) 经过相位平滑处理的混沌扩频码元频谱图

数据传输能力是指在某一给定通信方式情况下, 单位时间所能传送的信息数据比特数 (bps), 即信息数据速率  $R_d$ . 不同调制方式的不同调制状态数有不同的信息数据传输能力, 多进制扩频每次发射一个扩频码, 但是在  $M$  个扩频码中选择的, 因此每个扩频码携带信息量为  $\log_2 M$  (bit). 如果信息数据脉宽为  $T_p$ , 则信息数据传输能力  $R_d = \log_2 M / T_p$ .

为进一步提高扩频通信速率, 本文提出将  $M$  元扩频通信与 Pattern 时延差编码水声通信体制相结合. 图3给出了  $M$  元扩频 Pattern 时延差编码通信原理图.

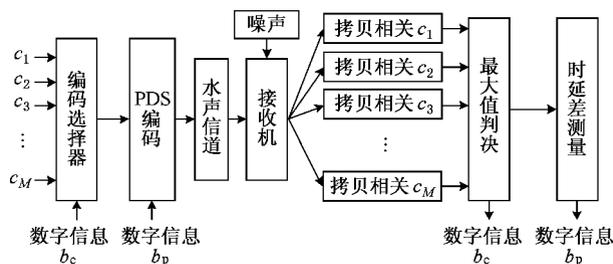


图3  $M$  元扩频 Pattern 时延差编码通信原理图

混沌扩频码  $c_1, c_2, \dots, c_M$  具有优良的自相关和互相关性能, 记为一个扩频码组  $C$ . 发送的信息码通过编码选择器, 依据传送的信息从这  $M$  个扩频码中选择一个作为 Pattern 码型, 这样该扩频码携带上的信息量为  $\log_2 M$  bit, 记为  $b_c$ ; 以该扩频码作为 Pattern 码型进行 PDS 编码, 即完成第二次数字信息编码, 记为  $b_p$ . 接收到的信息码经过  $M$  个拷贝相关器, 通

特用一个扩频码进行传输, 可以在相同的系统带宽下具有较高的扩频增益, 有效解决了传输带宽和处理增益之间的矛盾. 它相对于传统扩频通信提高了传输速率, 适合于带宽有严格限制的水声环境, 具有更强的抗干扰能力.

过检测相关峰最大值判决出码的类型, 译出该码型对应的数字信息  $b_c$ , 并测量此扩频码对应的时延差值, 完成 PDS 译码, 得到数字信息  $b_p$ .

### 3. $M$ 元混沌扩频多通道 PDS 通信系统

为了进一步提高通信速率, 可采用多扩频码组对应于多个通信信道同时工作, 成倍提高通信速率. 多通道通信等价于多址 (MA) 通信, 当多用户通信时, 多址技术可以让更多的用户能够共享给定的有限频谱资源; 当只考虑收、发两个节点间通信时, 即单用户通信, 多址技术可用于成倍提高单用户通信速率. 另外, 多址通信也是实现全双工水声通信工作方式的一种途径.

多通道通信是将所有选取的具有优良的自相关和互相关性能的扩频码分为  $K$  组, 记为  $C_1, C_2, \dots, C_K$ , 每组对应于一组通信信道, 这样可实现  $K$  路通信信道同时工作, 相当于单信道通信速率的  $K$  倍. 图4给出了多进制 ( $M$  元) 多通道扩频 Pattern 时延差编码通信原理图.

图中  $b_{cI}$  ( $I = 1, 2, \dots, K$ ) 表示为第  $I$  路通信信道  $M$  元扩频编码携带的信息,  $b_{pI}$  表示为第  $I$  路通信信道 Pattern 时延差编码所携带的信息. 在接收端, 每个通信信道对应于一组拷贝相关器, 通过检测判决扩频码、测量时延差值, 分别译出数字信息  $b_{cI}, b_{pI}$ .

$M$  元扩频、 $K$  通道通信共使用  $KM$  个扩频码, 接

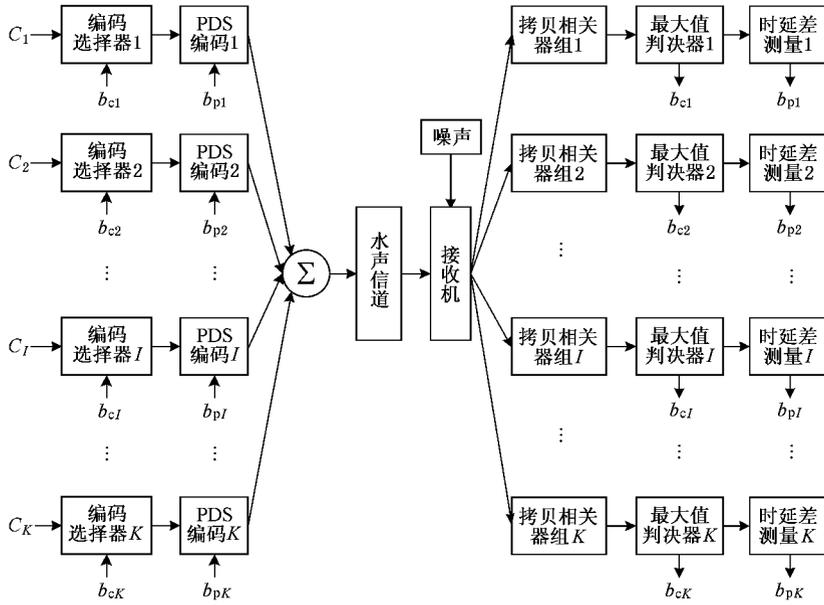


图 4  $M$  元扩频多通道 Pattern 时延差编码通信原理图

收端需  $KM$  个拷贝相关器,在通信速率提高的同时,接收端的计算量及存储空间均相应增加,使用多片 DSP 后可实现实时通信译码。

### 4. 湖试结果

系统工作频带 6—9 kHz,采样频率为 44.1 kHz.扩频码脉宽  $T_p = 128 \text{ ms}$ ,128 个 chip,若采用 BPSK 编码方式,则通信速率为  $1/128 \text{ bit/ms} \approx 8 \text{ bit/s}$ ;采用 8 进制( $M = 8$ )扩频编码方式,若未使用 PDS 二次编码,其通信速率为  $3/128 \text{ bit/ms} \approx 23 \text{ bit/s}$ .现在讨论  $M$  元扩频 PDS 通信系统的通信速率,取 PDS 编码时间  $T_c = 32 \text{ ms}$ , $n = 5 \text{ bit}$ ,量化间隔  $\Delta\tau = 1 \text{ ms}$ ,每个码元宽度  $T_0 = T_p + T_c = 160 \text{ ms}$ ,则单通信信道工作时的通信速率为  $(5 + 3)/160 \text{ bit/ms} = 50 \text{ bit/s}$ .相对于未使用 PDS 编码的传统 8 进制扩频通信,通信速率提高了一倍多.采用多通道工作方式时通信速率将进一步成倍增加。

为验证本文提出的水声通信方案,于 2006 年 8 月末在吉林省松花湖进行了湖试.该季节水文条件较为恶劣,图 5 为试验当时通过声速剖面仪测量得到的声速梯度分布,等温层非常薄,声速呈负梯度声速分布,且负声速梯度的量级较大.另外,该季节为松花湖旅游旺季,游船特别多,环境噪声干扰大。

收、发节点分别位于两艘处于自由漂泊状态的船上,风浪使节点间存在缓慢的相对运动,最大漂泊

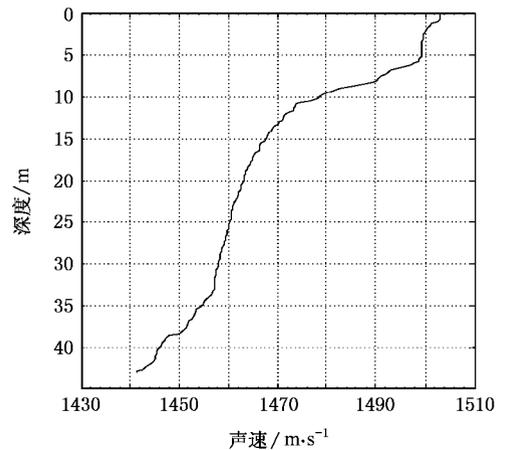


图 5 声速剖面图

速度约 0.4 m/s.根据水域条件,通信距离最近 600 m,最远 3490 m.每帧数据以同步码(LFM)开始,留有一段保护时间后,为长度约为 5 s 的信息码;发射数据共 12 帧,总长约 65 s.在接收端采用作者在文献 [17] 中提出的单阵元无源时间反转镜信道均衡技术,抑制多途扩展产生的码间干扰。

下面给出通信距离 2370 m 时的试验分析.图 6 为接收到的同步码进行拷贝相关处理后得到声信道的多途扩展情况。

从图中可以看到,接收信号的信噪比较低且多途扩展严重,几路多途信号幅度相当,多途扩展延时几十毫秒到 100 ms.比较图 (a)(b)(c),发现信道

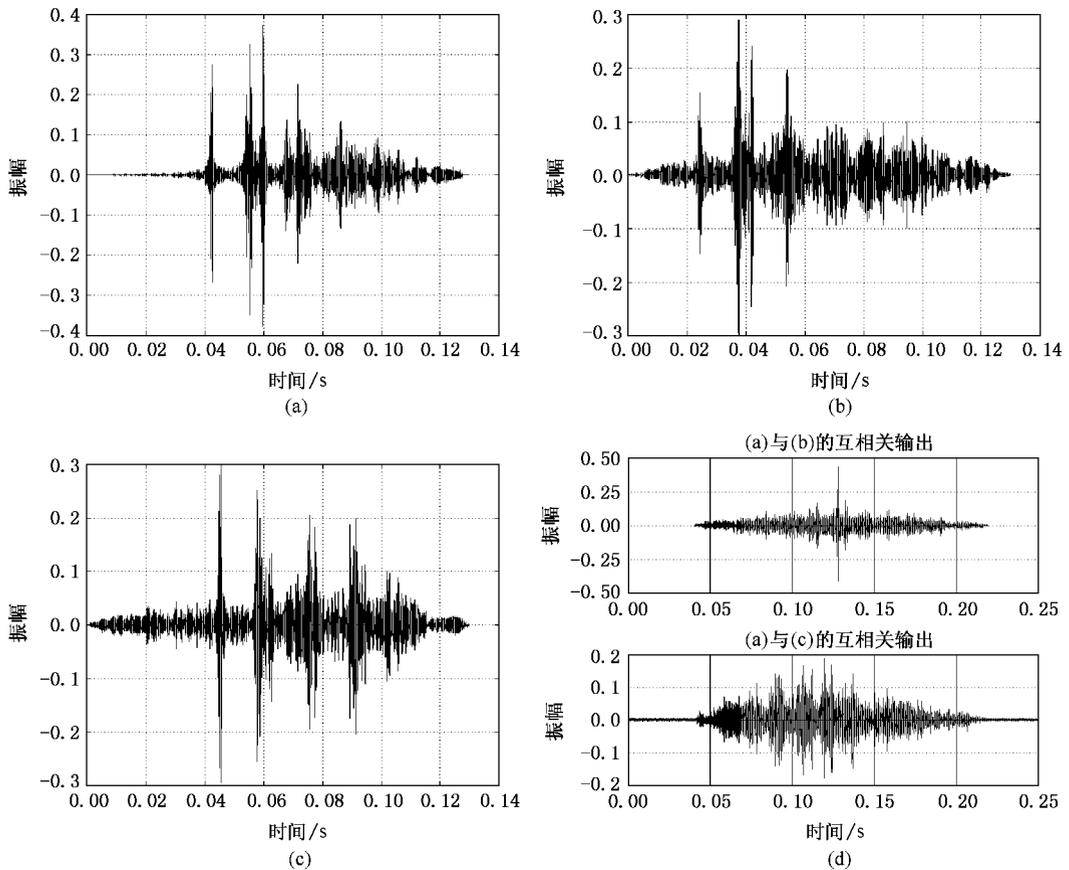


图 6 不同帧数据的同步码拷贝相关输出 (a)第 1 帧 (b)第 2 帧 (c)最后一帧 (d)互相关输出

时变性明显,每帧数据间隔 5 s 后的信道与前一帧的相关性有所衰落.不同帧同步码的拷贝相关输出的互相关输出,可以较好地反映出信道时变特性:图 6(d)的上图表明,第 1 帧与第 2 帧数据的传播信道相关性较好,而下面子图表明第 1 帧与最后一帧数据的传播信道相关性很弱,即随着通信持续时间的延长,信道的时变特性是不容忽视的.这也恰好验证了本文中采用的无源时间反转镜信道均衡技术和扩频 Pattern 时延差编码通信方案的稳健性.

改变  $M$  元扩频、多通道 Pattern 时延差编码水声通信方案的通道数,进行了 3 通信信道至 8 通信信道的通信试验.单通信信道的通信速率为 50 bit/s,则通过改变通信信道数可改变系统的通信速率,最低速率为 150 bit/s,最高速率为 400 bit/s.在接收端采用作者在文献 [13] 中提出的单阵元无源时间反转镜信道均衡技术,抑制多途扩展产生的码间干扰.表 1 给出了不同水平距离得到的统计误码率 (BER).

从表中可以看出,相同作用距离下,误码率随着通信信道数的增加而增加.信道数较多时只适用于

表 1  $M$  元扩频、多通道 Pattern 时延差编码测试误码率统计

通信信道数	通信速率/bit·s <sup>-1</sup>	水平距离/m	BER/%
3	150	1770	0
		2170	0.0207
		2370	0
		2620	0
		3000	0.0414
		3490	0.1965
4	200	1770	0
		2370	0
		2620	0
5	250	1770	0
		2170	0.0620
		2620	0
6	300	3000	0.1551
		2190	0
		2620	0.3412
7	350	600	0
		2620	0.5805
		600	0
8	400	2170	0.1787
		2190	4.0633

近程通信,当通信距离较远时,为保证一定的通信质量,应少于5个通信信道工作.相比于文献[1],[13],本文方案为多用户网络化水声通信提供了基础,而与文献[12]相比,由于每个扩频通信信道采用PDS体制进行了二次编码,通信速率将被提高数倍.

## 5. 结 论

本文采用了改进型 Logistic 映射迭代形成的数字混沌序列作为扩频序列,产生扩频码.扩频通信可适用于远距离水声通信,为克服其通信速率低的缺点,本文提出将扩频通信与 Pattern 时延差编码水声

通信相结合,构成一种新的适用于水声环境的通信方案,既获取了扩频通信的一系列优良特性,又基于 PDS 通信体制明显提高了扩频通信速率,鲁棒性强.另外,采用多进制、多通道扩频通信方式进一步提高通信速率.

$M$  元扩频、多通道 Pattern 时延差编码水声通信方案,可为提高水声通信速率、加大通信距离、实现组网通信打下坚实基础,有利于支持综合业务的传输、提高系统的抗干扰能力和实时适应于复杂的水声传播条件.最后通过湖试结果验证了该水声通信方案的有效性和可靠性.

- [1] Hui J Y, Liu L, Liu H, Feng H H 1999 *Acta Acustica* **24** 561 (in Chinese) [ 惠俊英、刘 丽、刘 宏、冯海鸿 1999 声学学报 **24** 561 ]
- [2] Yin J W, Hui J Y, Yao Z X, Wang Y L 2006 *China Ocean Eng.* **20** 499
- [3] Raymond L P, Donald L S, Laurence B M 1982 *IEEE Trans. Commun.* **30** 855
- [4] Zhang J S, Xiao X C 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 5039 (in Chinese) [ 张家树、肖先赐 2001 物理学报 **50** 5039 ]
- [5] Chen B, Liu G H, Zhang Y, Zhou Z O 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5039 (in Chinese) [ 陈 滨、刘光祜、张 勇、周正欧 2005 物理学报 **54** 5039 ]
- [6] Yu L H, Fang J C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4012 (in Chinese)

[ 于灵慧、房建成 2005 物理学报 **54** 4012 ]

- [7] Wang B Y, Tommy W S C, Ng K T 2004 *Chin. Phys.* **13** 329
- [8] Mu J, Tao C, Du G H 2003 *Chin. Phys.* **12** 381
- [9] Feng J C 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 1851
- [10] Josko A C 1990 *IEEE J. Oceanic Eng.* **15** 205
- [11] Wang H, Hu J D 1997 *Acta Ele. Sin.* **25** 19 (in Chinese) [ 王 亥、胡健栋 1997 电子学报 **25** 19 ]
- [12] Wang H B, Wu L X 2004 *Acta Acustica* **29** 161 (in Chinese) [ 王海斌、吴立新 2004 声学学报 **29** 161 ]
- [13] Yin J W, Hui J Y, Hui J, Sheng X L, Yao Z X 2007 *Acta Acustica* **32** 378 (in Chinese) [ 殷敬伟、惠俊英、惠 娟、生雪莉、姚直象 2007 声学学报 **32** 378 ]

# $M$ -ary chaotic spread spectrum Pattern time delay shift coding scheme for multichannel underwater acoustic communication<sup>\*</sup>

Yin Jing-Wei<sup>†</sup> Hui Jun-Ying Wang Yi-Lin Hui Juan

( College of Underwater Acoustic Engineering , Harbin Engineering University , Harbin 150001 , China )

( Received 27 November 2006 ; revised manuscript received 5 February 2007 )

## Abstract

Pattern time delay shift coding scheme uses the time delay shift values of the Pattern to code the information whose anti-ISI (intersymbol interference) ability is related to the kind and duration of the Pattern. Spread spectrum communications is competent for long-range underwater acoustic communications for its spread spectrum gain, but the low communications rate seriously restricts its application. The proposed new scheme is adapted to the underwater acoustic environment, which integrates the spread spectrum with Pattern time delay shift coding and works at  $M$ -ary mode spread spectrum and several communications channels. The scheme could achieve good performance of the spread spectrum and also improve the data transfer rate. The results of lake trial show that the  $M$ -ary chaotic spread spectrum Pattern time delay shift coding scheme is robust and feasible.

**Keywords** : underwater acoustic communication ,  $M$ -ary chaotic spread spectrum communication , Pattern time delay shift coding scheme

**PACC** : 4330 , 0545

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China ( Grant No. 2006AA09Z105 ).

<sup>†</sup> E-mail : yinjingwei@hrbeu.edu.cn