

混响背景下基于自动删除算法的恒虚警检测器

许江湖 张明敏 胡金华
(海军工程大学电子工程学院 武汉 430033)

摘要: 该文提出了一种混响背景下基于自动删除算法的恒虚警检测器。该方法可以自动删除参考单元中的干扰点,从而可以克服 Barnard 等人(2004)提出的方法所存在的缺点。推导了该检测器的平均虚警概率和平均检测概率。最后通过对仿真数据和试验数据的处理结果验证了该检测器的优越性。

关键词: 自动删除算法; 恒虚警; 水下目标检测

中国分类号: TN911.23, U666.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)03-0639-04

A CFAR Detector Based on Automatic Censored Algorithm in the Presence of Reverberation

Xu Jiang-hu Zhang Ming-min Hu Jin-hua
(Electronics Engineering College, Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: A Constant False Alarm Rate (CFAR) detector based on automatic censored algorithm in presence of reverberation is proposed in the paper. It automatically censors the interfering points in reference cells, so the limitation of method proposed by Barnard *et al.* (2004) can be overcome. The analytic expressions of average false alarm and average detection probabilities are derived for the detector. Its superior performance is justified by processing of the simulation data and experimental data.

Key words: Automatic censored algorithm; Constant false alarm rate; Underwater target detection

1 引言

对主动声呐而言,混响是一种严重而又特殊的噪声。这主要是由于混响和目标回波具有很强的相关性。因此在检测目标回波之前,先对背景噪声进行预白化是经常采用的一个步骤。另一方面,由于混响是非平稳的,不能采用固定的检测阈值,从而有必要研究对目标回波具有恒虚警特性的检测器,该检测器的虚警概率与混响背景功率无关或其检测阈值可以根据实时估计的混响背景功率进行调整。文献[1,2]提出使用归一化匹配滤波器作为检测器,当检测的目标回波长度很长而且干扰背景是高斯分布时,归一化匹配滤波器的虚警概率和检测阈值的关系式为简单的指数函数,虚警概率只和检测阈值有关,因此在这种情况下归一化匹配滤波器具有恒虚警特性。然而,当检测的目标回波长度比较短或者背景噪声是非高斯分布时,实际的虚警概率曲线和理论的虚警概率曲线相差比较大,这时归一化匹配滤波器不再具有恒虚警特性。文献[3]研究了使用恒虚警(CFAR)技术的声呐检测方法,比较了单元平均(CA)CFAR,最大选择(GO)CFAR,最小选择(SO)CFAR以及有序统计(OS)CFAR的性能,使用这些方法的一个基本前提条件是干扰背景为高斯分布的。然而,观察发现当主动声呐在浅水区工作时,混响的统计分布将偏离高斯分布^[4],这时如果按高斯假设来确定检测阈值,而实际的混响的概率密度函数(PDF)的尾部较大时,将使虚警概率提高。因此有必要采用更为合理的混响统计模型。文献[5]提

出一种非高斯混响背景下的恒虚警检测方法,该方法采用球不变随机向量(SIRV)作为混响的统计模型,并采用广义 Pareto分布(GPD)的概率密度函数(PDF)作为SIRV的边缘功率密度,将广义似然比检验应用于匹配滤波器的输出得到了一个类似于CA-CFAR的检测器结构,本文将此检测器称为CA-CFAR-GPD。CA-CFAR-GPD存在的缺点也类似于CA-CFAR,当参考单元存在类似于目标的峰值时(本文称之为干扰点),将使检测阈值提高,从而使CA-CFAR-GPD的检测性能下降。

在雷达CFAR理论中,为了克服CA-CFAR在多目标环境中存在的性能下降的缺点,提出了一系列的解决方法。文献[6]提出了最小选择SO(Smallest Of)CFAR方法。在干扰目标位于前沿或后沿滑窗之一的多目标环境中,SO具有比较好的性能。然而,当干扰目标同时分布在前沿和后沿滑窗中时,SO的性能也将严重下降^[7]。文献[8]提出有序统计(OS)CFAR方法。文献[9]提出删除均值检测器(Censored Mean Level Detector, CMLD)。文献[7]将OS和CMLD推广提出了剔除平均(Trimmed Mean, TM)CFAR方法。当具有干扰目标数的先验知识时,这3种方法(CMLD, OS, TM)在多目标环境中具有比较好的性能。文献[10]提出一种变化性指标(Variability Index, VI)CFAR方法。VI-CFAR根据VI的值以及一个平均率假设检验可以自动在CA-, SO-, GO-(Greatest Of, 最大选择)CFAR之中转换。VI-CFAR在均匀环境中具有很小的CFAR损失,在非均匀环境中性能稳定。但是,同SO-CFAR一样,当干扰目标同时分布在前沿和后沿滑动窗中

时, VI-CFAR的性能也将下降。文献[11]提出一种自动删除均值检测器(Automatic Censored Mean Level Detector, ACMLD)。ACMLD可以自动删除参考滑窗中可能存在的干扰目标, 而且不需要关于干扰目标数的先验知识。

本文采用 ACMLD 中的自动删除算法, 提出了一种非高斯混响背景下基于自动删除算法的恒虚警检测器。该检测器可以将参考单元内的干扰点自动删除掉, 从而克服了 CA-CFAR-GPD 存在的缺点。推导出了该检测器的平均虚警概率 P_{fa} 和平均检测概率 P_d 的解析表达式。最后通过仿真数据和试验数据比较了该检测器与 CA-CFAR-GPD 的检测性能。

2 CA-CFAR-GPD 简介及性能分析

文献[5]将 SIRV 作为混响的统计模型。如果 \mathbf{x} 为一个 SIRV, 则可以表示为一个高斯随机向量 $\mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_N]^T$ 乘以一个非负的随机变量 s :

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T = s \cdot \mathbf{z} \quad (1)$$

高斯随机向量 \mathbf{z} 的均值为零, 协方差矩阵为 \mathbf{M} ; 随机变量 s 的 PDF $f_s(s)$ 称为 SIRV 的特征 PDF, 不失一般性可令 $E(s^2) = 1$, 另外假设 s 是慢变化的。 s 和 \mathbf{z} 相互独立。则 \mathbf{x} 的 PDF 为

$$f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) = \frac{1}{\pi^N |\mathbf{M}|} h_N(\mathbf{x}^H \mathbf{M}^{-1} \mathbf{x}) \quad (2)$$

这里 $|\cdot|$ 表示行列式的值, 上标 H 表示共轭转置。 $h_N(\cdot)$ 定义为:

$$h_N(u) = \int_0^\infty s^{-2N} \exp(-u/s^2) f_s(s) ds \quad (3)$$

如果令:

$$\alpha = \mathbf{x}^H \mathbf{M}^{-1} \mathbf{x}$$

则该二次型的 PDF 为:

$$f_A(\alpha) = \alpha^{N-1} \cdot h_N(\alpha) / (N-1)! \quad (4)$$

边缘功率 $\alpha_1 = |x_1|^2$ 的 PDF 为:

$$f_{A1}(\alpha) = h_1(\alpha) \quad (5)$$

文献[5]采用 GPD 的 PDF 作为 SIRV 的边缘功率密度 $f_{A1}(\alpha)$:

$$f_{A1}(\alpha) = \frac{(\beta+1) \cdot \beta^{(\beta+1)}}{(\beta+\alpha)^{(\beta+2)}} \quad (6)$$

这里 β 为形状参数。文献[5]中仿真结果显示 β 越大, GPD 的 PDF 越接近归一化的复高斯功率密度函数。另外 $h_N(u)$ 的表达式为:

$$h_N(u) = \frac{\Gamma(\beta+N+1)}{\Gamma(\beta+1)} \cdot \frac{\beta^{(\beta+1)}}{(\beta+u)^{(N+\beta+1)}} \quad (7)$$

CA-CFAR-GPD 的检测统计量为:

$$\Lambda(\mathbf{x}) = \frac{|x_m|^2}{1 + \frac{1}{\beta} \cdot \sum_{n \neq m}^N |x_n|^2} \quad (8)$$

由于 SIRV 对线性变换封闭。因此, 如果混响背景是 SIRV, 那么经过白化滤波和匹配滤波器后的输出仍然是 SIRV。从而, 式(8)可以应用于经过白化滤波再经匹配滤波器的输出。这样, 式(8)中的 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ 为匹配滤波器的输出向

量, 而 m 为要检测的匹配滤波器输出在向量中的位置。CA-CFAR-GPD 的平均虚警概率 P_{fa} 和检测阈值 T 的关系式为:

$$P_{fa} = \frac{\beta^{(N+\beta)}}{(T+\beta)^{(N+\beta)}} \quad (9)$$

β 的估计值采用最大似然估计量(MLE): 首先给定一组可能的 β 候选值 $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_M\}$, 然后选择使如下统计量为最大的候选值作为 β 的估计值:

$$\Theta(\bar{\alpha}, \beta_m) = \prod_{n=1}^N f_A(\alpha_n, \beta_m) = \prod_{n=1}^N \frac{(\beta_m+1) \cdot \beta_m^{(\beta_m+1)}}{(\beta_m+\alpha_n)^{(\beta_m+2)}} \quad (10)$$

其中

$$\bar{\alpha} = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N\} \quad (11)$$

$$\alpha_n = |x_n|^2, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

CA-CFAR-GPD 的检测过程可以描述为: 首先根据给定的虚警概率和利用式(10)得到的 β 的 MLE, 由式(9)求出检测阈值 T , 然后根据式(8)进行如下的判决:

$$|x_m|^2 \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \left(1 + \frac{1}{\beta} \cdot \sum_{n \neq m}^N |x_n|^2 \right) \cdot T \quad (13)$$

其中 H_0 表示没有目标回波, H_1 表示存在目标回波。为了和以后的名称相一致, 我们将 $|x_m|^2$ 称之为检测单元的样本, 而 $|x_n|^2$ ($n = 1, \dots, N, n \neq m$) 称之为参考单元的样本。

根据式(13), 如果参考单元中存在较强干扰点, 将使式(13)的右边的值增大, 从而使漏检率增大, 检测性能下降。

3 自动删除算法

利用文献[11]中的自动删除算法对参考单元中的干扰点进行自动删除的过程为:

首先对参考单元中的样本 $|x_n|^2$ ($n = 1, \dots, N, n \neq m$) 进行从小到大的排序:

$$|x_{(1)}|^2 \leq |x_{(2)}|^2 \leq \dots \leq |x_{(N-1)}|^2 \quad (14)$$

然后进行下面的算法:

第 1 步 将 $|x_{(1)}|^2$ 作为背景噪声功率水平的初始估计。比较 $|x_{(2)}|^2$ 和 $T_1 |x_{(1)}|^2$, 其中 T_1 是满足给定的错误删除概率 P_{FC} 的标称化因子。

(1) 如果 $|x_{(2)}|^2 < T_1 |x_{(1)}|^2$, 则判定 $|x_{(2)}|^2$ 为不包含干扰点的样本。然后进行第 2 步。

(2) 如果 $|x_{(2)}|^2 > T_1 |x_{(1)}|^2$, 则判定 $\{|x_{(2)}|^2, |x_{(3)}|^2, \dots, |x_{(N-1)}|^2\}$ 为包含干扰点的样本, 将它们删除, 并且算法停止。

第 k 步: 更新背景噪声的功率水平 $s_k = |x_{(1)}|^2 + \dots + |x_{(k)}|^2$ 。比较 $|x_{(k+1)}|^2$ 和 $T_k s_k$, 其中同样满足 P_{FC} 。

(1) 如果 $|x_{(k+1)}|^2 < T_k s_k$, 则判定 $|x_{(k+1)}|^2$ 为不包含干扰点的样本。然后进行第 $k+1$ 步。

(2) 如果 $|x_{(k+1)}|^2 > T_k s_k$, 则判定 $\{|x_{(k+1)}|^2, |x_{(k+2)}|^2, \dots, |x_{(N-1)}|^2\}$ 为包含干扰点的样本, 将它们删除, 并且算法停止。

总之, 这个删除过程是一个连续的二元假设检验, 在

第 k 步为

$$|x_{(k+1)}|^2 \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} T_k s_k \quad (15)$$

其中, 假设 H_i 代表 $\{|x_{(k+1)}|^2, |x_{(k+2)}|^2, \dots, |x_{(N-1)}|^2\}$ 为包含干扰点的样本, 假设 H_n 代表 $|x_{(k+1)}|^2$ 为不包含干扰点的样本。如果 H_i 成立或 $k = N - 1$ 时, 删除算法停止。删除过程中第 k 步的错误删除概率 P_{FC} 的解析表达式为:

$$P_{FC} = \binom{N-1}{k} \frac{1}{[1 + T_k(N-k-1)]^k} \quad (16)$$

4 基于自动删除算法的恒虚警检测方法

假设自动删除算法在第 k 步停止, 将式(13)中的 $\sum_{n=1}^N |x_n|^2$ 用 $\sum_{j=1}^k |x_{(j)}|^2$ 替代即为基于自动删除算法的恒虚警检测器(记为 AC-CFAR-GPD)的判决表达式:

$$|x_m|^2 \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \left[1 + \frac{1}{\beta} \cdot \sum_{j=1}^k |x_{(j)}|^2 \right] \cdot T \quad (17)$$

下面将利用上式进行 AC-CFAR-GPD 的平均虚警概率和平均检测概率的推导:

注意到利用式(1)有

$$\sum_{j=1}^k |x_{(j)}|^2 = s^2 \sum_{j=1}^k |z_{(j)}|^2 \quad (18)$$

这里 $z_{(j)}$ 为向量 z 中除 z_m 之外的第 j 个有序样本。而 $|x_m|^2$ 在 H_0 假设下的 PDF 可以由式(5)和式(3)得到, 因此 AC-CFAR-GPD 的平均虚警概率为

$$\begin{aligned} P_{fa} &= E_Z \left\{ \int_{\left[1 + \frac{s^2}{\beta} \sum_{j=1}^k |z_{(j)}|^2\right] T}^{\infty} s^{-2} \exp(-u/s^2) f_S(s) ds du \right\} \\ &= E_Z \left\{ \int_0^{\infty} f_S(s) \exp \left[-\frac{1 + \frac{s^2}{\beta} \sum_{j=1}^k |z_{(j)}|^2}{s^2} \cdot T \right] ds \right\} \\ &= E_Z \left\{ \exp \left[-\frac{T}{\beta} \sum_{j=1}^k |z_{(j)}|^2 \right] \cdot \int_0^{\infty} f_S(s) \exp(-T/s^2) ds \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

由于 z 为高斯随机向量, 因此式(19)的第 1 项可以参考文献[11]的结果得出:

$$E_Z \left\{ \exp \left[-\frac{T}{\beta} \sum_{j=1}^k |z_{(j)}|^2 \right] \right\} = \binom{N-1}{k} \prod_{j=1}^k \left[\frac{T}{\beta} + \frac{N-j}{k-j+1} \right] \quad (20)$$

而第 2 项的结果可以利用式(3)和式(7)得出:

$$\int_0^{\infty} f_S(s) \exp(-T/s^2) ds = h_0(T) = \frac{\beta^{\beta+1}}{(\beta+T)^{\beta+1}} \quad (21)$$

因此有

$$P_{fa} = \binom{N-1}{k} \prod_{j=1}^k \left[\frac{T}{\beta} + \frac{N-j}{k-j+1} \right] \cdot \frac{\beta^{\beta+1}}{(\beta+T)^{\beta+1}} \quad (22)$$

将式(22)中的 T 用 $T/(1+\text{SNR})$ 替代即可得到 AC-CFAR-GPD 的 P_d , 这里 SNR 表示检测单元中的信噪比。AC-CFAR-GPD 的检测过程: 首先根据给定的虚警概率, 利用式(10)得到的 β 的 MLE 以及自动删除算法得到的 k 值由式(22)求出检测阈值 T , 然后根据式(17)进行判决。表 1 是 $N = 17$, $P_{fa} = 10^{-4}$ 时检测阈值 T 的值。

5 AC-CFAR-GPD 的性能分析

本文对仿真产生的服从 GPD 的数据以及实验数据的处理结果来比较本文提出的 AC-CFAR-GPD 和文献[5]提出的 CA-CFAR-GPD 的检测性能。处理过程中有关参数设置为: $N=17$, $m=9$, $P_{FC} = P_{fa} = 10^{-4}$ 。

5.1 仿真数据处理结果

本文仿真产生 1000 组服从 GPD 的数据, 其中 GPD 的 PDF 中的参数 $\beta=8$ 。这里考虑以下几种情况来比较两种检测方法的性能: 均匀噪声背景(没有在仿真数据中加入干扰点), 弱干扰噪声背景(在仿真数据中分别加入弱干扰点), 强干扰噪声背景(在仿真数据中加入强干扰点)。干扰点的强弱标准采用文献[11]中强弱干扰目标的标准。图 1 均匀噪声背景下两种方法的检测概率曲线, 从图上可以看出两条曲线完全重合, 这是由于在均匀噪声背景中, 自动删除算法没有删除任何样本点。图 2, 图 3 分别为加入了一个弱干扰点和两个弱干扰点的弱干扰背景下两种方法的检测概率曲线, 图 4 为加入一个强干扰点的强干扰背景下的两种方法的检测概率曲线。从图 2-图 4 可以看出, 当参考单元内存在干扰点时, 将导致 CA-CFAR-GPD 的性能下降, 下降的程度和干扰点的个数以及干扰点的强度有关。

表 1 AC-CFAR-GPD 的检测阈值

β	k															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2	32.17	24.07	18.12	13.88	10.83	8.594	6.915	5.630	4.629	3.834	3.194	2.670	2.235	1.867	1.546	1.247
4	19.90	17.91	15.76	13.70	11.85	10.22	8.827	7.621	6.586	5.695	4.924	4.253	3.665	3.142	2.665	2.202
6	15.88	15.04	13.98	12.83	11.66	10.52	9.457	8.464	7.552	6.720	5.962	5.273	4.642	4.060	3.509	2.955
8	14.00	13.53	12.89	12.15	11.34	10.51	9.681	8.867	8.085	7.340	6.636	5.972	5.345	4.747	4.167	3.563
10	12.93	12.62	12.19	11.66	11.06	10.42	9.755	9.079	8.405	7.744	7.100	6.476	5.871	5.280	4.692	4.065
20	10.96	10.86	10.71	10.51	10.28	10.00	9.689	9.344	8.971	8.573	8.154	7.715	7.256	6.773	6.253	5.652

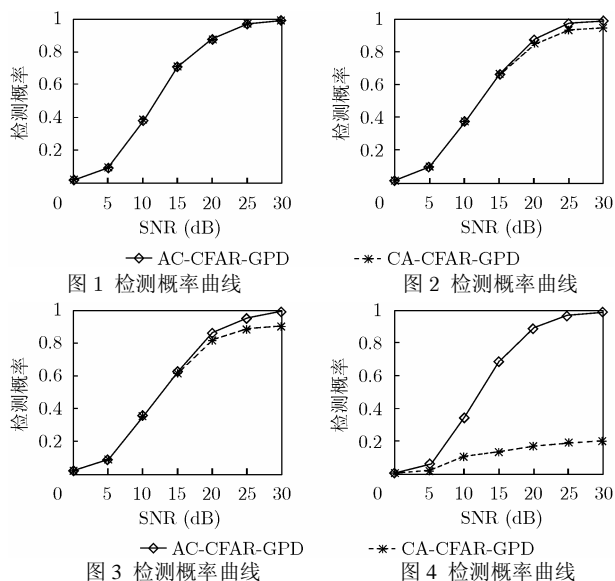


图1 检测概率曲线

图2 检测概率曲线

图3 检测概率曲线

图4 检测概率曲线

5.2 试验数据处理结果

试验在三亚某海区 75m 的水域进行, 海况三级。试验中发射信号频率为 750Hz, 脉宽 432ms。接收采用 80 基元的拖线阵, 阵元间距 1 米。目标为一艘 2000 吨的船只, 距离 10 海里。接收信号采样率为 5000Hz, 经波束形成后得到 81 个波束, 覆盖范围从 -80° 到 80° , 间隔为 2° 。本文选择有目标回波的一个波束的数据进行处理。图 5, 图 6 分别是 CA-CFAR-GPD 和 AC-CFAR-GPD 的处理结果, 图中实线表示的是匹配滤波器的输出再经平方律检波器的输出, 虚线表示的是检测门限, 而目标峰值出现在第 76 个距离单元。从图 5 可以看出, CA-CFAR-GPD 在第 76 个距离单元计算出来的检测门限高于该距离单元的输出, 因此目标不能被检测出来, 这是由于第 70 个距离单元出现了一个比较大的干扰点从而将门限值提高了。而从图 6 则可以看出, AC-CFAR-GPD 在计算出来的检测门限低于该距离单元的输出, 因此目标可以被检测出来, 其原因正如前面所分析的: AC-CFAR-GPD 中的自动删除算法将第 70 个距离单元的干扰点删除掉了, 从而该干扰点不涉及到第 76 个距离单元的检测门限的计算。

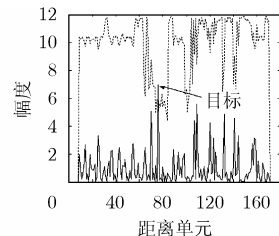
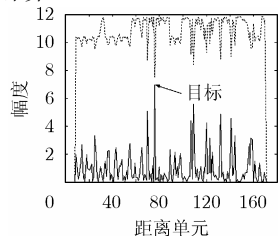


图5 CA-CFAR-GPD 处理结果

图6 AC-CFAR-GPD 处理结果

6 结束语

本文在分析文献[5]提出的非高斯混响背景下的恒虚警检测方法所存在的问题的基础上, 提出了一种非高斯混响背景下基于自动删除算法的恒虚警检测器。该检测器比较好解

决了文献[5]中的方法存在的问题。通过对仿真数据的处理结果显示在均匀背景中两种方法具有相同的性能, 而在非均匀背景中显示了本文检测器的优越性。而对实验的处理结果对此进行了进一步验证。

参考文献

- [1] Kay S and Salisbury J. Improved active sonar detection using autoregressive prewhiteners[J]. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1990, 87(4): 1603-1611.
- [2] Carmillet V, Amblard P O, and Jourdain G. Detection of phase- or frequency-modulated signals in reverberation noise[J]. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1999, 105(6): 3375-3389.
- [3] Kalyan B and Balasuriva A. Sonar based automatic target detection scheme for underwater environments using CFAR techniques: a comparative study[C]. UT '04. 2004 International Symposium on Underwater Technology, Taipei, 2004: 33-37.
- [4] Gu M and Abraham D A. Using McDaniel's model represent non-Rayleigh reverberation[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26(3): 348-357.
- [5] Barnard T J and Khan F. Statistical normalization of spherically invariant non-Gaussian clutter[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29(2): 303-309.
- [6] Trunk G V. Range resolution of targerts using automatic detectors[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*. 1978, 14(5): 750-755.
- [7] Gandhi P P and Kassam S A. Analysis of CFAR processors in nonhomogeneous background[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1988, 24(4): 427-445.
- [8] Rohling H. Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1983, 19(4): 608-621.
- [9] Rickard J T and Dillard G M. Adaptive detection algorithms for multiple target situations[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1977, 13(4): 338-343.
- [10] Smith M E and Varshney P K. Intelligent CFAR processor based on data variability[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(3): 837-847.
- [11] Himonas S D and Barkat M. Automatic censored CFAR detection for nonhomogeneous environments[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1992, 28(1): 286-304.

许江湖: 男, 1975 年生, 博士生, 主要研究方向为水声信号处理。
 张明敏: 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水声物理与水声信号处理。
 胡金华: 男, 1975 年生, 讲师, 主要研究方向为水声信号处理与声纳电子装备。