

差分 Pattern 时延差编码水声通信技术研究

殷敬伟^{1,2}, 张晓¹, 生雪莉¹, 孙超²

(1. 哈尔滨工程大学 水声技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 西北工业大学 声学工程研究所, 陕西 西安 710072)

摘要: 基于传统 Pattern 时延差编码提出一种采用非固定码元宽度的差分编码方式 (DPDS), 以相邻码元时间差值携带信息, 利用不同线性调频信号来实现码元分割, 具有较好的抗码间干扰和抗多普勒的能力。通过计算机仿真研究及湖试实验, 验证了 DPDS 系统可提高通信速率, 可抑制信道多途效应产生的码间干扰和多普勒效应产生的时间漂移, 具有很好的有效性和稳健性。

关键词: 水声通信; Pattern 时延差编码; 差分编码; 多普勒

中图分类号: TN911.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)06-0112-06

Research on differential Pattern time delay shift coding underwater acoustic communication

YIN Jing-wei^{1,2}, ZHANG Xiao¹, SHENG Xue-li¹, SUN Chao²

(1. Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Institution of Acoustic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A differential Pattern time delay shift coding (DPDS) method with a non-fixed code width based on the traditional Pattern time delay shift coding was proposed. The information is carried by the time delay between adjacent code element, the different linear frequency modulation (LFM) signal is used for adjacent code division. The DPDS system has an ability anti inter-symbol interference (ISI) and the Doppler effects. The computer simulation and lake tests prove that the DPDS system can improve the communication rate, inhibit the ISI caused by the multi-path channel and anti the Doppler effects. It is proved that the system has an effectiveness and robustness.

Key words: underwater acoustic communication; Pattern time delay shift coding; differential coding; Doppler

1 引言

近年来随着人类海洋活动的增加, 各种无人、载人潜器在海洋勘探开发领域发挥着越来越大的作用, 而其与母船间的信息互通依靠水声, 所以水声通信尤其是移动水声通信技术逐渐成为了研究热点。在不同的应用场合, 研究人员提出了各种各

样的通信技术, 不同的技术都有各自的优缺点。诸如水声扩频通信技术^[1]有着较强的抗干扰能力以及优越的码分多址特性, 但其通信速率较低; 正交频分复用技术 (OFDM)^[2]可以实现较高的通信速率, 但会面临多普勒频偏敏感等问题。

Pattern 时延差编码通信 (PDS)^[3~7]属于脉位编码, 是由哈尔滨工程大学水声通信技术研究室提出

收稿日期: 2010-11-04; 修回日期: 2011-03-14

基金项目: 博士后基金资助项目 (20090461313); 国家自然科学基金资助项目 (51179034, 60802060); 教育部高等学校博士点基金资助项目 (200802171061); 上海交通大学海洋工程国家重点实验室基金资助项目 (1007)

Foundation Items: China Postdoctoral Science Foundation (20090461313); The National Natural Science Foundation of China (51179034, 60802060); Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (200802171061); Foundation of State Key Laboratory of Ocean Engineering of China (1007)

的一种适合水声通信的通信体制，利用 Pattern 码出现在码元窗的时延差值进行时延编码，能有效地抑制多途信道带来的影响。PDS 采用的是固定码元宽度，利用码元的时间宽度在时域进行相邻码元的分割来抵消多途信道引起的码间干扰，但是固定码元宽度一方面会带来一定程度上通信速率的下降，另一方面就是当存在由于相对运动而产生时间压缩或展宽时，在通信解码时随着时间的推移存在时间漂移的累积，进而会产生高误码率。差分调制、解调是无线电通信里面常用的方法，比如 DPSK，采用差分相干解调除了不需要恢复相干载波外，在抗频漂能力、抗多途效应与抗相位抖动能力方面均优于绝对调制^[8]。本文基于 PDS 体制及差分编解码的特点，提出了一种以相邻码元的时间差值携带信息的差分编码方式 (DPDS)，它的码元宽度是非固定的，有效地提高了通信速率，具有较好的抗码间干扰和抗多普勒的能力。

2 差分 Pattern 时延差编码原理

差分 Pattern 时延差编码水声通信体制 (DPDS, differential Pattern time delay shift coding) 是对 Pattern 时延差编码体制的改进，如图 1 所示。从图中可以看到，每个码元没有固定码元宽度，相邻的 Pattern 码采用正、负调频斜率的线性调频信号进行码元分割，这样可以抑制部分多途信道对相邻码元产生的码间干扰。

图 1 中 T_p 为 Pattern 码脉宽。 T_{i_end} 表示第 i 个码元结束时刻， τ_i 表示第 i 个码元所调制的时延值， $\tau_i \in [0, T_c]$ ，其中， T_c 为最大编码时间。若每个码元携带 n bit 信息，则将最大编码时间 T_c 分为 $2^n - 1$ 份，

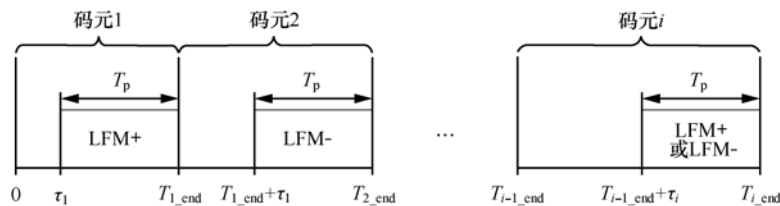


图 1 差分 Pattern 时延差编码

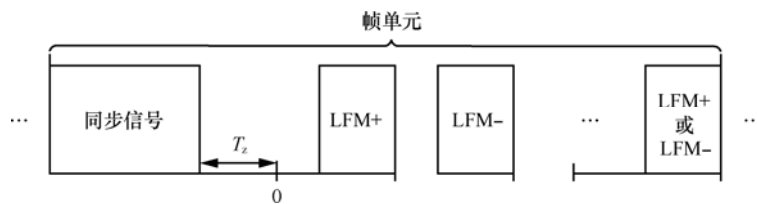


图 2 帧结构

编码量化层 $\Delta\tau = T_c / (2^n - 1)$ 。例如当每个码元携带 4bit 信息时，则将编码时间均分为 15 份，第 i 个码元的时延差 τ_i 为

$$\tau_i = T_{i_end} - T_{i-1_end} - T_p = k_i \Delta\tau, \quad k_i = 0, 1, \dots, 2^n - 1 \quad (1)$$

式中，第 i 个码元信息的参考时基是前一码元，不同的 τ_i 代表不同的信息，若 $k=0$ ，则代表信息“0000”，Pattern 码位置 $\tau=0$ ；若 $k=8$ ，则代表信息“1000”，Pattern 码位置 $\tau=8\Delta\tau$ 。

DPDS 系统在进行解码时利用原始 Pattern 码与经过信道的 Pattern 码做滑动相关运算，第 i 个码元 Pattern 码相关峰出现的位置 T_{i_end} 与解码时间基准 T_{i-1_end} (该时刻为前一个码元 Pattern 码的相关峰位置) 的差值，再减去 T_p 即求得第 i 个码元携带的时延值 τ_i 。

3 DPDS 水声通信系统性能分析

差分 Pattern 时延差编码通信体制信号结构如图 2 所示。

图 2 中信息码开始时刻为 0 时刻，之前有同步信号以及宽度为 T_z 的保护时隙。 T_z 大于信道多途扩展时延，一方面可以提高同步准确度，另一方面可以减少同步码多途扩展对后续信息码的干扰。图 2 为一个帧单元的结构，在进行水声通信时多个帧顺序发送，帧与帧之间同样有 T_z 的保护时隙。

3.1 系统抗多普勒性能分析

当信源、信宿间存在相对运动时，将会产生 2 方面问题：①多普勒效应对 Pattern 码在时域上产生压缩或展宽引起的与本地参考码之间相关性的减

弱；②由于信源、信宿间相对距离的变化而造成时间漂移，该时间漂移随着通信的持续会发生累积。对于第一个问题，由于本文选取正、负调频斜率的 LFM 为 Pattern 码型，它具有较好的多普勒容限，文献[9]论证了：在 LFM 信号相关性损失 3dB（半功率点）的情况下对应的多普勒系数为 $1.74/BT$ ，其中， B 为信号的带宽、 T 为信号的脉宽。本文采用的 Pattern 码参数下多普勒容限为 0.0435，本文仿真和湖试条件下产生的多普勒均不会对 Pattern 码的相关性产生很大的影响，在此不做详细讨论。下面分析第二个问题。

信源、信宿间径向运动速度为 v ，其在通信时间长度为 T_x 内的移动距离等于信源、信宿相对距离变化所产生的时间压缩量内的声程，即

$$vT_x = c(T_x - T_x') \quad (2)$$

式(2)中， $dT_x = T_x - T_x'$ 为时间压缩量，也是通信时间长度 T_x 内的时间漂移累积量。

从式(1)中可以看出，各码元信息是以相邻码元的时间差携带的，参考时基是前一码元，所以对于下一码元，式(2)中的通信时间长度为 $T_x = T_p + \tau_i$ 。只要保证在此通信时间 T_x 范围内，时间漂移累积量 dT_x 小于编码量化层 $\Delta\tau/2$ ，则不会由于时间漂移产生误码，即满足

$$dT_x = \frac{vT_x}{c} < \frac{\Delta\tau}{2} \quad (3)$$

式(3)中， c 为声速。由此可推出，当信源、信宿间径向运动速度 $v < \frac{\Delta\tau}{2T_x}c$ 时，通信系统不会由于时间漂移累积产生误码。对于差分 Pattern 时延差编码系统，式(3)中的通信时间长度的最大值为 $T_{x,max} = T_p + T_c$ ，假设 $T_p = T_c$ ，每个码元携带 n bit 信息，则 v 只要保证不大于 $\frac{c}{2^{n+2}}$ ，则不会由于信源、信宿间的相对运动而产生的时间漂移的累积导致误码。工程实际应用中，为提高通信质量，水声通信期间通信双方相对速度应低于 5m/s 较为适宜，以减小多普勒效应和本地背景干扰。

同理，在此对 PDS 算法对抗多普勒效应性能进行对比分析：

式(3)也即 PDS 算法不会产生由于时间漂移引起误码应该满足的条件，只是此时 T_x 是以同步信号出现为起始时刻的时间值，假设声速 $c = 1500\text{m/s}$ ，

信源信宿相对运动速度 $v = 2\text{m/s}$ ，同 DPDS 算法一致编码量化层 $\Delta\tau = 0.667\text{ms}$ ，代入式(3)得： $T_x < 125\text{ms}$ ，即在 PDS 算法中，在其他参数条件一致的情况下，如果不采用多普勒补偿，进行 125ms 通信后就会产生由于时间漂移引起的误码。

综上所述相比于 PDS 系统，DPDS 系统具有较强的抗多普勒效应产生的时间压缩、展宽的能力。

3.2 系统有效性与可靠性分析

从统计的角度来分析信源，对于每个码元平均码元宽度为 $T_p + T_c/2$ ，则差分 Pattern 时延差编码通信系统的通信速率为 $n/(T_p + T_c/2)$ 。同文献[4]比较（通信速率为 n/T_0 ，其中， T_0 为码元宽度），差分 Pattern 时延差编码除了具有抗相对运动产生时间漂移累积的能力外，可以得出其通信速率提高量如式(4)所示：

$$\Delta v = n/(T_p + T_c/2) - n/T_0 \quad (4)$$

假设 $T_p = T_c$ ，则通信速率约提高了 33.3%。若每个码元携带 4bit 信息，此时差分 PDS 通信速率为 266bit/s，比文献[4]中的 PDS 提高了 $\Delta v = 66\text{bit/s}$ 。

另外，本文差分 Pattern 时延差编码通信系统对信源编码产生的 4bit 二进制信息进行了格雷码变换。采用格雷码的好处在于：相邻的 2 个时延差值所代表的数字信息只有 1bit 不同。噪声或其他干扰产生时延差估计误差时，最有可能发生的是相邻时延差的判决错误，采用格雷码之后相邻时延差估计错误仅会造成一个比特的误码。把原始二进制信息码变换为格雷码，只需要从原始二进制码的最右边一位起，依次将每一位与左边一位做异或运算，最左边一位不变，这样得到的码为格雷码。反之，把格雷码变换为成二进制信息码时，从左边第二位起，依次将每位与左边一位解码后的值做异或运算，所得到的码为原始二进制信息码。假设产生的误码大部分是相邻时延差值发生的误判决引起，采用格雷码后发生的误码率与误符号波特率有如下关系^[10]：

$$P_b \approx \frac{P_s}{n} \quad (5)$$

其中， P_s 为误符号率， P_b 误比特率，为 n 为每个符号携带的比特数。假设每个符号携带 4bit 信息，则该体制的误码率大致为 1/4 误符号率。

4 仿真研究及湖试验证

通信系统信号参数如下：采样频率 48kHz；同

步信号采用带宽 4~8kHz 脉宽 40ms 的 LFM 信号；Pattern 码采用正负调频斜率的 LFM 信号（相邻的 Pattern 采用不同的 LFM 信号进行码元分割），带宽 4~8kHz 脉宽 $T_p=10\text{ms}$ ，没有固定的码元宽度，每个码元携带 4bit 信息，最小量化时延为 0.667ms；最大编码时间 $T_c=10\text{ms}$ ；保护间隔： $T_z=50\text{ms}$ 。

4.1 仿真研究

为验证差分 Pattern 时延差编码通信体制以及上述分析，本节进行了系统的仿真研究。仿真中采用的多途信道冲激响应函数如图 3 所示。

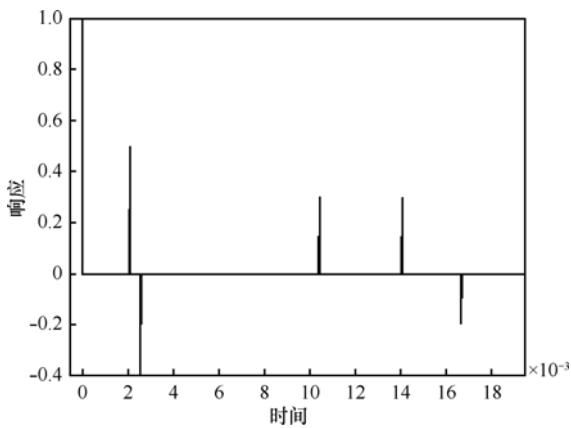


图 3 信道冲激响应

图 4 为同步码后的 2 个信息码元与本地 Pattern 码的拷贝相关波形输出结果，其中，图 4(a)为 Pattern1 相关的结果，图 4(b)为 Pattern2 相关的结果。从图中可以看出正、负调频斜率的 LFM 信号作为 2 个 Pattern，由于它们具有较弱的互相关性，不会产生相邻码元带来的码间干扰。

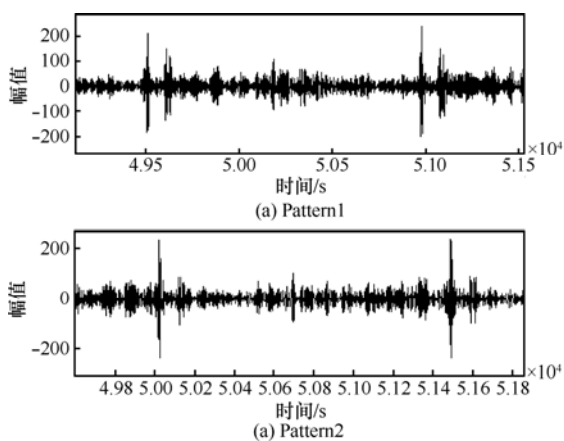


图 4 相关解码结果

表 1 给出了在相同信道、相同信噪比条件下，在不同多普勒效应存在的情况下，PDS 系统和 DPDS 系

统解码误码的统计结果对比。其中采用环境干扰是信噪比 5dB 的带限高斯白噪声。从表 1 解码结果来看，在 $\pm 5\text{m/s}$ 的范围内，在未采用任何多普勒补偿技术的情况下，本文提出的差分 Pattern 时延差编码通信系统具有较好的抗多普勒性能，验证了该体制的可行性与稳健性。而常规的 Pattern 时延差编码系统在未进行多普勒补偿时，会产生较高的误码率，这是由于 PDS 系统在多普勒效应存在时会产生时间漂移累积，会导致连续的误码出现，PDS 常规使用中均需减小帧长度或插入修正码以减小和补偿时延偏差。

表 1 不同多普勒条件下 DPDS 解码仿真结果

径向相对运动速度/(m·s ⁻¹)	多普勒系数	PDS 解码误比特率/%	DPDS 解码误比特率/%
-5	-0.003 33	21.17	0.2
-2	-0.002	17.44	0
-1	-0.000 67	7.37	0
-0.1	-0.000 07	0	0
0	0	0	0
0.1	0.000 07	0.4	0
1	0.000 67	8.55	0
2	0.001 33	18.68	0
5	0.003 33	21.87	0.525

4.2 湖试验证

为进一步验证系统的有效性，于 2010 年 9 月在莲花湖进行了湖试。莲花湖平均水深 40m，收、发节点分别位于 2 艘处于自由漂泊状态的船上。图 5 为实验当时通过声速剖面仪测量得到的声速梯度分布，水面等温层非常薄，声速呈负梯度声速分布，且负声速梯度的量级较大。

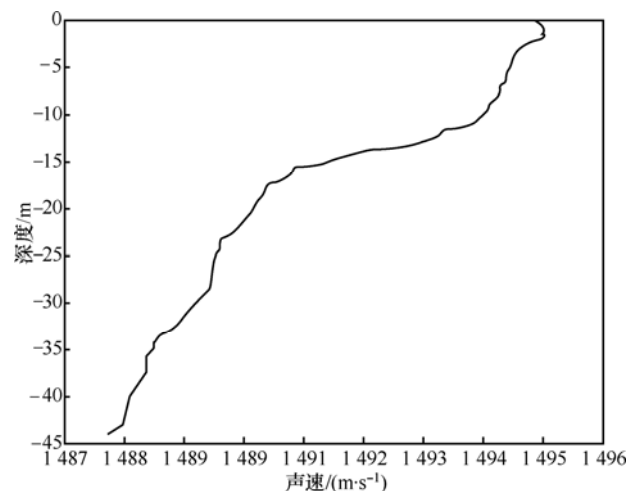


图 5 通信实验所在水域声速分布

发射换能器吊放深度为水下 2m，刚性连接在发射船上；接收水听器吊放深度为水下 7m；信源信宿相距距离为 300~3 000m，实验进行时发射船处于移动状态，存在多普勒效应。

图 6 为湖试数据中通信距离为 2 000m 时接收数据同步和相关解码的结果。实验过程中，船速有限，最大船速约为 7m/s。实际中工程应用往往为保证通信质量，水声通信期间通信双方相对速度也不宜过高。

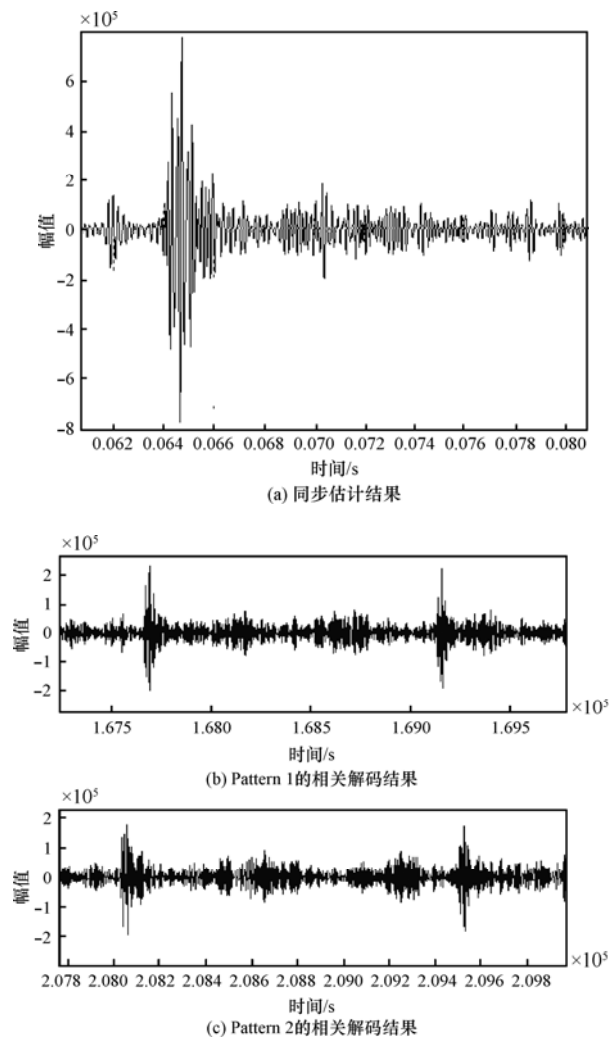


图 6 解码处理结果

表 2 实验数据处理结果统计

信源信宿起始 距离/m	CW 脉冲 频偏/Hz	实测多普勒 系数	相对速度估 计/(m·s ⁻¹)	误比特 率/%
300	-16	-0.002 7	-4	0
1 000	25	0.004 2	6.25	0
1 100	22	0.003 7	5.5	0.67
2 000	15	0.002 5	3.8	0
3 000	17	0.002 8	4.2	0.83

表 2 给出了实验数据的处理结果统计，根据式 (4)，DPDS 系统在与文献[4]相比于同参数下 PDS 系统通信速率提高了 33.3%，同时当信源、信宿存在相对运动产生多普勒效应的情况下，差分 Pattern 时延差通信系统仍具有较好的稳健性。

5 结束语

Pattern 时延差编码通信体制 (PDS) 对信道随机不均匀性有较强的抗干扰能力，选用多种 Pattern 码型可抗水声信道多途扩展产生的码间干扰，传输性能稳定。本文针对传统 Pattern 时延差通信技术的特点，提出一种以相邻码元的时间差值携带信息的差分编码方式 (DPDS)，从而克服了由于相对运动产生的时间漂移的累积，具有较好的抗多普勒的能力。同时，DPDS 由于采用了非固定码元宽度而提高通信速率约 33%。计算机仿真研究及湖试实验均验证了 DPDS 系统的有效性和稳健性。这些研究的主要目的是验证 DPDS 系统的抗多普勒能力，所以通信数据的处理未采用任何多普勒修正手段，下一步通信系统将结合多普勒测量及修正技术，有望进一步提高系统通信性能。

参考文献:

- [1] CHARALAMPOS C T, OLIVER R H, ALAN E A, *et al.* Underwater acoustic receiver employing direct-sequence spread spectrum and spatial diversity combining for shallow-water multiaccess networking[J]. *IEEE J Oceanic Eng*, 2001, 26(4): 594-603.
- [2] AL-DWEIK A, XIONG F. Frequency-hopped multiple-access communications with noncoherent M-ary OF DM-ASK[J]. *IEEE Trans on Commu*, 2003, 51(1): 33-36.
- [3] 殷敬伟. 水声通信原理及信号处理技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011. 9-10
YIN J W. The Theory and Signal Processing Technology of Underwater Acoustic Communication[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011. 9-10
- [4] YIN J W, HUI J Y, HUI J, *et al.* Underwater acoustic communication based on pattern time delay shift coding system[J]. *China Ocean Engineering*, 2006, 20(3): 499-508.
- [5] YIN J W, WANG Y L, WANG L, *et al.* Multiuser underwater acoustic communication using single-element virtual time reversal mirror[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(8): 1302-1310.
- [6] 殷敬伟, 惠俊英, 王逸林等. M 元混沌扩频多通道 Pattern 时延差编码水声通信[J]. *物理学报*, 2007, 56(10): 5915-5921.
YIN J W, HUI J Y, WANG Y L, *et al.* M-ary chaotic spread spectrum Pattern time delay shift coding scheme for multichannel underwater acoustic communication [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(10): 5915-5921.
- [7] 殷敬伟, 惠俊英, 蔡平等. 分数阶 Fourier 变换在深海远程 Pattern

时延差编码水声通信中的应用[J]. 电子学报, 2007, 35(8): 1499-1504.

YIN J W, HUI J Y, CAI P, *et al.* Application of fractional Fourier transform in long range deep-water acoustic communication[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(8): 1499-1504.

- [8] 黄载禄, 殷蔚华, 黄本雄. 通信原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 290-295.

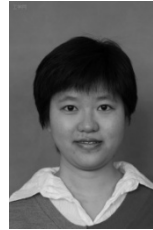
HUANG Z L, YING W H, HUANG B X. Communication Theory[M]. Beijing: Science Press, 2007. 290-295.

- [9] SHARIF B S, NEASHAM J A, OLIVER R H, *et al.* A computationally efficient Doppler compensation system for underwater acoustic communication[J]. IEEE Journal of Oceanographic Engineering Special Issue on Underwater Communication, 1999, 25(1): 52-61.

- [10] 曹志刚, 钱亚生. 现代通信原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. 233. CAO Z G, QIAN Y S. Modern Communication Theory [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. 233.



张晓 (1986-), 男, 山西榆社人, 哈尔滨工程大学博士生, 主要研究方向为水声通信技术。

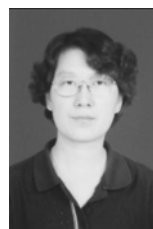


生雪莉 (1977-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 哈尔滨工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为水声目标探测与定位技术以及水声信号处理。

作者简介:



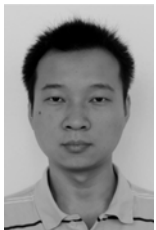
殷敬伟 (1980-), 男, 黑龙江尚志人, 博士, 西北工业大学博士后, 哈尔滨工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为水声通信和水声信号处理技术。



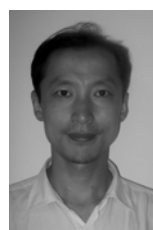
孙超 (1965-), 女, 陕西西安人, 博士, 西北工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为声呐技术和水声信号处理。

(上接第 111 页)

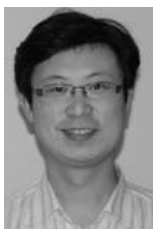
作者简介:



闫宇博 (1985-), 男, 河南西华人, 解放军理工大学博士生, 主要研究方向为无线传感器网络和认知无线电。



张磊 (1972-), 男, 山东海阳人, 博士, 解放军理工大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为嵌入式系统、普适计算和无线传感器网络。



杨盘隆 (1977-), 男, 辽宁盘锦人, 博士, 解放军理工大学副教授, 主要研究方向为无线自组织网络、无线传感器网络和认知无线电。

邱正伦 (1975-), 男, 河南信阳人, 解放军理工大学讲师, 主要研究方向为计算机网络和无线传感器网络。

洪善林 (1973-), 男, 江苏高邮人, 南京新宇房产开发有限公司工程师, 主要研究方向为智能物联网小区工程设计与管理。