

# 基于差分 Pattern 时延差编码和海豚 whistles 信号的仿生水声通信技术研究\*

韩笑 殷敬伟<sup>†</sup> 郭龙祥 张晓

(哈尔滨工程大学, 水声技术重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2013年4月22日收到; 2013年6月27日收到修改稿)

为解决传统的隐蔽水声通信方法带来的通信性能降低问题, 提出了一种将差分 Pattern 时延差编码通信体制与海豚 whistles 信号相结合的仿生水声通信技术. 海豚 whistles 信号频带较窄且各信息码元间隔不等、码元之间互相关性较弱, 选取 whistles 信号作同步码和 Pattern 码, 并以相邻 whistles 信号之间的时延差值携带信息. 这种仿生的水声通信信号不易被敌方探测、截获, 且差分 Pattern 时延差特殊的编码方式也不易使信息被破译, 因此该水声通信技术具有较强的隐蔽性和保密性, 且在抗码间干扰以及抗多普勒效应方面具有优异性能. 本文对系统进行了水池实验, 在信噪比为 0 dB、存在相对运动时实现了通信速率为 67 bit/s 的低误码数据传输, 验证了系统的有效性、稳健性和隐蔽性.

**关键词:** 仿生水声通信, 差分 Pattern 时延差编码, 海豚 whistles 信号, 隐蔽性

**PACS:** 43.30.+m, 43.60.Ac

**DOI:** 10.7498/aps.62.224301

## 1 引言

随着现代探测技术的不断发展, 对水声通信的隐蔽性也提出了更高的要求<sup>[1]</sup>. 传统的隐蔽水声通信大多采用降低系统信噪比的方法实现<sup>[2-5]</sup>, 但是较低的信噪比必然导致通信性能的下降. 仿生是一种隐蔽水声通信可以采取的方法, 与单纯的降低信噪比不同, 仿生是用水声环境中自然存在的信号作调制波形, 这种信号可以选用海豚、鲸鱼等海洋哺乳动物发出的声音. 海豚利用声信号来探测周围的环境和信息交流, 根据信号的不同形式, 一般把海豚声信号分成三大类<sup>[6-8]</sup>: 回声定位信号 (clicks)、通信信号 (whistles) 和应急突发信号 (burst pulses). 近年来, 国内外对海豚声纳的研究主要集中在回声定位信号和通信信号上, 对于后者的研究主要分为两种<sup>[9,10]</sup>: 一是通信信号的分类; 二是通信信号传递信息的分析, 而将其应用于水声通信编码方面的

研究甚少. 近年来 Janik 和 Sayigh<sup>[11]</sup> 研究发现海豚 whistles 信号中存在一类特殊的信号——签名哨叫声 (signature whistles), 用以区别不同的海豚个体. 因此, 在通信海域出现的其他海豚 whistles 信号也可以基于签名哨叫声加以区分, 消减同类信号干扰.

Pattern 时延差编码 (Pattern time delay shift coding, PDS) 通信体制<sup>[12,13]</sup> 是由哈尔滨工程大学在 20 世纪 90 年代提出的, 差分 Pattern 时延差编码<sup>[14,15]</sup> (differential Pattern time delay shift coding, DPDS) 是对 PDS 体制的改进, 它将信息编码技术和信道编码技术融于信号码元的设计中, 采用码元分割, 以相邻码元的时间差值携带信息, 具有较好的抗码间干扰和抗多普勒的能力, 同时, 其特殊的编码方式也不易使信息被破译.

本文基于 DPDS 系统提出了一种仿生水声通信技术, 选取了海豚 whistles 信号作同步码和 Pattern 码, 并以相邻 whistles 信号之间的时延差值携带信息, 该种仿生水声通信系统具有较强的通信隐

\* 国家自然科学基金项目 (批准号: 51179034, 60802060)、中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: P223513012) 和博士后基金项目 (批准号: 2013M531015) 资助的课题

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

蔽性. 通过计算机仿真研究和水池实验, 验证了系统的有效性和稳健性.

## 2 DPDS 通信体制

### 2.1 DPDS 编解码原理

DPDS 水声通信体制将数字信息调制于 Pattern 码出现在码元的时延差信息中, 属于脉位编码, 其编码如图 1 所示. 图 1 中,  $T_p$  为 Pattern 码脉宽;  $T_{i.end}$  为第  $i$  个码元结束时刻;  $d_i$  为第  $i$  个码元所调制的时延值,  $d_i \in [0, T_c]$ , 其中  $T_c$  为最大编码时间.

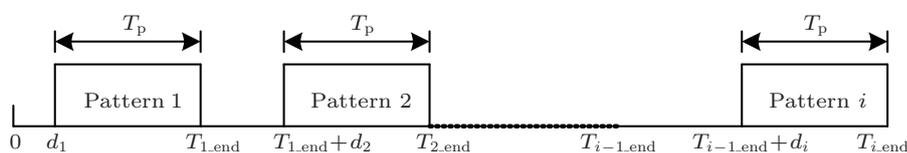


图 1 差分 Pattern 时延差编码示意图

解码时利用原始 Pattern 码与经过信道的 Pattern 码做滑动相关运算, 找出相关峰的位置, 第  $i$  个码元 Pattern 码相关峰位置  $T_{i.end}$  与第  $i-1$  个码元 Pattern 码相关峰位置  $T_{i-1.end}$  的差值, 再减去  $T_p$  即求得第  $i$  个码元携带的时延值  $d_i$ .

### 2.2 系统抗码间干扰性能

声信号沿不同途径的声线到达接收点, 总的接收信号是通过接收点的所有各声线所传送的信号干涉叠加. 若多途扩展与直达声的时延差大于码元宽度, 则它与相邻码元波形相叠加并产生干涉, 形成码间干扰, 码间干扰对码元区分带来困难.

DPDS 通信体制可以通过码元分割来克服码间干扰, 本通信系统利用一组近似正交的 Pattern 码作为系统的码元来进行码元分割. 若 Pattern 码共有  $L$  个, 则相邻的同一 Pattern 码出现的时间间隔:

$$T \in [L \times T_p, L \times (T_p + T_c)], \quad (2)$$

即抗多途时延扩展的能力最大为  $L \times (T_p + T_c)$ , 最小为  $L \times T_p$ , 所以 Pattern 码的个数越多, 其抗码间干扰的能力就越强.

### 2.3 系统抗多普勒性能

对于常规 PDS 系统, Pattern 码相关峰位置总是

以  $\Delta d$  表示最小量化时间, 假设每个码元携带  $n$  bit 信息, 则最小量化时间  $\Delta d = T_c / (2^n - 1)$ , 第  $i$  个码元的时延值  $d_i = k_i \times \Delta d (k_i = 0, 1, \dots, 2^n - 1)$ . DPDS 波形可以用下式表示:

$$s(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^L p_j \left[ t - \sum_{n=1}^{L \cdot i + j} k_n \cdot \Delta d - (L \cdot i + j - 1) \cdot T_p \right], \quad (1)$$

式中,  $L$  为 Pattern 码的个数;  $p_j(t)$  为第  $j$  个 Pattern 码波形;  $\sum_{n=1}^{L \cdot i + j} k_n \cdot \Delta d$  为  $(L \cdot i + j)$  个码元的时延差值;  $(L \cdot i + j - 1) \cdot T_p$  为  $(L \cdot i + j - 1)$  个 Pattern 码时间宽度.

以整个编码信号起始时刻作参考, 第  $i$  个 Pattern 码相关峰出现的时刻:

$$T_i = (i - 1)T_0 + d_i + T_p, \quad (3)$$

式中  $T_0 = T_p + T_c$  为码元宽度, 对于传统 PDS 系统,  $T_0$  是固定值.

当存在多普勒效应时, 信号会在时域上压缩或者展宽, 由于每个 Pattern 码相关峰的位置都是以编码信号起始时刻作参考的, 若每个码元  $T_0$  脉宽由于多普勒产生的时间偏移量为  $\Delta d$ , 则第  $i$  个码元的时延偏差量为  $\sum_{n=1}^i \Delta d_n$ , 这种偏差量会随着码元的增多而累加, 当偏差量大于最小量化时间  $\Delta d$  时就会产生误码.

而对于 DPDS 系统, Pattern 码相关峰位置总是以其前一 Pattern 码相关峰作参考的, 所以第  $i$  个码元的时延偏差量只与第  $i$  个码元由于多普勒产生的时间偏移量  $\Delta d_i$  有关, 只要  $\Delta d_i$  小于最小量化时间  $\Delta d$  就保证系统正确无误的解码. 可见 DPDS 系统不存在时延偏差的累积, 其抗多普勒的性能要远远优于 PDS 系统.

## 3 海豚 whistles 信号及应用

从上面的分析可以看出, DPDS 通信体制利用多种 Pattern 码型来进行码元的分割. 码型的选择至

关重要,直接关系到 DPDS 体制抗码间干扰的能力,既要求所选择的 Pattern 码型自相关峰尖锐,又要保证相邻的 Pattern 码彼此间的互相关性弱,这样才能可以保证足够好的抑制码间干扰效果.

### 3.1 海豚 whistles 信号特征分析

海洋哺乳动物发出的信号为非平稳信号.传统的信号分析手段,如傅里叶变换反映不出信号频率随时间变化的行为,只适合分析平稳信号,而对频率随时间变化的非平稳信号只能给出一个总的平均效果.时频分析的方法可用于分析非平稳信号 [16],可以描述信号的频率随时间变化的特点.

海豚 whistles 信号主要用于个体或群体之间互相联络 [7]、情感表达. whistles 信号为调频信号,频带较窄,持续时间从几百毫秒到几秒.图 2 为采集到的一段海豚 whistles 信号(该段信号来自 Macaulay Library 网站),图 3 是对采集到的信号进行短时傅里叶变换的结果.由图 3 可知该段海豚 whistles 信号能量主要集中在 2—8 kHz 范围内,属于低频信号,适宜在水中进行远距离传输.

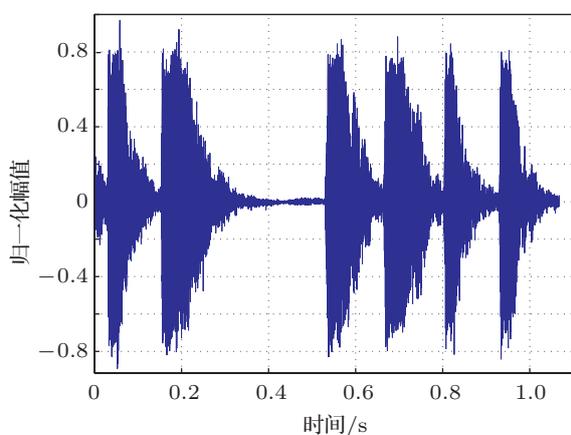


图 2 海豚 whistles 信号的时域波形

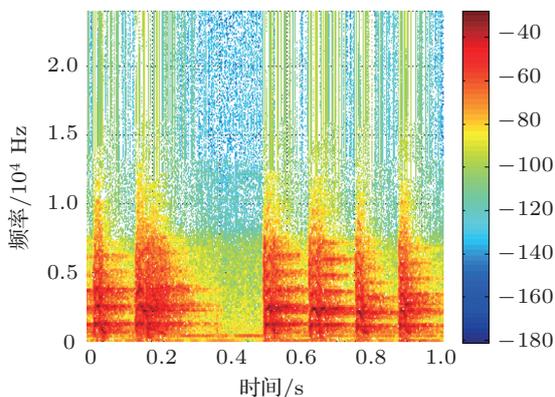


图 3 海豚 whistles 信号的时频分析

图 2 中的海豚 whistles 信号共包含 6 串不同的信息码元,从每串信息码元中截取一段长度为 40 ms 的有效信号,分别记为  $W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6$ .表 1 详细列出了归一化后的各串信号互相关及自相关系数.

表 1 海豚 whistles 各串信号相关系数

信号	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$W_5$	$W_6$
$W_1$	1.00	0.19	0.26	0.12	0.20	0.24
$W_2$	0.19	1.00	0.30	0.19	0.16	0.29
$W_3$	0.26	0.30	1.00	0.27	0.19	0.23
$W_4$	0.12	0.19	0.27	1.00	0.32	0.28
$W_5$	0.20	0.16	0.19	0.32	1.00	0.37
$W_6$	0.24	0.29	0.23	0.28	0.37	1.00

### 3.2 海豚 whistles 信号在水声通信中的应用

海豚 whistles 信号能量集中在声频范围,属于低频信号,各信息码元串之间互相关较弱.从图 2 可以看出,海豚 whistles 信号相邻信息码元串之间有一定的时间间隔,且时间间隔不固定,而 DPDS 系统也正是利用相邻码元之间的时延差值来携带信息,因此 DPDS 系统中应用海豚 whistles 信号能够使通信信号更近似于海洋中的海豚所发信号,具有较强的隐蔽性.

从海豚 whistles 信号中选取 Pattern 码应遵循以下两个原则:一是选取 whistles 信号个数尽可能多;二是 whistles 信号之间的互相关性弱.综合以上原则并根据表 1 统计结果,本文选取一组互相关系数小(归一化互相关系数小于 0.30)的  $W_1, W_2, W_3, W_5$  作为水下数据传输系统的 4 种 Pattern 码波形,这样相邻的同一 Pattern 码出现的时间间隔  $T \in [4 \times T_p, 4 \times (T_p + T_c)]$ ,即最大抗多途扩展的能力为  $4 \times (T_p + T_c)$ .

## 4 水池验证

为了验证系统的有效性和稳健性,于哈尔滨工程大学信道水池进行了水声通信实验.该信道水池长 40 m,宽 6 m,高 6 m,水深约 5 m.收发节点分别位于两台行车上,发射换能器频带 2—8 kHz,接收水听器 and 功放采用 BK 公司的 BK8105 和 BK2713,信号放大滤波采用嘉兆科技的 PF-1U-8FA,发射换能器和接收水听器均垂直吊放,发射和采集设备采用两台电脑声卡.

通信系统信号参数如下: 采样频率 48 kHz; Pattern 码采用 4 段带宽 2—8 kHz 海豚 whistles 信号  $W_1, W_2, W_3$  和  $W_5$ , 脉宽  $T_p = 40$  ms; 同步信号采用  $W_6$ ; 每个码元携带 4 bit 信息, 最小量化时间为 2.5 ms; 最大编码时间  $T_c = 40$  ms; 保护间隔:  $T_z = 50$  ms; 传输数据  $2 \times 10^4$  bit, 分帧传输; 通信速率为 67 bit/s.

信源、信宿相距 8 m, 发射换能器吊放 1 m, 接收水听器吊放 2 m 时, 图 4 显示了同步检测输出结果, 图 5 显示了 Pattern 码拷贝相关输出结果.

从图 4 可以看到, 水池实验时信号所经过的信道较为复杂, 最大多途扩展延时达 20 ms. 但由于海豚 whistles 信号具有优良的自相关特性以及较弱的互相关性, 且选用了 4 种 whistles 信号作为 Pattern 码波形, 因此系统具有较强的抗码间干扰的能力, 对多途效应不敏感. 从图 5 也可以看出, 尽管实验信道多途复杂, 但接收信号与本地 Pattern 码的解码相关峰仍比较明显, 验证了系统的有效性和稳健性, 也体现了拷贝相关解码可获得相关增益, 有助于实

现低发射功率下的保密通信.

在该通信距离下调整功率放大器输出功率, 验证系统在不同信噪比条件下的性能. 图 6 给出了接收端估计信噪比与数据误比特率关系曲线, 可以看出 DPDS 仿生水声通信系统具有较强的抗噪声干扰能力.

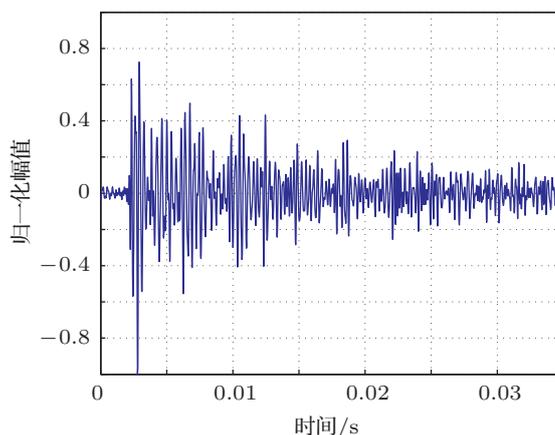


图 4 同步码相关检测结果

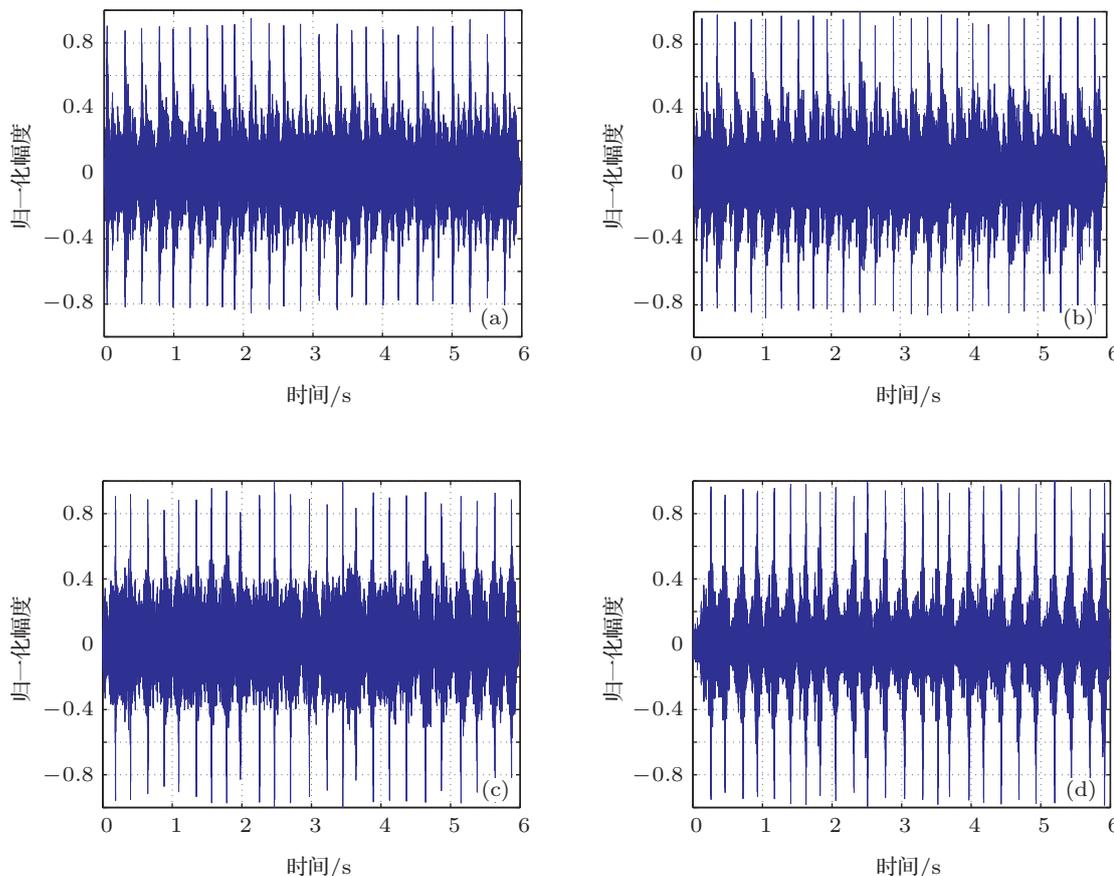


图 5 水池实验 (a) 参考码 Pattern 1 相关结果; (b) 参考码 Pattern 2 相关结果; (c) 参考码 Pattern 3 相关结果; (d) 参考码 Pattern 4 相关结果

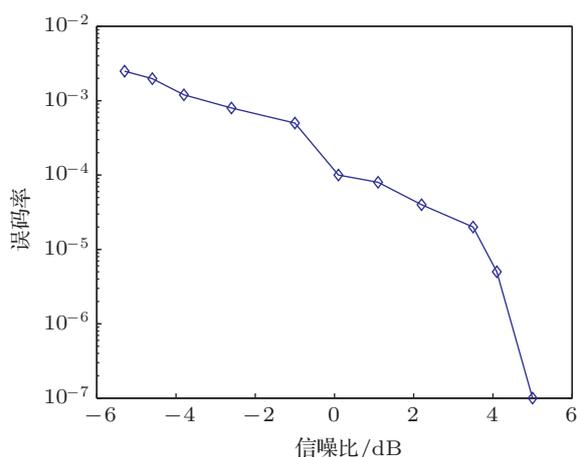


图6 不同发射功率下系统解码性能

由于实验水池长度有限,且行车移动速度无法改变.为了验证系统存在多普勒效应情况下的性能,本文基于水池数据通过变采样率的方法人为增加多普勒效应,规定水听器靠近发射换能器速度为正,远离发射换能器速度为负.表2给出了数据处理结果.从表2可以看出,当信源、信宿存在多普勒时,DPDS 仿生通信系统仍具有较好的稳健性.

表2 存在多普勒效应系统解码效果

径向相对速度/m·s <sup>-1</sup>	多普勒系数	误比特率/%
-3	-0.002	0.12
-2	-0.0013	0.08
-1	-0.00067	0
0	0	0
1	0.00067	0
2	0.0013	0.13
3	0.002	0.24

为了进一步验证系统的稳健性,实验时多次改变信源、信宿的距离以及发射换能器和接收水听器的吊放深度,以验证系统在不同声信道条件下的性能.表3给出了实验数据的处理结果,可以看出,DPDS 仿生水声通信系统不同声信道情况下均表现出优异的解码性能,具有很好的稳健性.文献[13]深入研究了以正、负调频斜率的 LFM 信号为

Pattern 码的差分 Pattern 时延差编码系统,与本文仿生通信技术相比,在抗码间干扰和抗多普勒方面性能相近,虽然通信速率高出近一倍,但隐蔽性相差甚远,不适合对隐蔽性要求较高的水下通信平台.

表3 实验数据处理结果统计

换能器吊放深度/m	水听器吊放深度/m	信源信宿距离/m	信噪比/dB	误比特率/%
1	2	8	5.0	0
1	3	8	5.0	0
2	2	8	3.0	0
2	3	8	3.0	0
1	2	13	1.9	0.025
1	3	13	1.9	0.05
2	2	13	0	0.15
2	3	13	0	0.10

## 5 结论

DPDS 水声通信体制利用相邻码元之间的时延差值携带信息,码元宽度不固定,具有较强的抗码间干扰和抗多普勒的能力.海豚 whistles 信号频带较窄且不同的信息码元串之间互相关性弱,自相关性强.本文将 DPDS 水声通信体制与海豚 whistles 信号结合,提出了一种采用海豚 whistles 信号作 Pattern 码的 DPDS 仿生通信系统.与单纯的通过降低信噪比来取得较好的通信隐蔽性不同,该系统采用不同海豚 whistles 信号之间的时延差值来携带信息,由于海豚 whistles 信号是海洋环境中真实存在的,不容易引起敌方的注意,同时 DPDS 特殊的编解码方式也可在低功率下实现隐蔽通信,即使信号被截获也难以破译,因此该系统具有较强的隐蔽性能.本文对系统进行了水池实验,验证了系统的有效性和稳健性,具有较好的工程应用前景.基于仿生信号与 M 元扩频相结合等新型仿生通信体制、基于签名哨叫声 (Signature whistles) 特性的多用户仿生通信技术等方面的研究是今后重点研究方向.

[1] Meng D, Wang H B, Wu L X, Wang J 2008 *Technical Acoustics* **27** 464 (in Chinese) [孟荻, 王海斌, 吴立新, 汪俊 2008 声学技术 **27** 464]  
 [2] Leus G, van Walree P A 2008 *IEEE J. Sel. Area Commun.* **26** 1662  
 [3] Yang T C, Yang W B 2008 *J. Acoust. Soc. Am.* **124** 3632  
 [4] Liu S Z, Qiao G, Ismail A 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **133** EL300  
 [5] Zhang T W, Yang K D, Ma Y L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 124301

[6] Baumgartner M F, Mussoline S E 2011 *J. Acoust. Soc. Am.* **129** 2889  
 [7] Hawkins E R 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **128** 924  
 [8] Masahiko F, Tomonari A, Yasushi N 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **124** 3440  
 [9] Sims P Q, Vaughn R, Hung S K, Wuersig B 2012 *J. Acoust. Soc. Am.* **131** EL48

- [10] Finneran J J 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **133** 1796
- [11] Janik V M, Sayigh L S 2013 *J. Comp. Physiol. A* **199** 479
- [12] Yin J W, Hui J Y, Wang Y L, Hui J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5915 (in Chinese) [殷敬伟, 惠俊英, 王逸林, 惠娟 2007 物理学报 **56** 5915]
- [13] Yin J W, Hui J Y, Guo L X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1753 (in Chinese) [殷敬伟, 惠俊英, 郭龙祥 2008 物理学报 **57** 1753]
- [14] Yin J W, Zhang X, Sheng X L, Sun C 2012 *J. Commun.* **33** 112 (in Chinese) [殷敬伟, 张晓, 生雪莉, 孙超 2012 通信学报 **33** 112]
- [15] Yin J W, Hui J Y, Wang Y L, Yao Z X 2006 *J. Marine Sci. Appl.* **5** 51
- [16] Guo L X, Mei J D, Zhang L 2011 *Technical Acoustics* **30** 64 (in Chinese) [郭龙祥, 梅继丹, 张亮 2011 声学技术 **30** 64]

# Research on bionic underwater acoustic communication technology based on differential Pattern time delay shift coding and dolphin whistles\*

Han Xiao Yin Jing-Wei<sup>†</sup> Guo Long-Xiang Zhang Xiao

(*Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

(Received 22 April 2013; revised manuscript received 27 June 2013)

## Abstract

Regarding the performance degradation caused by the traditional method of covert underwater acoustic communication, in this paper we propose a bionic underwater acoustic communication technology on the basis of differential Pattern time delay shift coding system and dolphin whistles. The signal band of dolphin whistles is narrow and the intervals between information signals are different, and the cross-correlation is very weak. Dolphin whistles are used for synchronization and Patterns, for the time interval between dolphin whistles conveys the information bits. The mimicked version of communication signal is not easy to detect and intercept, and the special encoding method of differential Pattern time delay shift also makes the information not easy to decipher, so this bionic underwater acoustic communication technology has strong covert and confidential nature and it also has an excellent performance in anti inter-symbol interference and anti Doppler effect. A tank experiment is conducted for this system. At SNR 0 dB and relative movement, the user message is recovered at an effective data rate of 67 bit/s with low bit error. It is proved that the system has an effectiveness, robustness and covert nature.

**Keywords:** bionic underwater acoustic communication, differential Pattern time delay shift coding, dolphin whistles, covert nature

**PACS:** 43.30.+m, 43.60.Ac

**DOI:** 10.7498/aps.62.224301

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51179034, 60802060), the Fundamental Research Funds of the Central University, China (Grant No. P223513012), and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2013M531015).

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