

水下目标声散射信号的时频域盲抽取

杨阳 李秀坤

Blind source extraction based on time-frequency characteristics for underwater object acoustic scattering

Yang Yang Li Xiu-Kun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 164301 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.164301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.164301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

陆架斜坡海域声场特性对常规波束形成阵增益的影响

Array gain of conventional beamformer affected by structure of acoustic field in continental slope area

物理学报.2016, 65(14): 144303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.144303>

海洋环境噪声场对称性分析及噪声消除方法

Analysis of the symmetry of the ambient noise and study of the noise reduction

物理学报.2016, 65(14): 144302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.144302>

基于矢量水听器的深海直达波区域声传播特性及其应用

Analysis of sound propagation in the direct-arrival zone in deep water with a vector sensor and its application

物理学报.2016, 65(9): 094302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094302>

基于单矢量差分能量检测器的扩频水声通信

Direct-sequence spread-spectrum underwater acoustic communication based on single vector differential energy detector

物理学报.2016, 65(4): 044302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044302>

基于时反镜能量检测法的循环移位扩频水声通信

Cyclic shift keying spread spectrum underwater acoustic communication using time reversal energy detector

物理学报.2016, 65(1): 014302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014302>

水下目标声散射信号的时频域盲抽取*

杨阳¹⁾²⁾ 李秀坤^{1)2)†}

1) (哈尔滨工程大学, 水声技术重点实验室, 哈尔滨 150001)

2) (哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨 150001)

(2016年3月15日收到; 2016年6月10日收到修改稿)

目标声散射机理及其散射特性为识别目标的物理依据. 针对水下目标声散射成分在时-频域存在相互重叠干扰, 造成目标弹性声散射特征不稳定的问题, 提出一种适合在欠定问题下分离目标声散射成分的时频域盲抽取方法. 研究声散射成分的时频特征差异, 构造目标回波单源自项的空间时频分布矩阵, 通过对其进行特征值分解抽取相应的声散射成分, 建立描述目标声散射物理特性的信号模型. 抽取出的目标各弹性波分量与以表面环绕波产生理论计算结果相符. 仿真与消声水池实验数据处理结果表明, 该算法可以分离出目标回波的各个声散射成分, 提高了分离信号的输出信噪比, 为水下目标识别提供稳定和可靠的特征.

关键词: 水下目标识别, 弹性声散射, 时频分析, 盲抽取

PACS: 43.30.+m, 43.60.+d

DOI: 10.7498/aps.65.164301

1 引言

主动声纳探测水下无源或者安静型目标, 主要通过调制在发射信号上的目标声散射回波^[1,2]进行特征提取和识别. 目标声散射主要包含几何声散射和弹性声散射两种成分. 在探测水下沉底或掩埋目标时, 海底界面产生的散射波会增加接收端的回波成分. 海底声散射与目标几何声散射分别是由海底界面和目标表面散射引起的, 二者特征相近而相混淆, 加大了对几何散射成分的判断难度. 弹性声散射携带了目标的物理结构和材质等信息, 可以作为区分不同材质目标的依据, 是水下目标声散射特性研究的关键.

水下目标声散射产生机理和特性研究是目标特征提取和识别的前提^[3,4]. 现有研究已基本掌握了简单形状水下目标弹性声散射的产生机理与信号特性. 文献^[5—8]从理论和实验上研究了充水圆柱薄壳、双层圆柱壳、加肋与周期加肋柱壳以及表面有覆盖层壳体等水下复杂目标的声散射特

性, 并分析了目标物理结构不同引起的弹性声特性差异. 弹性声散射回波是由目标结构共振引起的, 产生机理相对复杂, 由于频域能量主要集中在中高频通常也被称作中频增强回波 (mid-frequency enhancement, MFE)^[9,10]. 在目标的各种弹性声散射回波中, 对目标识别贡献较大的是由 A_0 -波沿圆柱壳表面传播形成的表面环绕波. Anderson^[9]利用魏格纳-威尔变换 (Wigner-Ville distribution, WVD) 分析了弹性球壳与形状相近礁石物体声散射的时频特性, 发射源发射极短调频脉冲信号, 当发射源与接收器几何位置接近于收发合置状态时 MFE 效应最明显. 回波波形拖尾部分出现的若干弹性回波成分是壳体目标的独有表现, 因而中频增强效应可以作为区分弹性壳体目标与形状相近礁石物体的识别特征.

为了对水下目标进行准确识别, 需要判断目标回波中声散射成分的种类和数目, 进而提取有效的识别特征. 主动声纳探测水下目标时常发射宽带长脉冲信号以获得较高的能量增益与空间分辨力, 若发射脉冲宽度大于任意两个声散射成分间的时延

* 国家自然科学基金 (批准号: 51279033) 和黑龙江省自然科学基金 (批准号: F201346) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lixiukun@hrbeu.edu.cn

差, 则声散射成分相互混叠. 时频分析方法能够给出信号能量随时间-频率变化的二维信息, 但多分量间交叉项干扰严重, 且受时频分辨力限制, 难以直接通过时频分析获得满意的结果. 由于水声信道存在随机起伏以及收发设备的随机畸变影响, 文献[11]利用分数阶傅里叶变换, 通过阶数搜索获得了几何声散射的最佳匹配. 文献[12]将线性调频信号映射成单频信号, 根据各散射成分斜率的先验知识来恢复目标的各分量信号. 时频盲分离算法[13,14]对发射信号形式没有要求, 仅利用源信号具有不同的时频谱结构, 可以直接分离出目标的声散射成分.

采用时频盲分离算法对实际水下目标声散射成分进行分离, 由于目标回波的声散射数目和环境干扰性质未知而阵元数目有限, 混合信号中源的数目可能大于阵元数, 将导致分离模型是欠定方程. 并且各声散射成分间的相互混叠会影响对目标自源项时频点的准确提取. 针对上述问题, 本文提出一种时频域盲抽取方法, 基于目标声散射成分的时频能量分布差异, 逐次地从观测信号中分离出目标的各声散射成分. 该方法首先利用图像形态学[15]去除源信号间的交叉项, 搜索能量最大亮点的自项时频点构造目标回波的空时频矩阵, 对其进行特征值分解获得相应的回波分量, 再利用紧缩处理从观测信号中剔除已抽取的信号成分, 重复此过程至各分量全部分离. 最后通过仿真分析和数据处理验证算法的有效性.

2 水下目标声散射机理、模型及时频分布

2.1 目标声散射机理与回波模型

目标声散射波是入射声波与目标相互作用产生的, 本文重点研究图1所示的内部中空球冠形圆柱体目标的声散射, 模型长210 cm, 直径53.3 cm. 对声波正横入射时的分析较常见, 这里讨论声波沿正横附近一定角度透射时的目标声散射情况. 平面波声场中螺旋表面波的激励和再辐射回波路径如图中螺旋线所示, θ 是入射射线与柱轴间夹角, 假设声波在母线 MM' 上的 A 点处以与曲面法线间夹角 α 透入柱体, 声波透入柱面后将沿螺旋线向柱体底部绕行至端面, 并在端面 B 点反射后沿螺旋线

$BCDEF$ 继续向上传播, 当其绕行至与母线 NN' 相交的 D 点时, 表面波将按入射临界角辐射到声源所在的方向上去. 在母线 NN' 上入射的声波同上过程只是方向相反. 随着绕行路径增加, 弹性散射波能量大幅下降. 无限长圆柱壳散射声压的严格解可以表示为[16]

$$p(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} i^n \varepsilon_n T_n H_n^{(1)}(k_0 r) \cos(n\theta), \quad (1)$$

式中, T_n 表示纯弹性散射项, 与边界条件满足的线性方程组解得的系数有关, $H_n^{(1)}$ 为第一类Hankel函数, $k_0 = w/c_0$ 为波数, 当 $n = 0$ 时, $\varepsilon_n = 1$, $n > 0$ 时, $\varepsilon_n = 2$. 但对于有限长壳体, 数学上不存在严格解.

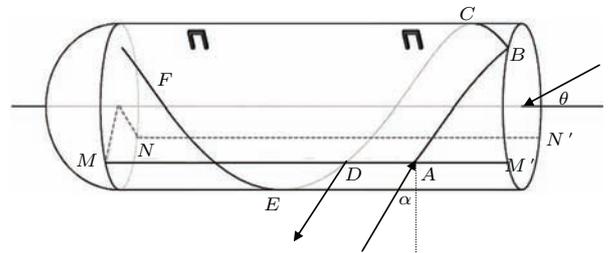


图1 目标模型及声波入射方向示意图

Fig. 1. A sketch map of the target model and the incident direction of the acoustic wave.

以目标的声散射理论为基础, 文献[17,18]给出了声波在有限长柱体表面绕行传播的路程和时延计算式. 文中估算了图1模型的回波时序, 假设声波入射角 $\theta = 125^\circ$. 几何散射波产生的可能位置主要包括球头及吊环声散射. 由几何关系得透射临界角 $\alpha \approx 25^\circ$, 钢材质中剪切波声速近似取3200 m/s, 压缩波声速近似取5900 m/s, 这里仅考虑了前三次弹性声散射. 表1是理论估算的各亮点相对第一个亮点的时延差.

表1 理论计算亮点间相对时延差

Table 1. Relative time delay of the highlights by theoretical calculations.

序号	声散射来源	计算相对延时 τ /ms
1	吊环1	0.496
2	吊环2	1.400
3	第一次弹性散射	2.150
4	第二次弹性散射	2.780
5	第三次弹性散射	3.400

工程上常把散射回波的产生点视为亮点, 目前, 比较实用的模型是汤渭霖教授提出的亮点模型^[19]. 目标回波形成亮点要满足目标为光滑凸面的条件, 即 $kL > 2\pi$, L 为目标的尺度. 亮点模型认为各个亮点声散射回波的线性叠加形成总的目标回波, 与发射信号相比回波亮点具有不同的幅度、相位和时延. 为进行有效的水下目标探测, 主动声纳常发射宽带调频信号, 以发射线性调频信号为例分析, $s(t) = A \exp(j2\pi(f_0 t + mt^2/2))$, 调频斜率 $m = (f_1 - f_0)/T$, 信号脉宽 $t = [-T/2, T/2]$, 目标声散射回波可以表示为

$$x(t) = \sum_{k=1}^N \{A_k \cos[2\pi(t - \tau_k)(f_0 + \frac{m}{2}(t - \tau_k)) + \phi_k]\} + A_e \cos[2\pi(t - \tau_e)(f_e + \frac{\mu}{2}(t - \tau_e)) + \phi_e]. \quad (2)$$

(2) 式中的两项分别代表目标回波亮点模型中的几何亮点成分和弹性亮点成分. A 为幅度反射因子, τ 为时延, f_0 为发射信号中心频率, ϕ 为产生的相位跳变, μ 为弹性亮点的调频斜率.

2.2 目标回波的时频分布

目标声散射回波 $x(t)$ 的双线性时频分布离散形式可表示为

$$W_x(t, f) = \sum_{\tau=1}^L x(t + \tau)x^*(t - \tau) e^{-j2\pi f\tau} = W_{\text{auto}}(t, f) + W_{\text{cross}}(t, f). \quad (3)$$

在信号的时频分布中, 当某一时频点上的能量由一个或多个源信号的自项产生且信号间的交叉项能量接近于零时, 称该点为自项时频点, 记作 $W_{\text{auto}}(t, f)$. 当该点的能量只由一个源信号的自项产生时, 称为单源自项时频点. 当时频点上的能量主要由信号的交叉项产生且信号的自项能量接近于零时, 那么该点为互项时频点, 记作 $W_{\text{cross}}(t, f)$. 经推导亮点成分的自项与互项时频分布分别为:

$$W_{\text{auto}}(t, f) = A^2(T - 2|t|)\text{sinc}[2\pi(f_i + mt - f) \times (T - 2|t|)], \quad (4)$$

$$W_{\text{cross}}(t, f) = 2A^2 \exp(j2\pi f\tau) \times W_{\text{auto}}(t - \tau/2, f), \quad (5)$$

其中, τ 是两个亮点分量的相对延迟, 由 (4) 式和 (5) 式可知, 单个亮点分量的 WVD 由一系列 sinc 函数

组成, 在时频平面上的图像形态表现为一条连续的斜线, 斜率与发射信号相同, f_i 是亮点的中心频率. 而亮点回波间的交叉项分布在自项成分之间, 能量是自项成分的 2 倍, 并且包含 $\exp(j2\pi f\tau)$ 项, 这使得交叉项线谱产生周期性的振荡^[20], 不再是一条连续的斜线.

这里假设任意两个源信号时频分布具有不完全重叠部分, 即每个回波声散射成分都有单源自项时频点.

3 时频域盲抽取算法

在第二节假设条件下, 首先将接收信号变换到时频域上, 利用形态学滤波去除交叉项及干扰, 提取能量最大的单源自项时频点重构观测信号的空间时频分布矩阵, 再对其进行特征值分解得到目标亮点分量, 最后通过紧缩处理剔除已抽取信号, 重复此过程至回波分量全部分离. 算法流程如图 2 所示.

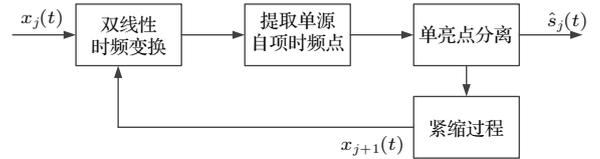


图 2 算法流程

Fig. 2. The flow diagram of the proposed algorithm.

主动声纳探测水下目标, 接收到的信号可以用矩阵形式近似表示为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (6)$$

其中, $\mathbf{x}(t)$ 为观测信号矢量 $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]^T$, $x_i(t)$, $i = 1, \dots, m$ 为第 i 个阵元的接收信号. $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)]^T$ 为源信号矢量, $\mathbf{n}(t)$ 是水下噪声干扰. $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_n]$ 是 $m \times n$ 的混合矩阵, 在 $m < n$ 的欠定混合情况下矩阵 \mathbf{A} 的逆不存在, 因此无法求解源信号 $\mathbf{s}(t)$ 的估计. 盲抽取可以只从观测信号中抽取被多个源干扰的少数感兴趣源信号, 从而使问题降阶为适定或者超定情况分析.

对阵列信号 $\mathbf{x}(t)$ 进行 WVD 时频变换, 无噪声条件下将 (2) 式代入 (3) 式, 观测信号的空时频分布矩阵表示为

$$\begin{aligned}
 D_x(t, f) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N} \sum_{\tau=1}^N \mathbf{x}(t+\tau) \mathbf{x}^*(t-\tau) e^{-j2\pi f\tau} \\
 &\approx \mathbf{A} \frac{1}{2N} \sum_{\tau=1}^N \mathbf{s}(t+\tau) \mathbf{s}^*(t-\tau) e^{-j2\pi f\tau} \mathbf{A}^H \\
 &= \mathbf{A} D_{ss}(t, f) \mathbf{A}^H, \tag{7}
 \end{aligned}$$

式中, D_{ss} 为源信号矢量的 WVD 时频分布矩阵, 其主对角线元素对应源信号的自项, 非主对角线元素对应源信号间的交叉项, $(\cdot)^H$ 为共轭转置运算, 有限长采样点数 N . 在某一自项时频点 (t_i, f_i) 上, 交叉项时频分布接近 0, D_x 可以近似表示成对角阵,

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} d_{s_1 s_1}(t_i, f_i) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & d_{s_2 s_2}(t_i, f_i) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & d_{s_m s_m}(t_i, f_i) \end{bmatrix} \mathbf{A}^H, \tag{8}$$

式中, $d_{s_m s_m}(t_i, f_i)$ 是源信号的自项时频分布, 若任意两个源信号时频分布不重叠, 自项时频点就是目标回波信号的单源自项时频点. (8) 式表明, 在单源自项时频点上对观测信号的空间时频分布矩阵进行特征值分解得到的特征向量与源信号的混合矩阵有关. 因此需要先提取目标回波的单源自项时频点.

3.1 最大能量单源自项时频点搜索

根据 2.2 节分析结果, 目标回波亮点分量与交叉项干扰表现出不同的时频形态特征, 可以利用形态学滤波剔除交叉项干扰, 通过选择合适的结构元, 腐蚀图像中小于结构元尺寸的任意图形, 但腐蚀操作会使信号自项的轮廓变细, 损失目标信息, 所以要利用膨胀操作还原物体的图像形态. 这里采用与发射信号斜率相同的倾斜直线作为结构元, 其长度为发射信号脉宽的一半. 将回波所在区域记为集合 A , 交叉项集合记为 C , 线状结构元集合为 O , 进行 (8) 式操作去除交叉项干扰得到回波的自项时频点集合 $D_{x'}$,

$$\left\{ \begin{aligned} A \odot O &= \{z | (O)_z \subseteq A\} = D_{x'} \\ C \oplus O &= \{z | (O)_z \subseteq C\} = \emptyset \end{aligned} \right\}. \tag{9}$$

再依据 $D_{x'}$ 中各亮点的时频谱能量大小不同, 搜索能量最大亮点对应的时频点如 (10) 式, 即得到单源

自项时频点集, 记作 $(t_i, f_i) \in \Omega_s$.

$$\begin{aligned} [t_i, f_i] &= \{(t_i, f_i) | t_i = \arg \max_{f_i} D_{x'}(t_i, f_i), \\ & f_i \in [f_0, f_1]\}. \end{aligned} \tag{10}$$

受计算误差与环境干扰的影响, 对观测信号进行盲源分离处理时需要观测通道数目尽可能的多, 以提高算法的分离性能, 这使得构造空间时频矩阵需要的存储量和计算量非常大. 选取 Ω_s 上的单源自项时频点构造观测数据的空间时频分布矩阵 $D_z(t, f) \in t_i, f_i \in \Omega_s$, 减少了观测数据中的信源数目, 减小了算法的存储量和计算量.

3.2 目标回波单亮点抽取

对上述空间时频分布矩阵进行特征值分解以得到相应的声散射成分, 需寻找分离矢量 \mathbf{w} , 目标回波的单亮点分量可表示为

$$y_1(t) = \mathbf{w}^T \mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^m w_i x_{1i}. \tag{11}$$

对矩阵 D_z 进行特征值分解, 可以分解成一个正交矩阵和一个对角矩阵, 为了减小数值计算误差与背景干扰对分解结果的影响, 在单源自项时频点集 Ω_s 中选择 K 个时频点联合处理,

$$C(A) = \sum_{i=1}^K D_z(t_i, f_i) = \mathbf{V}_x \Lambda_x \mathbf{V}_x^T, \tag{12}$$

其中, 特征值 $\Lambda_x = \text{diag}\{\lambda_1, \dots, \lambda_m\}$ 反映目标回波亮点信号的能量特征, 其值按能量从大到小排列 $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_m$, $\mathbf{V}_x = [v_1, \dots, v_m] \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 是与 m 个特征值对应的特征向量. 与 (7) 式对比, 最大特征值 λ_1 对应目标声散射回波中能量最大的亮点分量, 那么特征向量 v_1 即是混合矩阵中能量最大亮点对应的混合列向量 \mathbf{a}_i , 有 $\mathbf{a}_i = v_1$, $\mathbf{w} = \mathbf{a}_i^{-T}$ 成立.

3.3 紧缩过程

目标回波单亮点时频盲抽取将观测信号中能量最大的亮点成分分离出来, 为了避免已分离的亮点成分在下次抽取中被再次抽取, 需要从观测信号中剔除已经抽取的信号分量. 盲处理可以恢复源信号的时域波形, 但相对于实际源信号却存在幅度的不确定性, 因此, 从观测信号中剔除源信号时, 需要估计实际信号与分离信号的幅度差值 \tilde{w} . 从第 j

个紧缩单元中剔除已抽取信号, 得到第 $j + 1$ 个紧缩单元, 处理过程如下:

$$x_{j+1}(k) = x_j(k) - \tilde{w}_j \cdot y(k),$$

$$j = 1, 2, \dots, m - 1, \quad (13)$$

式中, \tilde{w} 的最优估值可通过 x_{j+1} 的能量代价函数最小化实现, 采用自适应局部最小均方 (LMS) 算法求解, 得到 \tilde{w} 的更新规则为

$$\tilde{w}_j(k + 1) = \tilde{w}_j(k) + \eta_j(k)y(k)x_{j+1}(k),$$

$$j = 1, 2, \dots, m - 1, \quad (14)$$

其中, $y(k)$ 是已抽取的源信号, η 是迭代步长. 逐次迭代处理直到能量代价函数值达到最小且趋于稳定, 得到 \tilde{w} 的最优估计, 即在混合信号中剔除了已抽取出的目标亮点成分.

在上述推导过程中, 实现源信号分离仅利用了源信号在时频面上具有不同的能量特征分布, 对发射信号形式没有特殊要求, 并且不需要回波结构的先验知识, 因而该方法具有较广泛的适用性.

4 算法时频分辨率分析

WVD 在时频分布方法中具有最好的能量聚集性, 但当信号包含多亮点成分时, 亮点间的交叉项会影响 WVD 的时频分辨率. 以信号包含两个亮点分量为例, 逐渐增加两亮点间的相对延时点数, 分析形态学滤波去除交叉项对 WVD 时频分辨率的影响. 采用 LFM 信号作为发射信号, 设信号的采样率为 500 kHz, 观测信号长度 1000 点. 经形态滤波处理, 能够分离出两亮点的临界延时点处的分离结果如图 3 和图 4 所示. 为了方便观察, 自项时频图被放大只显示部分点数.

分析图 3 和图 4 可以看出, 观测信号时频分布为一条亮线, 受分辨率及交叉项干扰影响, 无法观测到两个亮点成分. 当亮点间相对延时点数 $\tau = 10$ 时, 经过处理仍只能观察到一条亮线, 未能提取出两个亮点分量的自项时频点. 增加相对延时点数至 $\tau = 11$, 经形态滤波处理剔除交叉项得到了两个亮点的自项时频分布, 提高了 WVD 的时频分辨率.

用分离信号与发射信号的相似系数评价算法的分离性能, 图 5 和图 6 是两种情况下分离信号与发射信号的相似系数, 相似系数值及分离信号对应的采样点如表 2, 相对延时 $\tau = 11$ 时两个亮点分量

被成功分离, 其与发射信号的相似系数均接近 1. 自项时频点的有效选取影响盲分离的准确性.

表 2 分离信号相似系数及对应采样点

Table 2. The similarity coefficient of separated signals and the corresponding samples.

	通道 1	通道 2
	相似系数/对应采样点	相似系数/对应采样点
相对延时 点数 $\tau = 10$	0.9167/100	0.778/100, 0.554/111
相对延时 点数 $\tau = 11$	1.0/100	0.992/111

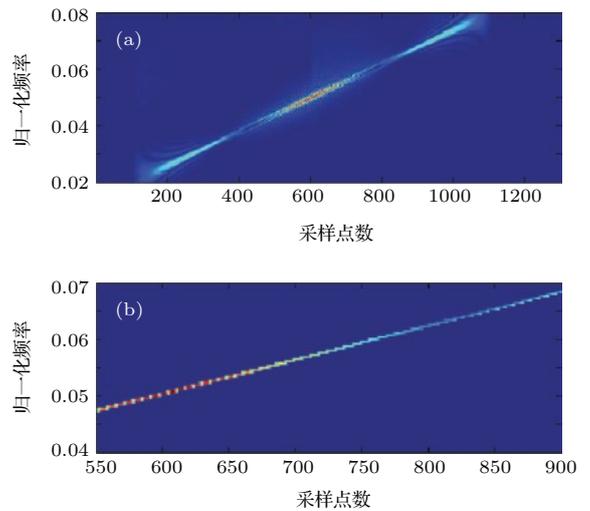


图 3 (网刊彩色) $\tau = 10$ 信号时频图 (a) 观测信号; (b) 亮点自项

Fig. 3. (color online) Signal spectrogram at $\tau = 10$: (a) Observed signal; (b) auto-terms.

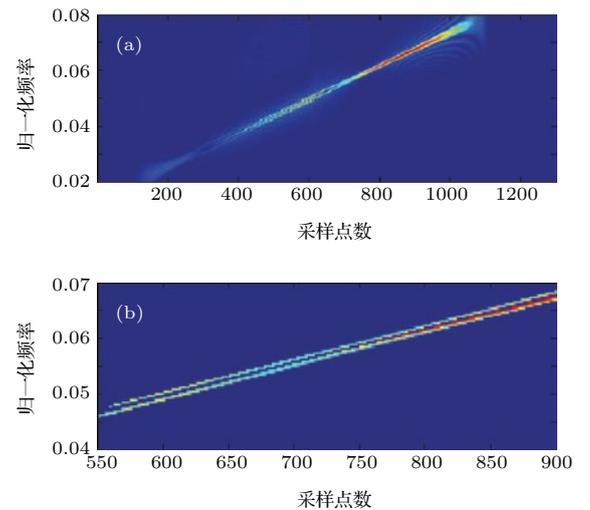


图 4 (网刊彩色) $\tau = 11$ 信号时频图 (a) 观测信号; (b) 亮点自项

Fig. 4. (color online) Signal spectrogram at $\tau = 11$: (a) Observed signal; (b) auto-terms

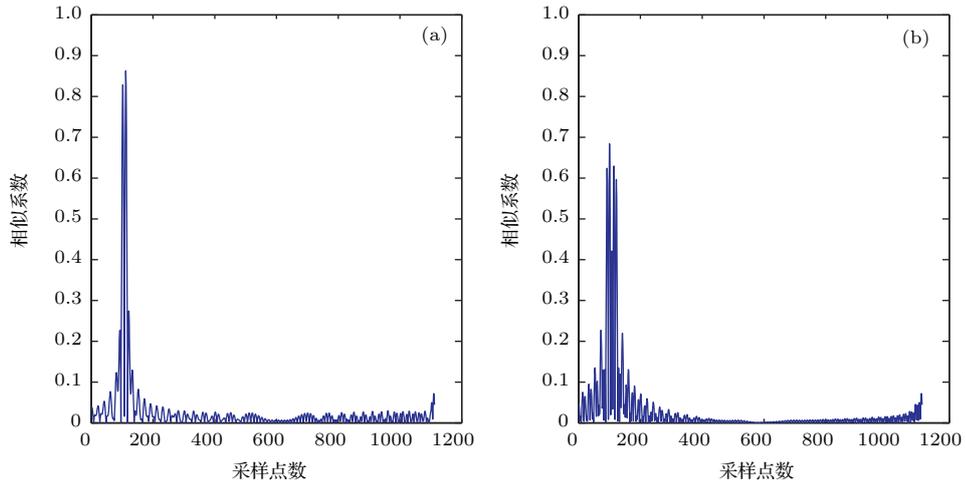


图5 $\tau = 10$ 相似系数 (a) 分离信号 1; (b) 分离信号 2

Fig. 5. Similarity coefficient at $\tau = 10$: (a) Separated signal 1; (b) separated signal 2.

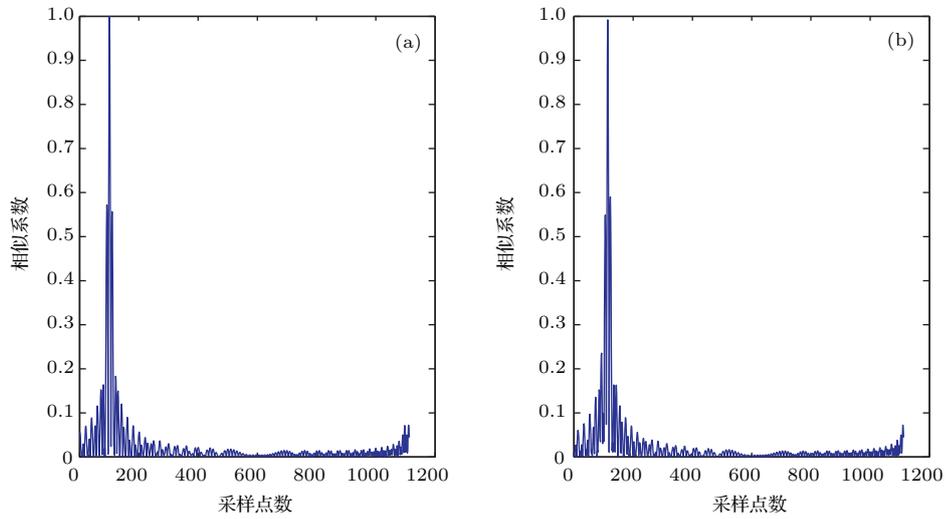


图6 $\tau = 11$ 相似系数 (a) 分离信号 1; (b) 分离信号 2

Fig. 6. Similarity coefficient at $\tau = 11$: (a) Separated signal 1; (b) separated signal 2.

5 实验数据处理

对消声水池实验数据进行分析, 水池一端为半球头圆柱目标模型, 另一端为收发合置声纳, 目标形状如图 1, 二者的布放深度相同. 目标模型悬挂在可旋转装置上, 以中心为轴匀速转动. 收发合置声纳发射线性调频脉冲, 归一化调频范围 0.02—0.08, 脉冲宽度 2 ms, 并连续采集目标旋转时的目标回波信号, 取四路观测数据进行分析. 图 7 所示为声波入射角度从 -180° 变化到 180° 时目标回波与发射信号相关性的角度-距离图, 可以看出声波以不同角度入射时, 声散射成分呈现出动态的变化.

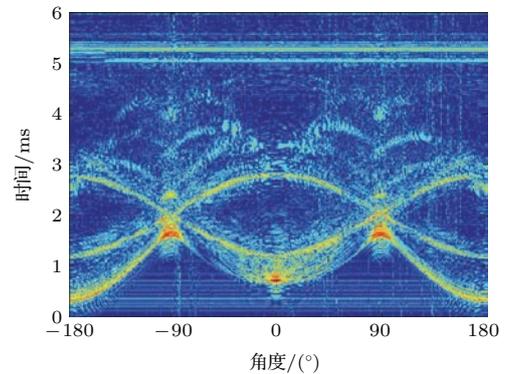


图7 (网刊彩色) 目标回波与声波入射角的角度-距离关系图

Fig. 7. (color online) The angle-distance relationship between the target echo and the incident acoustic wave.

为了与理论计算结果相比较, 选取声波入射角度为 125° 时的目标回波数据进行分析, 该段数据的时域波形、时频分布和与发射信号的相似系数分别如图 8, 图 9 和图 10 所示.

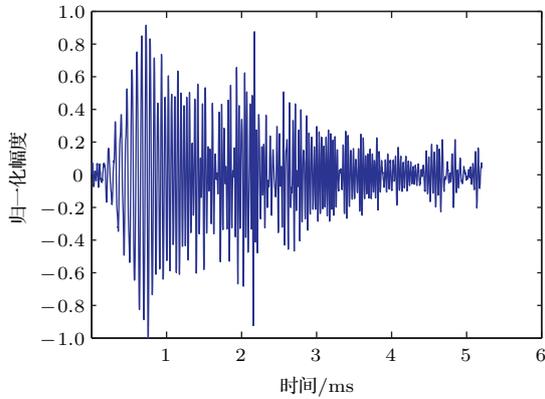


图 8 观测信号波形

Fig. 8. Observed signal waveform.

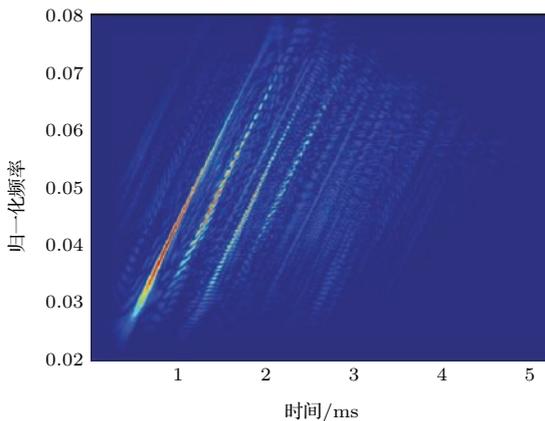


图 9 (网刊彩色) 观测信号时频分布

Fig. 9. (color online) Signal spectrogram.

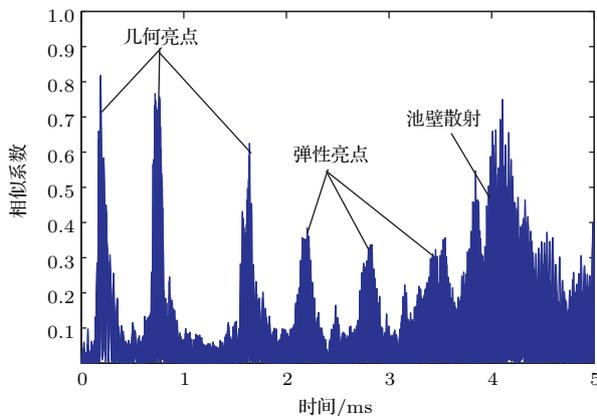


图 10 观测信号相似系数

Fig. 10. Observed signal similarity coefficient.

图 9 中存在多条谱线成分, 但由于各亮点能量有强有弱, 且存在交叉项干扰, 只能明显观察到第一根能量强的亮点连续谱线, 其他亮点谱线淹没在背景中难以辨识, 因而无法根据回波时频分布判断目标声散射成分的数目及种类, 更无法直接观察到弹性声散射的中频增强现象. 在图 10 中可以观察到七个声散射成分, 但仍无法判断散射成分的种类.

表 3 给出了实际各亮点相对第一个亮点的时延, 与表 1 比较, 理论计算与实际亮点位置基本相符. 根据理论计算可以判断各散射成分如图 10 中标示, 其中第三个弹性声散射成分与池壁散射具有较大程度的混叠. 由于相邻声散射成分的时延差小于发射信号的脉冲宽度, 因此无法从时域上分离各声散射成分.

表 3 亮点间相对时延

Table 3. Relative time delay of the highlights.

序号	1	2	3	4	5
实际相对时延/ms	0.51	1.5	2.0	2.7	3.3
与理论计算误差/ms	0.004	0.1	0.15	0.08	0.1

采用上文所述方法对目标回波声散射成分进行逐一抽取, 由第二节理论分析可知交叉项能量是自项能量的 2 倍, 若要搜索最大能量亮点的时频分布, 首先采用形态滤波去除交叉项及背景干扰, 得到目标回波的自项时频点分布如图 11 所示, 可以看到三根时频谱线, 对应能量较强的几何声散射, 而弹性亮点能量弱, 在时频图上未被观察到. 进一步提取能量最大声散射成分对应的单源自项时频点分布如图 12 所示.

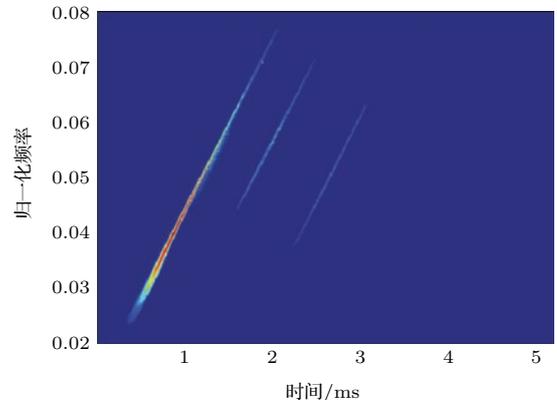


图 11 (网刊彩色) 亮点自项时频分布

Fig. 11. (color online) Auto-terms spectrogram.

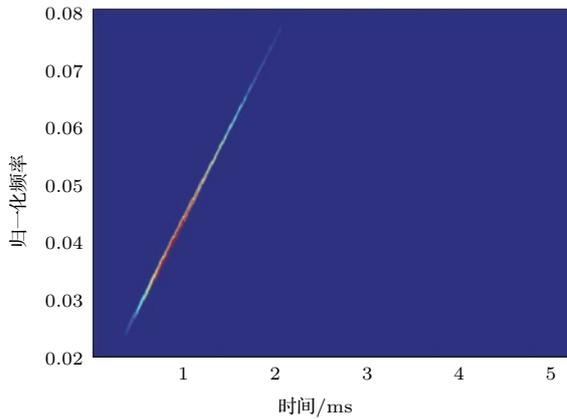


图 12 (网刊彩色) 单源自项时频分布

Fig. 12. (color online) Single auto-term spectrogram.

根据单源自项时频点重构观测数据的空间时频矩阵, 对其进行特征值分解获得能量最大亮点分量的时域波形, 为后续特征提取提供信号模型, 再采用紧缩处理从观测信号中剔除已抽取的亮点分

量得到新的观测数据. 图 13 是经一次抽取与紧缩过程得到的信号时域波形, 对应的时频分布和与发射信号的相似系数分别如图 14 和图 15 所示.

从图 14 和图 15 看出, 能量最大的亮点分量被成功地抽取出来. 经紧缩处理剔除最大的声散射成分, 在得到的新观测数据中, 能量次之的声散射成分在时频分布中被明显地观察到. 重复上述过程, 经多次抽取和紧缩处理, 得到分离出的各目标声散射成分时频分布的叠加结果如图 16 所示.

从图 16 看出, 本文方法分离出了目标回波的各个声散射成分, 提高了各分离成分的输出信噪比. 时频图中前三个亮点分量时频谱分布在发射信号频率范围内, 为几何亮点成分. 后三个亮点分量时频谱能量主要集中在中高频段, 可以观察到中频增强效应, 为弹性亮点成分, 与根据表面环绕波理论估计的声散射成分相符合, 验证了方法的有效性. 从图 16 中也看出, 分离的亮点成分中除有背景

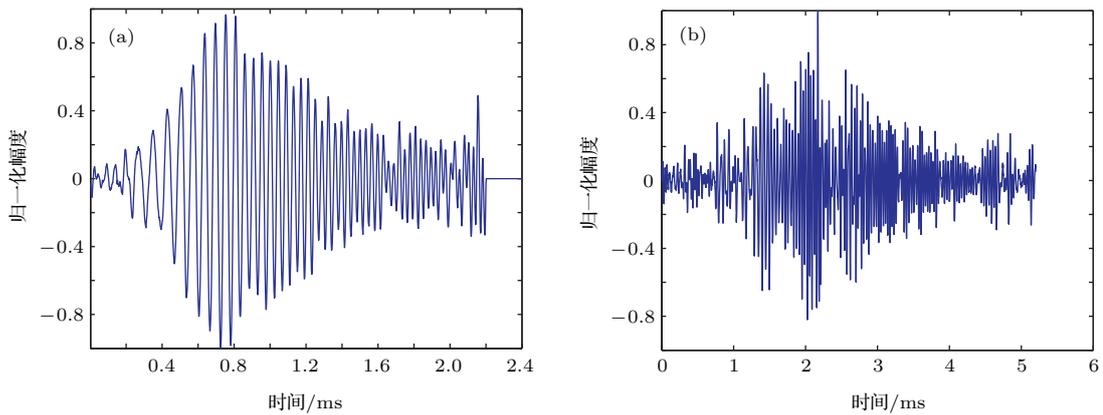


图 13 信号波形 (a) 抽取信号; (b) 紧缩后信号

Fig. 13. Signal waveform: (a) Extracted signal; (b) tightened signal.

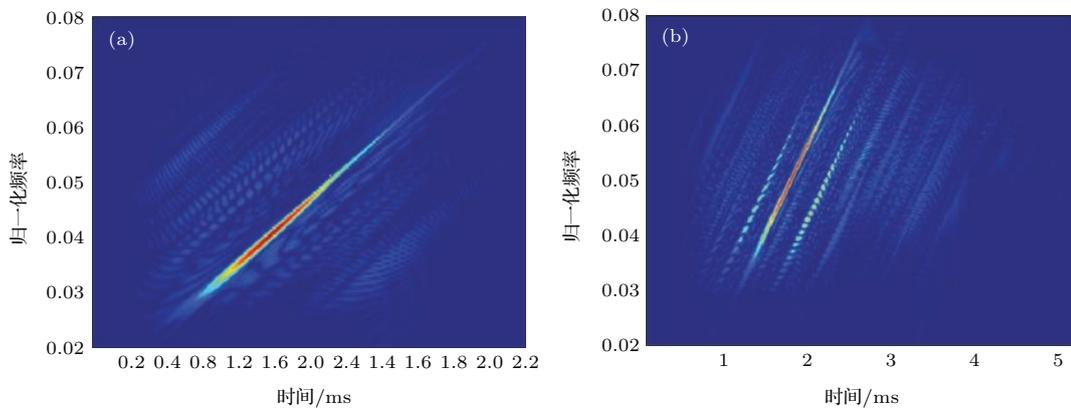


图 14 (网刊彩色) 信号时频分布 (a) 抽取信号; (b) 紧缩后信号

Fig. 14. (color online) Signal spectrogram: (a) Extracted signal; (b) tightened signal.

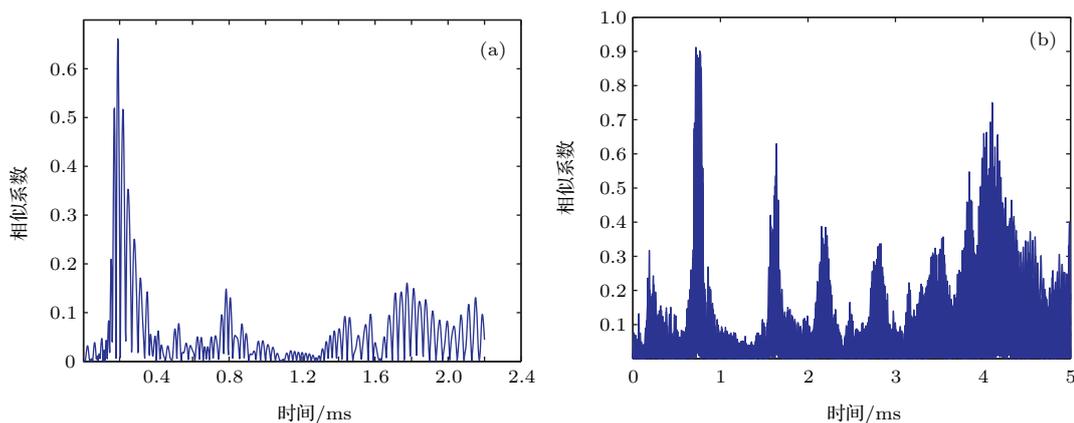


图 15 信号相似系数 (a) 抽取信号; (b) 紧缩后信号

Fig. 15. Signal similarity coefficient: (a) Extracted signal; (b) tightened signal.

干扰存在, 还有交叉项成分, 就是说分离的单源亮点成分中可能存在着相邻亮点的能量泄露. 这是因为噪声干扰的存在以及数据的非平稳性和数据截断带来的计算误差, 使得对重构的空时频矩阵进行完全对角化是不可能的, 导致分离信号中仍存在噪声干扰和其他亮点成分的能量泄露, 但从数据处理结果看并不影响对目标声散射成分的分离和判断.

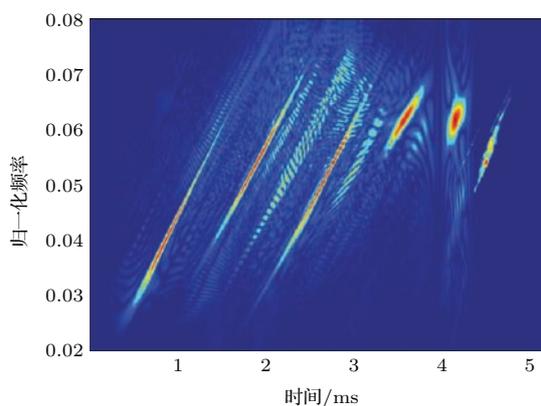


图 16 (网刊彩色) 各个亮点时频分布的叠加

Fig. 16. (color online) The sum of each highlight spectrogram.

6 结 论

目标声散射特征是水下人工目标检测和识别的重要依据, 但目标声散射成分的混叠问题严重影响对目标识别特征的提取. 本文通过理论计算和数据分析研究了半球头圆柱壳体的收发合置散射特性, 解释了目标各个声散射成分时域回波的产生机理. 根据声散射信号的时频谱分布差异, 提出一种时频域盲抽取方法, 实现了对目标回波声散射成分分离. 该算法不需要回波结构的先验信息, 可以

在欠定问题下分离出各个声散射成分的时域回波, 解决了其相互干扰造成目标弹性声散射特征不稳定的问题. 利用形态学滤波去除声散射成分间的交叉项干扰, 提高了WVD的时频分辨率和盲源分离的准确性. 抽取出的各目标弹性声散射成分与以表面波传播理论计算结果相符, 为水下目标识别提供有效的回波信号模型和稳定的识别特征.

参考文献

- [1] La Follett J R, Williams K L, Marston P L 2011 *J. Acoust. Soc. Am.* **43** 669
- [2] Williams KL, Kargl SG, Thorsos 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **127** 6
- [3] Espana A, Williams K L, Plotnick D S 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **9** 1
- [4] Bucaro J, Houston B, Saniga M, Dragonette L, Yoder T, Dey S, Kraus L, Carin L 2008 *J. Acoust. Soc. Am.* **123** 738
- [5] Fan J 2001 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai Jiaotong University) (in Chinese) [范军 2001 博士学位论文(上海: 上海交通大学)]
- [6] Pan A, Fan J, Wang B 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **134** 3452
- [7] Pan A, Fan J, Wang B, Chen Z G, Zheng G Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 214301 (in Chinese) [潘安, 范军, 王斌, 陈志刚, 郑国垠 2014 物理学报 **63** 214301]
- [8] Zheng G Y, Fan J, Tang W L 2010 *Acta Acustica* **35** 31 (in Chinese) [郑国垠, 范军, 汤渭霖 2010 声学学报 **35** 31]
- [9] Anderson S D 2012 *Ph. D. Dissertation* (Georgia Institute of Technology)
- [10] Anderson S D, Sabra K G, Zakharia M E, Sessarego J P 2012 *J. Acoust. Soc. Am.* **131** 164
- [11] Li X K, Meng X X, Xia Z 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 064302 (in Chinese) [李秀坤, 孟祥夏, 夏峙 2015 物理学报 **64** 064302]

- [12] Xia Z, Li X K 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 094302 (in Chinese) [夏峙, 李秀坤 2015 物理学报 **64** 094302]
- [13] Li F H, Zhang Y J, Zhang R H, Liu J J 2010 *Phys. Sci. China* **53** 1408
- [14] Zhu N, Wu S 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **126** 2254
- [15] Bouaynaya N, Charif-Chefchaoui M, Schonfeld D 2008 *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **30** 5
- [16] Tang W L, Fan J 2004 *Acta Acustica* **29** 5 (in Chinese) [汤渭霖, 范军 2004 声学学报 **29** 5]
- [17] Tesei A, Fawcett J A, Lim R 2008 *Appl. Acoust.* **69** 422
- [18] Touraine N, Haumesser L, De'cultot D, Maze G 2000 *J. Acoustic Soc. Am.* **108** 5
- [19] Tang W L 1994 *Acta Acustica* **19** 92 (in Chinese) [汤渭霖 1994 声学学报 **19** 92]
- [20] Thomas M, Lethakumary B, Jacob R 2012 *ICCEET* p717

Blind source extraction based on time-frequency characteristics for underwater object acoustic scattering*

Yang Yang¹⁾²⁾ Li Xiu-Kun^{1)2)†}

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

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

(Received 15 March 2016; revised manuscript received 10 June 2016)

Abstract

The physical mechanism and signal characteristics of acoustic scattering are the vital basis for target recognition. But underwater target acoustic scattering components are aliasing in time-frequency (TF) domain, for which the target elastic acoustic scattering characteristics are difficult to detect. Additionally, the existing blind source separation methods are effective only on condition that the number of array elements is equal to or greater than the number of the source signals. To address these problems, a novel TF domain blind source extraction method of separating target acoustic scattering components is proposed in this paper. The method only uses the TF energy characteristic differences among the target acoustic scattering components, and special limitations on target echo structures are unnecessary. Image morphology filter is used to remove the cross-term interference from time-frequency distribution (TFD) of the received array signals. Then, the single source which shows maximum energy concentration at the corresponding auto-term TF points is extracted through three operations: i) selecting the single source auto-term TF points from the auto-term ones; ii) constructing the spatial TFD matrix according to the selected single source auto-term TF points; iii) obtaining the single source by decomposing the eigenvalue of their spatial TFD matrix. Finally, the extracted single signal is excluded by the tightening process from the received array signals, and each single signal is separated successively by repeating the above steps. In addition, a signal processing model which can describe the physical characteristics of the target echoes is established based on the separated signal components. Simulations illustrate that the image morphological filter can remove the cross-term interference and improve the TF resolution of the Wigner-Ville distribution. Anechoic pool experimental results show that the TF domain blind source extraction algorithm can well separate each target acoustic scattering component, it can also achieve a higher output signal-to-noise ratio. Furthermore, the separated elastic acoustic scattering components are in good agreement with the results computed by the surface wave generating theory, so the method can provide the robust and reliable feature for underwater target recognition.

Keywords: underwater object target recognition, elastic acoustic scattering, time-frequency analysis, blind source extraction

PACS: 43.30.+m, 43.60.+d

DOI: 10.7498/aps.65.164301

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51279033) and the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, China (Grant No. F201346).

† Corresponding author. E-mail: lixikun@hrbeu.edu.cn