矢量水听器在水声通信系统中的应用

陈 川[1,2]，王大宇[1]
(1. 哈尔滨工程大学水声技术重点实验室，哈尔滨 150001；2. 中船重工集团公司第 710 研究所，湖北宜昌 443003)

摘要：将矢量水听器应用于水声通信系统，利用矢量水听器的指向性屏蔽强干扰。建立了基于矢量水听器的多载波正交频分复用(OFDM)系统模型，对各向同性噪声场中矢量水听器的增益进行了推导，为抑制相干干扰提供了新的解决方案，并进行了仿真验证。仿真研究表明，该方案能够有效地增强系统的抗各向同性干扰的能力，达到提高信噪比的目的，降低了误码率，增加了系统的稳健性。湖上试验验证了该方法的有效性，表明基于矢量水听器的水声通信系统可为实现高速水声通信提供一种有效的途径。

关键词：水声通信；矢量水听器；多载波正交频分复用(OFDM)
中图分类号：TB567 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2012)-04-0375-06
DOI 编码：10.3969/j.issn1000-3630.2012.04.007

The application of vector hydrophone in underwater communication system

CHEN Chuan[1,2], WANG Da-yu[1]
(1. *Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory*, *Harbin Engineering University*, *Harbin* 150001, *China*;
2. *No.* 710 *Research and Development Industry Corporation*, *China Shipping Industry Corporation*, *Yichang* 443003, *Hubei*, *China*)

Abstract: Vector hydrophone is applied to the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) underwater acoustic communication system. The directivity of vector hydrophone is used to shield strong interference. Based on vector hydrophone, the system model of multi-carrier OFDM is established, and the gain of vector hydrophone in isotropic noise field is derived, which is the foundation of the new solution to inhibiting coherence interference. Simulations indicate that the method can enhance anti-isotopic-interference, improve SNR, and reduce bit error rate(BER). And, the result of a sea trial shows that the approach is efficient, and the communication system based on vector hydrophone is an effective solution to the high speed underwater acoustic communication.

Key words: underwater acoustic communication; vector hydrophone; orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)

0 引 言

电磁波和光波在水下传播衰减严重，限制了两者在水下无线通信中的应用。声信号可以在水下远距离传播，因而水声通信是水下无线通信的最佳选择。但是由于海洋环境的复杂性，使得声波在传播过程中会产生能量衰减、多途干涉和多普勒频移等现象，限制了水声通信的作用距离和传输速率。

作为 4G 备选方案之一的多载波正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术正被人们广泛关注，近年来科研工作者努力将其应用于水声通信系统中。OFDM 可以有效抗多途干扰，而且频带利用率高，这对于多途严重、频带有限的水声信道来说是极为重要的。早在上世纪 90 年代中后期，S.Coatelan 等人便设计了早期的 OFDM 水下通信系统[1-3]。Elie Bejjani 等人在 OFDM 应用于水声通信的早期进行了一系列的理论仿真研究[4-6]。2004 年 10 月，Frassati F 等在地中海(Baie of La Ciotat, FR，海深大约 80~100 m)进行了海试，结果显示在 6000 m 的通信距离时，OFDM 仍然能够很好地工作，而 DSSS 则无法进行正常通信[7]。从 2005 年开始，欧美的多个科研院所开展了大规模的基于 OFDM 的水声通信技术研究，并取得了诸多研究成果[8-12]，但是 OFDM 也并非是水声通信的完美解决方案，它自身也存在诸多缺点。由于 OFDM 信号属于宽带信号，而水声信道为一梳状滤波器，当 OFDM 的子载波落到信道子止带时，信号

收稿日期：2011-06-12；**修回日期**：2011-09-30
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51009042)
作者简介：陈川(1968－)，男，湖北荆州人，博士研究生，研究方向为水下微弱信号检测系统开发。
通讯作者：陈川，E-mail: chuanchen@163.com

衰减严重，信噪比降低，这给解调带来了困难[13,14]。

矢量水听器可以在一定程度上解决上述问题。利用矢量水听器的空间增益，可以提高系统接收信号的信噪比[3,15]。更为重要的是矢量水听器可以很好地屏蔽来自某个方向的强干扰(如舰船尾部的螺旋桨噪声)，为高速稳健的水声通信提供保障[16-18]。

1 基于矢量水听器的OFDM系统模型

OFDM的基本原理是把码元速率为R的数据流分解为N个独立的子数据流，这样每个子数据流的码元速率为R/N，利用傅里叶逆变换将这样的低比特速率符号形成的低速率多状态符号调制到N个相互正交的子载波上，子载波的相互重叠，可以提高信道的频谱利用率。OFDM的符号周期扩大为原始数据符号周期的N倍，相应地，多途时延扩展与符号周期的比值也降低为原来的$1/N$，这使OFDM可以有效地对抗多途时延扩展。循环前缀的加入，可以保证OFDM信号经过多途信道后各子载波仍然保持正交，减小载波间干扰(ICI)对系统的影响。将快速傅里叶变换(FFT)应用到OFDM的调制和解调中，使OFDM的运算量大大降低，OFDM的工程实现成为现实。

与常规的OFDM通信系统相比，基于矢量水听器的OFDM水声通信系统不但可以利用声压信息，还可利用振速信息，甚至是声压和振速两者的组合，不同的组合方式可得到不同的空间指向性。更为重要的是，矢量水听器的指向性可以电子旋转，如果使之极大值点对准信源，可抑制各向同性噪声；使之零点对准干扰方向，可以屏蔽某个方向的强干扰，这样就可提高OFDM系统的通信质量。

基于矢量水听器的OFDM水声通信系统如图1所示，系统包括方位估计模块、电子旋转模块和通信模块。方位估计模块主要是测量信源方位，利用矢量水听器可以高精度测向，这在文献[19-22]中均有阐述，这里就不再赘述。电子旋转模块根据方位估计模块测量得到的信源方位将矢量水听器空间指向性进行旋转，将指向性的极大值点对准信源，抑制各向同性噪声，或者将指向性零点对准强干扰方向，以达到屏蔽该干扰的目的。通信模块主要是实现OFDM解调的功能，此外还需要将声压和振速信息进行不同的组合，以提高接收信号的信噪比，降低系统误码率。

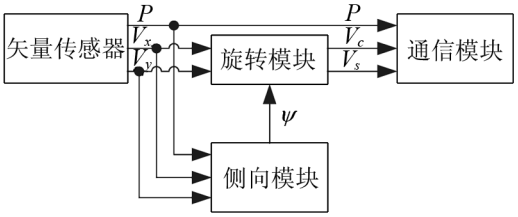


图1 基于矢量水听器的OFDM水声通信系统框图

Fig.1 Framework of the OFDM communication systems based on vector hydrophone

2 矢量水听器的空间增益

矢量水听器可以共点、同步、独立地测量声场的声压与振速信息，在远场条件下，忽略矢量水听器声压和振速通道灵敏度的差异，矢量水听器输出可以表示为如下形式：

$$\begin{cases} P(t)=x(t) \\ V_x(t)=x(t)\cos\theta \\ V_y(t)=x(t)\sin\theta \end{cases} \tag{1}$$

式(1)中：$P(t)$为矢量水听器接收到的声压信号；$x(t)$为声压波形；$V_x(t)$与$V_y(t)$分别为传感器接收到的沿x轴和y轴的振速信号，$V_x(t)$与$V_y(t)$有相互正交的偶极子指向性；θ为水平方位角，以x轴正向为零度。由于在海洋波导中，声波在垂直方向上为驻波，所以对于水声通信系统而言，只能利用声压信号P和水平振速信号V_x与V_y。

矢量水听器的偶极子指向性可以电子旋转，电子旋转后矢量水听器的组合指向性V_C和V_S为：

$$\begin{cases} V_C(t)=V_x\cos\varphi+V_y\sin\varphi=x(t)\cos(\theta-\varphi) \\ V_S(t)=-V_x\sin\varphi+V_y\cos\varphi=x(t)\sin(\theta-\varphi) \end{cases} \tag{2}$$

其中，φ为引导方位，改变φ值可以旋转组合指向性V_C和V_S。φ为V_C的极大值方向，同时也是V_S的零点方向。

基于矢量水听器的系统可以利用声压和振速的不同组合形式来获得空间增益，但是对于OFDM系统而言，子载波调制方式通常采用带宽利用率高的相位调制技术，这就限制了声压和振速的组合方式，系统只能采用声压和振速的线性组合方式，例如$P+V_C$等。

2.1 各向同性噪声场中矢量水听器的增益

在各向同性噪声场中，可以认为声压通道的噪声与水平振速通道的噪声是统计独立的，并且声压通道的噪声功率是振速通道噪声功率的3倍。假定$n_P(t)$的功率为σ_n^2，则水平振速通道的噪声功率即为$\frac{1}{3}\sigma_n^2$。当声压与振速的组合方式为$P+\alpha V_x$时，其中α为一常数，此时声压通道的信噪比可以表示为如下形式：

$$SNR_P=\frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} \tag{3}$$

其中 σ_s^2 为信号功率，而 $P+\alpha V_C$ 的信噪比为

$$SNR_{P+\alpha V}=\frac{(1+\alpha\cos\theta)^2\sigma_s^2}{\sigma_n^2+\frac{1}{3}\alpha^2\sigma_n^2}=\frac{(1+\alpha\cos\theta)^2}{(1+\frac{1}{3}\alpha^2)}*SNR_P \tag{4}$$

当 $\theta=0$ 时，即 $P+\alpha V_C$ 指向性的极大值点指向信源时，$SNR_{P+\alpha V}$ 与 SNR_P 有如下关系：

$$SNR_{P+\alpha V}=\frac{(1+\alpha)^2}{(1+\frac{1}{3}\alpha^2)}*SNR_P \tag{5}$$

通过计算可知，当 $\alpha=3$ 时，$\frac{(1+\alpha)^2}{(1+\frac{1}{3}\alpha^2)}$ 有最大值，

此时 $SNR_{P+3V}=4*SNR_P$ (6)

即 $P+3V_C$ 可以获得 6dB 的空间指向性增益。

2.2　在固定方向上存在强干扰时的增益

在水声通信中经常会遇到在某个方向存在强干扰的情况，这个强干扰可能是敌方发射破坏我方通信的干扰信号，也可能是通信系统所在舰船上的自噪声。传统的解决方法包括自适应滤波，子波变换，高阶统计量和神经网络等。虽然上述方法都可以在一定程度上抑制强干扰，但是都有各自的局限性，如自适应滤波不能同时获得信号加参考信号。

矢量水听器给我们提供了一种新的解决方法。利用矢量水听器的指向性零点来屏蔽噪声源，是一种行之有效的方法。矢量水听器在其工作频率范围内具有与频率无关的空间指向性，并且指向性的零点可以任意旋转，这为抑制相干干扰提供了新的解决方案。假定期望信号的声压为 $x_s(t)$，所在的方位为 θ_s，相干干扰的声压为 $x_n(t)$，所在方位为 θ_n，期望信号与相干干扰都是平稳的，并且统计独立。忽略矢量水听器声压和振速通道的灵敏度差异及噪声影响，矢量水听器输出可以表示为如下形式：

$$\begin{cases}P(t)=x_s(t)+x_n(t)\\ V_X(t)=x_s(t)\cos\theta_s+x_n(t)\cos\theta_n\\ V_Y(t)=x_s(t)\sin\theta_s+x_n(t)\sin\theta_n\end{cases} \tag{7}$$

组合矢量水听器两个正交的振速分量 $V_X(t)$ 和 $V_Y(t)$，得到的组合振速 $V_C(t,\varphi)$ 和 $V_S(t,\varphi)$ 为

$$\begin{cases}V_C(t,\varphi)=x_s(t)\cos(\theta_s-\varphi)+x_n(t)\cos(\theta_n-\varphi)\\ V_S(t,\varphi)=x_s(t)\sin(\theta_s-\varphi)+x_n(t)\sin(\theta_n-\varphi)\end{cases} \tag{8}$$

式(8)中 φ 为引导方位，它既是 $V_C(t,\varphi)$ 的主极大方向，也是 $V_S(t,\varphi)$ 的指向性零点方向，改变 φ 值就可以旋转 $V_C(t,\varphi)$ 与 $V_S(t,\varphi)$ 的指向性。当引导方位指向相干干扰源($\varphi=\theta_n$)时，组合振速的输出为

$$\begin{cases}V_C(t,\theta_n)=x_s(t)\cos(\theta_s-\theta_n)+x_n(t)\\ V_S(t,\theta_n)=x_s(t)\sin(\theta_s-\theta_n)\end{cases} \tag{9}$$

理想情况下，$V_S(t,\varphi)$ 中只含有期望信号 $x_s(t)$，相干干扰 $x_n(t)$ 被有效抑制。这是利用矢量水听器抑制相干干扰最为简单的方法。此外 $P(t)-V_C(t,\theta_n)$ 同样也能抑制相干干扰，其输出为

$$P(t)-V_C(t,\theta_n)=x_s(t)[1-\cos(\theta_s-\theta_n)] \tag{10}$$

3　仿真研究

为了验证基于矢量水听器的 OFDM 水声通信系统的性能，在多途信道条件下进行了仿真。系统的采样频率为 50 kHz，使用频带的起止频率分别为 2 kHz 和 8 kHz，FFT 点数为 8192，循环前缀长度为 4096 点，码元宽度为 245.76 ms，系统有 983 个有效子载波，采用 QPSK 调制，通信速率为 8 kbps。信源方位在线测得。

3.1　同性噪声干扰

利用声压与振速的不同组合方式进行解码，系统的误码率如图 2 所示。从图 2 可以看出，利用 $P+3V_C$ 进行解码的效果最好，在信噪比为 20 dB 时，声压与振速联合处理可以使系统的误码率降低近一个数量级。并且，从不同信噪比时的误码率上可以看出，相对于声压 p 而言，$P+3V_C$ 的处理增益约为 6 dB，$P+V_C$ 的处理增益约为 4.8 dB。可见，利用声压与振速联合处理进行解码的优势十分明显。

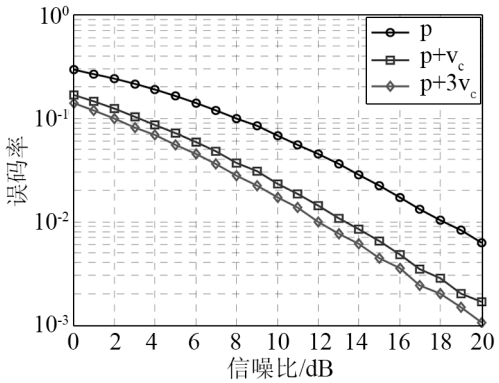


图 2　声压与振速不同组合方式的误码率

Fig.2　BER vs different combinations of sound pressure and vibration velocity

3.2　某个方向有强干扰时的仿真

在抑制相干干扰的仿真中，声压通道的信噪比 SNR=20 dB，信干比 SIR=0 dB，利用矢量水听器的指向性抑制相干干扰的系统误码率如图 3 所示。由于组合指向性 V_S 存在两个指向性零点，并且其指向

性不够尖锐，当信源所在方位处于这两个零点附近时，信源所发射的信号就如同相干干扰一样被滤除或者衰减了，通信效果自然不理想。$P–V_C$ 的指向性只存在一个指向性零点，即使相干干扰源与信源之间的开角为 180°，利用 $P–V_C$ 仍然可以正确解码。相对于 V_S 的指向性而言，$P–V_C$ 的指向性在零点附近不够陡峭，并且宽度较宽，分辨相干干扰与期望信号的能力不如组合振速 V_S。因此当相干干扰与信源之间的夹角小于 127º 时，利用 $P–V_C$ 抑制相干干扰而引起的期望信号衰减的现象比较明显。这与前面的理论分析相一致。在实际应用中可以根据信源与噪声干扰的方位，选择合适的声压振速组合方式。

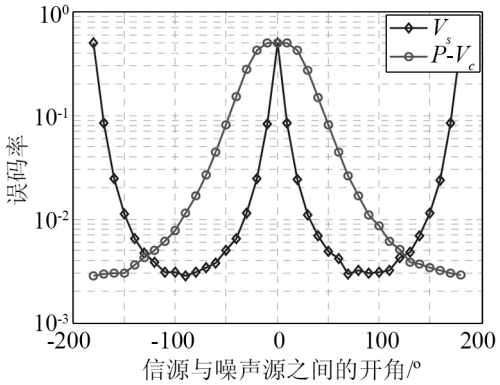


图 3 利用矢量水听器抑制相干干扰的系统误码率

Fig.3 Coherent interference suppression with combined directivity zero of acoustical vector sensor

4 湖上试验验证

为进一步验证矢量水听器应用于水声通信系统的有效性，于 2009 年 10 月在某湖进行了湖上试验。通信系统工作频带为 3.5~8 kHz，采样频率为 48 kHz，发射换能器无指向性，接收为矢量水听器和四元声压水听器阵。湖的大部分区域水深为 30~50 m，主航道附近的水深约为 60 m。

试验水域声速分布如图 4 所示。由于水面温度比较低，加之风浪的搅拌，在湖水表面形成等温层。受湖水静压力的影响，等温层中的垂直声速按正声速梯度分布，在某一深度会出现声速的极大值，而超过这个深度，水温是导致声速变化的主要因素，随着水温的降低，声速呈现负梯度变化，从而形成了典型的表面声道声速分布。考虑到声速分布情况，试验中的发射换能器与矢量水听器布放深度均在 10~15 m 之间，远离了负梯度较大的温跃层。

在抑制相干干扰的试验中，接收船需布置一噪声源，该噪声源所发射的高斯白噪声与信源所发射

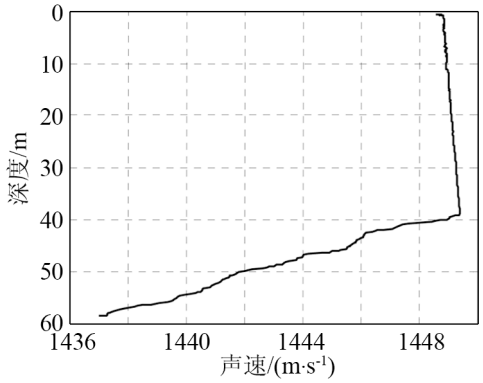


图 4 试验水域的声速分布

Fig.4 Sound-speed profile tested on lake trial

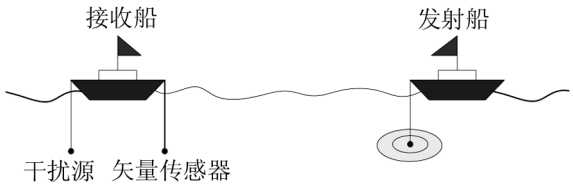


图 5 抑制相干干扰试验的布局

Fig.5 Experiment layout for coherent interference suppression

的信号在同一频段内，以此来检测矢量水听器抗相干干扰的能力。试验布局如图 5 所示。

试验中矢量水听器所接收到的信号如图 6 所示，受相干干扰的影响，声压与振速通道的信噪比降低。组合振速根据测量得到的相干干扰源方位进行旋转，使得 V_c 的主极大方向对准相干干扰源，此时组合振速的输出如图 7 所示。由于 V_s 的指向性零点对准了相干干扰源，相干干扰被抑制，可以利用 V_s 进行解码。此外，当信源与干扰源之间的开角较大时，利用 $P–V_c$ 也是能够解码的，并且效果要优于 V_s。具体结果可见表 1。

借助于矢量水听器的空间指向性能够提取出

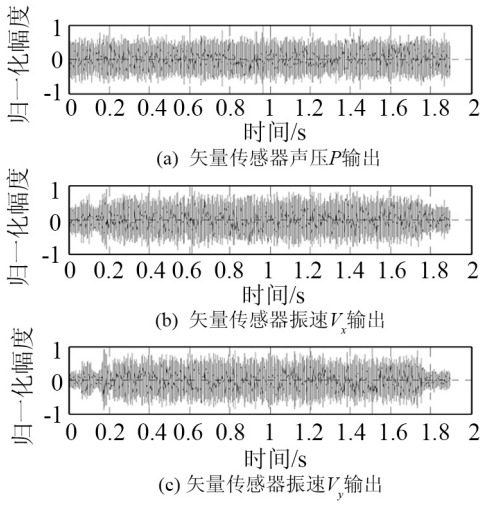


图 6 存在相干干扰时矢量水听器接收到的信号

Fig.6 Communication signals received by acoustic vector sensor with coherent interference

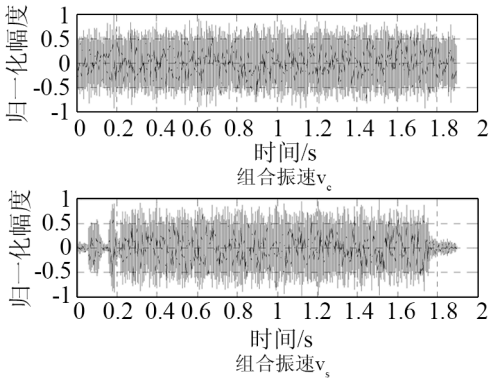


图 7　组合振速指向相干干扰时的输出

Fig.7　Received signals when combined vibration velocity is directed to coherent interference

相干干扰信号，以此作为干扰抵消器的输入，利用自适应算法可以从混合信号中分离出期望信源信号，达到抑制相干干扰的目的。试验中自适应干扰抵消器的原始输入为 $P-V_c$，参考信号为 $P+V_c$，此时 V_c 需指向目标信源。利用不同自适应算法分离出的期望信号如图 8 所示，解码的结果由表 1 给出。从试验结果来看，自适应干扰抵消的效果并没有仿真中那样理想，其主要原因是声压与振速的灵敏度补偿精度不够，以至于原始输入中包含了信源信号，从而使得自适应抵消的性能下降。从性能与复杂度这两方面看，利用 V_s 抑制相干干扰是比较可行的方案。

表 1　存在相干干扰时系统的误码率

Table 1　BER of the system with coherent interference

开角	误码率					
	P	V_s	$P-V_c$	LMS	NLMS	RLS
45.2º	0.2574	0.0490	0.1171	0.0963	0.0918	0.0902
102.6º	0.2783	0.0465	0.0587	0.0572	0.0528	0.0476
147.3º	0.2618	0.0619	0.0509	0.0585	0.0525	0.0494

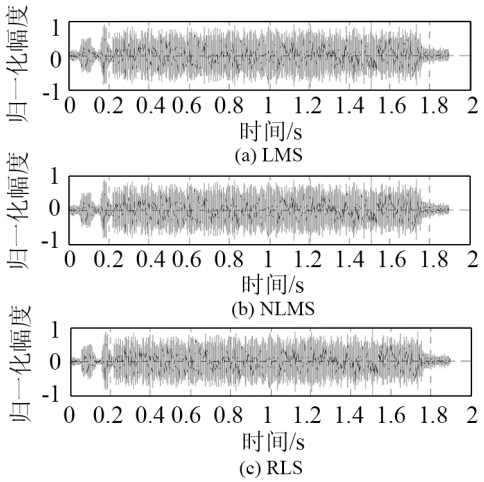


图 8　自适应干扰抵消的输出

Fig.8　Output signal after adaptive interference cancellation

5　结 论

本文将矢量水听器应用到 OFDM 水声通信系统当中，仿真分析和湖上试验表明：基于矢量水听器的 OFDM 与常规的声压水听器的 OFDM 相比，具有一定的抗各向同性干扰的能力，可以提高系统的信噪比，降低误码率，而且矢量水听器的指向性可以屏蔽强干扰，提高系统抗干扰能力，增强系统的稳健性。可以说，基于矢量水听器的 OFDM 通信系统为实现高速水声通信提供了有效的解决途径。

参 考 文 献

[1] Coatelan S, Glavieux A. Design and test of a multicarrier transmission system on the shallow water acoustic channel[C]// Proc. IEEE Oceans'94, 1994: III472-III477.

[2] Coatelan S, Glavieux A. Design and test of a coding OFDM system on the shallow water acoustic channel[C]// OCEANS '95. MTS/IEEE. Challenges of Our Changing Global Environment. Conference Proceedings. 1995: 2065-2070.

[3] Scussel K F, Rice J A, Merriam S. A new MFSK acoustic modem for operation in adverse underwater channels[C]// presented at the Oceans'97, Halifax, NS, Canada, 1997: 247-254.

[4] Bejjani E, Belfiore J C. Multicarrier coherent communication for the underwater acoustic channel[C]// Proc. IEEE. Oceans'96, 1996: 1125-1130.

[5] Lam W K, Ormondroyd R F. A novel broadband COFDM modulation scheme for robust communication over the underwater acoustic channel[C]// Proc. IEEE Oceans'98, 1998: 794-799.

[6] Kazuyoshi Miyoshi, Preliminary design of OFDM and CDMA acoustic communication system[C]// IEEE Oceans'2001, 2001: 2216-2219.

[7] Frassati F, Lafon C, Laurent P A, Passerieux J M. Experimental assessment of OFDM and DSSS modulations for use in littoral waters underwater acoustic communications[C]// Oceans 2005 - Europe, vol.2, June 2005: 826-831.

[8] Milica Stojanovic. Low Complexity OFDM Detector for Underwater Acoustic Channels[C]// Proc. MTS/IEEE Oceans, 2006: 1-6.

[9] Chitre M, Ong S H, Potter J. Performance of coded OFDM in very shallow water channels and snapping shrimp noise[C]// OCEANS' 2005. Proceedings of MTS/IEEE, Vol. 2, Sept 2005: 996-1001.

[10] LI Baosheng, ZHOU Shengli, Stojanovic M, Freitag L, Willett P. Non-uniform doppler compensation for zero-padded OFDM over fast-varying underwater acoustic channels[C]// OCEANS 2007-Europe. 2007: 1-6.

[11] LI Baosheng, ZHOU Shengli, Stojanovic M, Freitag L, Willett P. Multicarrier Communication Over Underwater Acoustic Channels With Nonuniform Doppler Shifts. Oceanic Engineering, IEEE Journal of, 2008, **33**(2): 198-209.

[12] LI Baosheng, ZHOU Shengli, Stojanovic M, Freitag L, Jie Huang, Willett P. MIMO-OFDM over an underwater acoustic channel[C]// Oceans'2007. 2007: 1-6.

[13] 徐小卡. 基于 OFDM 的浅海高速水声通信关键技术研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2010.
XU Xiaoka. The study of the key technologies for high-speed shallow water acoustic communication based on OFDM[D]. Harbin Engineering University, 2010.

[14] 李娜, 乔钢. OFDM 水声通信信道估计技术研究[J]. 现代电子技术, 2007, **23**: 56-59.
LI Na, QIAO Gang. Study on channel estimation technique of OFDM underwater acoustic communication system[J]. Modern Electronic Technique. 2007, **23**: 56-59.

[15] 惠俊英, 余赟. 多途信道中声屏蔽及声聚焦[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, **30**(3): 299-306.
HUI Junying, YU yun. Acoustic shielding and acoustic focusing[J]. Journal of Harbin Engineering University. 2009, **30**(3): 299-306.

[16] 王德俊, 惠俊英. 基于单矢量水听器弱信号值班检测系统[J]. 声学技术, 2005, **24**(1): 1-3.
WANG Dejun, HUI Junying. Feeble signal detection on watch based on single vector hydrophone[J]. Technical Acoustics, 2005, **24**(1): 1-3

[17] 姚直象. 单矢量水听器信号处理研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2005.
YAO Zhixiang. Research on Signal Processing Based on Single Vector Hydrophone[D]. Harbin Engineering University, 2005.

[18] 惠俊英, 王大宇. 声屏蔽多址接入研究[J]. 兵工学报, 2010, **31**(6): 703-709.
HUI Junying, WANG Dayu. Research on underwater multiple access based on acoustic shielding[J]. Acta Armamentarii, 2010, **31**(6): 703-709.

[19] 杨秀庭, 孙贵青. 一种改进的 WSF 算法在单矢量水听器多目标方位估计中的应用[J]. 声学技术, 2007, **26**(2): 165-168.
YANG Xiuting, SUN Guiqing, Multi-source DOA estimation using a modified WSF algorithm in a single vector hydrophone applications[J]. Technical Acoustics, 2007, **26**(2): 165-168.

[20] 孟春霞, 李秀坤. 基于遗传算法的单矢量水听器多目标方位估计[J]. 声学技术, 2007, **26**(2): 169-172.
MENG Chunxia, LI Xiukun, Direction estimation of multi-sources using a single vector transducer with genetic algorithm[J]. Technical Acoustics, 2007, **26**(2): 169-172.

[21] 王海陆, 徐晓燕. 矢量水听器阵列自适应子空间跟踪算法[J]. 声学技术, 2008, **27**(3): 3338-3341.
WANG Hailu, XU Xiaoyan, et al. Adaptive subspace tracking algorithm based on acoustic vector sensor array[J]. Technical Acoustics, 2008, **27**(3): 3338-3341.

[22] 时胜国, 杨德森. 弹性球壳声散射对矢量水听器测向影响研究[J]. 声学技术, 2008, **27**(5): 642-648.
SHI Shengguo, YANG Desen. Influences of sound scattering by elastic spherical shell on DOA estimation performance of vector hydrophone[J]. Technical Acoustics, 2008, **27**(5): 642-648.