

水中目标回波亮点统计特征研究*

陈云飞^{1)2)†} 李桂娟²⁾ 王振山²⁾ 张明伟²⁾ 贾兵²⁾

1) (大连理工大学船舶工程学院, 大连 116024)

2) (水下测控技术重点实验室, 大连 116013)

(2012年6月29日收到; 2012年11月3日收到修改稿)

礁石和海洋动物引起的混响是主动声纳最严重的干扰, 如何区分礁石、鱼群和水中目标一直是制约主动声纳识别技术的难点问题. 针对礁石与目标回波难以区分的问题, 从特征识别的应用角度, 研究水中复杂目标全方位回波亮点特征的有效表征和应用方式, 基于目标回波亮点模型, 提出拷贝相关器输出的目标散射函数估计方法, 给出对目标回波亮点相对关系进行定量分析的目标回波特征统计表征方式, 并基于湖上实验提取了物理机理明确的目标回波亮点统计特征, 使得目标时间-角度谱中所蕴含的目标特征信息能够很直接地转化为主动声纳易于应用的目标特征.

关键词: 水中目标, 回波亮点, 统计特征

PACS: 43.30.+m, 43.40.Ey, 43.60.Lq

DOI: 10.7498/aps.62.084302

1 引言

目标回波是主动声纳对水中目标探测、识别的主要信息源, 而目标回波亮点特征则是目标特征信息的体现形式之一, 对目标回波亮点所表征的目标信息的利用程度影响主动声纳对水中目标的识别性能. 主动声纳工作过程中, 礁石和海洋动物引起的混响是最严重的干扰. 礁石和海洋动物的回波, 不仅信号的频率与目标回波频率相同, 而且也存在亮点特性. 因此, 如何区分礁石、鱼群和水中目标一直是制约主动声纳识别技术的难点问题. 从声纳目标识别的角度来说, 希望能够利用稳健性好、区分度明显的特征实现对水中目标、礁石和鱼群目标的区分. 理论和实测研究已经表明, 水中复杂目标是一个多亮点目标, 并且复杂目标的亮点特征是随方位角变化的, 同时礁石和鱼群也具有亮点特性, 这导致在实际的声纳目标识别中难以获取一个稳定的用于不同种类目标区分的特征.

目前对于水中复杂目标回声亮点特性的研究

主要分为三个大的方面: 水中目标回声亮点特性理论和预报研究^[1-4], 从机理上揭示目标回波亮点特性与目标物理属性之间的关系; 缩比模型和实尺度目标的测试研究^[5-8], 一方面对理论研究结果进行验证, 另一方面也通过实测分析, 发现了理论研究尚未能预报的现象; 基于理论和实验研究的结果, 研究目标回波亮点特性的模拟和特征利用^[9-12]. 综合目前已有的研究, 理论和实测研究已经能够获取复杂目标随方位角变化的回波亮点特征, 并且相关研究也表明海豚能够利用回波亮点的幅度和位置关系进行不同目标定位^[13,14], 但由于水中复杂目标回波亮点特征的舷角变化特性, 目标回波亮点特征(目标回波亮点的数量、目标回波亮点的强度分布、目标回波亮点的间隔)难以直接被主动声纳识别所利用, 导致特征研究与实际应用转化之间的困难.

本文主要从主动声纳识别的应用角度, 研究水中目标(主要针对 Benchmark 潜艇模型)的回波亮点特征的定量表征方式, 提取了标准潜艇目标亮点统计特征, 并与礁石目标进行对比.

* 水下测控技术重点实验室基金(批准号: 9140C260206100C26)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: dlinstitute@vip.163.com

2 目标回波亮点统计特征理论模型

通常用亮点个数、亮点空间分布、亮点的强度分布来表征水中复杂目标的回波亮点特征, 由于水中复杂目标回波亮点特征是目标舷角的函数, 因此单纯使用上述三个参量很难满足识别的要求. 本文基于水中复杂目标回波亮点模型, 提出并研究了一种目标亮点统计特征的分析方法, 并对国际上广泛研究的标准潜艇目标回波亮点特征进行统计分析, 定量提取随方位变化的亮点统计特征, 为主动声纳目标识别提供易于应用的水中复杂目标回波特征集.

图 1 为本文定义的复杂目标回波亮点统计特征提取的信号处理流程. 图中 θ 为目标的舷角, n 为亮点个数, r 为亮点间的位置关系系数, v 为亮点间的强度系数, l 为亮点集中度. 由目标全方位回波特性和目标回波亮点模型, 重点讨论不同舷角情况下的目标回波亮点定量个数、亮点间的定量位置关系、亮点间的定量强度分布特性, 通过定量的方式进行目标回波亮点的特征描述, 并通过对标准潜

艇模型实测数据的分析处理, 建立标准潜艇定量回波亮点统计特征模型.

2.1 基于亮点模型的目标散射函数估计

图 2 为复杂体目标的回波亮点示意图, 以目标几何中心点为坐标原点, 以目标艏舰方向作为 x 轴, 以目标垂直方向作为 y 轴. 目标的多亮点模型^[1,5] 可表示为反向回波的冲击响应函数 (或称为目标散射函数) 与入射声波的卷积, 其中目标的冲击响应函数 $h(\tau, \theta)$ 为

$$h(\tau, \theta) = \sum_{i=1}^N a_i(\theta, \tau_i) \delta(t - \tau_i), \quad (1)$$

其中 $\delta(x)$ 为 Dirac 函数, $a_i(\theta, \tau_i)$ 是亮点强度, θ 为入射舷角, 正横入射时 $\theta = 90^\circ$, 艏方向入射时 $\theta = 0^\circ$, τ_i 为亮点时间间隔, N 为亮点总数.

由 (1) 式, 接收阵接收到的目标回波信号 $y_0(t, \theta)$ 可表示为

$$y_0(t, \theta) = \sum_{i=1}^N a_i(\theta, \tau_i) x(t - \tau_i) + x_b(t) + n(t), \quad (2)$$

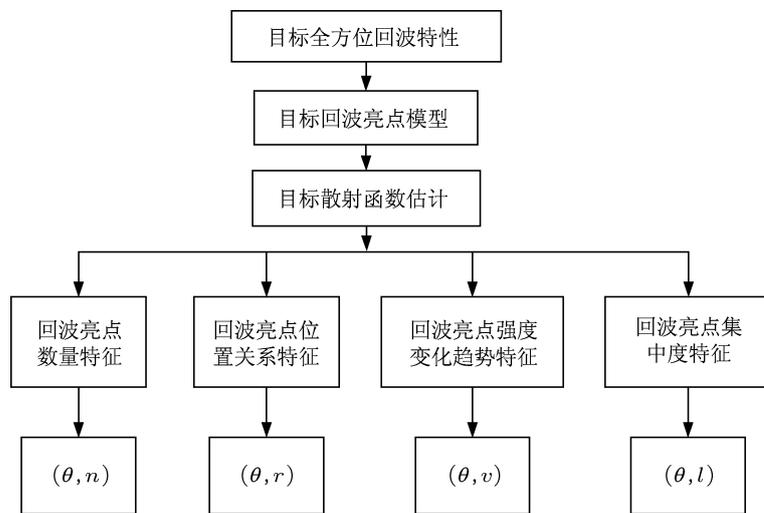


图 1 水中目标亮点统计特征分析框架

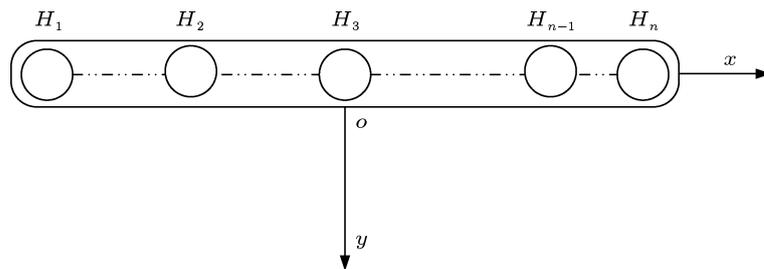


图 2 复杂体目标回波亮点示意图

其中 $x(t)$ 为发射信号, 上式右边第一项为多亮点回波, $x_b(t)$ 为回波亮点背景, $n(t)$ 为干扰噪声背景. (2) 式为水中复杂目标的回波亮点模型, 对于海中的其他尺度目标, 上式也是成立的. 因此, 海洋中的礁石和大型海洋动物的回波也将表现出亮点特性, 这也是主动声纳很难区分水中人造目标和其他目标的原因. 目标散射函数包含了目标的特征属性, 不同目标的散射函数具体参数表征了目标的固有特征.

一个实际目标的散射函数包括多亮点冲击响应函数和散射背景, 散射背景由目标的棱、角、排水孔和肋板等细碎亮点集构成. 由此, (1) 式改写为目标的散射函数 B . 具体为

$$B = \sum_{i=1}^N a_i(\theta, \tau_i) \delta(\tau_i) + b(\theta, \tau), \quad (3)$$

其中 τ_i 为离散的时延序列, τ 为时延差, $b(\theta, \tau)$ 为散射背景项. 若入射信号为 $s(t)$, 则不含干扰的目标回波 $y_1(t)$ 为

$$y_1(t, \theta) = s(t) * B(\theta, \tau), \quad (4)$$

其中 $*$ 表示卷积运算. 而对于接收阵接收到的目标回波信号的拷贝相关器输出 $w(t)$ 为

$$w(t) = y_0(t, \theta) * s^*(t) = y_1(t, \theta) * s^*(t) + n(t) * s^*(t). \quad (5)$$

若 $s(t)$ 为宽带信号, 则 $\overline{s(t)s^*(t)} \approx \delta(\tau)$, 代入 (5) 式有:

$$\begin{aligned} w(t) &= y_1(t, \theta) * s^*(t) + n(t) * s^*(t) \\ &= s(t) * s^*(t) * B(\theta, \tau) + n(t) * s^*(t) \\ &\approx B(\theta, \tau) * \delta(\tau) + n(t) * s^*(t) \\ &= B(\theta, \tau) + n(t) * s^*(t) \\ &= \sum_{i=1}^N a_i(\theta, \tau_i) + b(\theta, \tau) + n(t) * s^*(t), \quad (6) \end{aligned}$$

上式中 $n(t) * s^*(t)$ 为拷贝相关器输出的干扰噪声背景, 主动声纳的干扰主要由混响干扰和环境噪声干扰两部分组成, 其中在近距离主要是混响干扰起主要影响, 在中远距离环境噪声的影响显著增强, 在本文主要考虑环境噪声的影响. 因此若干扰噪声 $n(t)$ 与信号 $s(t)$ 互相关独立, 则该项较小, 通常可以忽略. (6) 式则可表示为

$$w(t) \approx B(\theta, \tau) = \sum_{i=1}^N a_i(\theta, \tau_i) + b(\theta, \tau), \quad (7)$$

(7) 式表明可以通过对目标回波的拷贝相关器输出对目标散射函数进行估计.

2.2 目标散射函数统计特征

从 (7) 式可以看出, 确定目标散射函数主要有三个参数, 分别为亮点个数 N , 亮点幅度系数 $a_i(\theta)$ 和亮点间距 τ_i , 基于目标散射函数的估计, 本文定义了水中复杂目标回波亮点统计特征:

- 1) 亮点个数 $n(\theta)$;
- 2) 亮点间的位置关系系数

$$r(\theta) = \frac{\tau_n(\theta)}{\tau_{\text{last}} - \tau_{\text{first}}};$$

- 3) 亮点间的强度系数

$$v(\theta) = \frac{a_n(\theta)}{a_{\text{max}}(\theta)};$$

- 4) 亮点集中度

$$l(\theta) = -10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^n B(\theta, \tau) (\tau - \tau_i)^2 \right).$$

通过对复杂目标全方位 (0° — 180°) 下目标散射函数的四个主要特征参数进行统计分析, 建立不同方位角条件下的复杂目标回波亮点特征样本集. 水中复杂体目标与礁石回波特性的最大区别就在于目标亮点统计特征值的不同, 即通过多维的定量特征对水中目标和礁石等目标进行区分. 按照上述定义, 基于模型实验对标准潜艇模型目标回波亮点统计特征进行提取.

3 实验测试

Benchmark 模型^[15]与礁石的回波特性测试试验在中船重工 726 研究所德清县对河口水库实验站完成, 实验区水域开阔水深 24 m 左右, 实验区如图 3 所示. 图 4 为 Benchmark 潜艇模型照片, 该模型长 3 m, 按照 1:20 的缩比尺度制作, 材料为不锈钢. 测试实验的发射信号为 40—80 kHz 宽带线性



图 3 实验水域



图4 标准潜艇缩比模型照片

调频信号, 脉冲宽度为 2 ms. 被测目标模型从艇艏开始旋转 180°, 数据采集采用连续记录的方式.

式. 实验布置如图 5 所示, 模型通过两根直径为 7 mm 的软绳悬挂在模型转台上, 通过转台的转动改变潜艇模型的舷角, 收发合置换能器布放在距目标 10.5 m 位置, 二者布放深度为 3 m, 满足远场要求, 发射波束中心对准模型位置固定不动. 图 6 为发射换能器的发送电压响应, 可以看出换能器在工作频段范围内, 频响曲线相对平坦, 适合于发射宽带线性调频信号. 发射换能器的水平指向性开角和垂直指向性开角分别为 20° 和 10°, 能够较好地抑制混响的干扰.

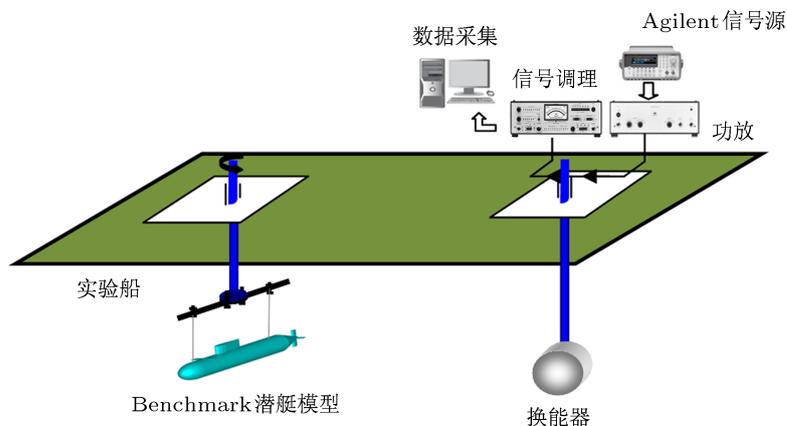


图5 实验设备布置示意图

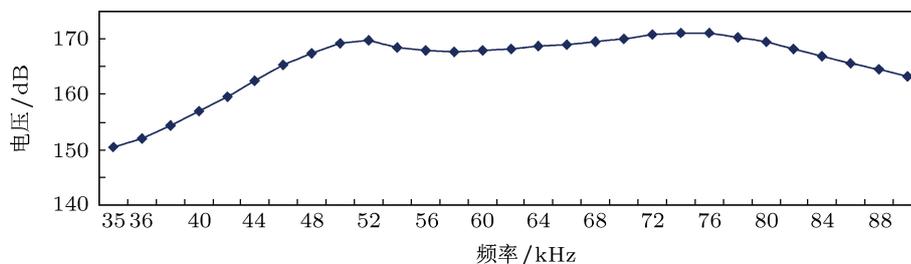


图6 发射换能器的发送电压响应

4 标准潜艇缩比模型亮点统计特征提取

基于本文研究的目标亮点统计特征理论模型, 对 Benchmark 模型的实测数据进行分析处理. 由于被测目标为连续旋转, 数据采集采用连续记录的方式, 为了能够将目标舷角与相应测试数据对应, 在数据处理中实际数据的选取是根据旋转角度与采集数据的时间长度的对应关系进行截取. 图 7 为目标亮点统计特征提取信号处理流程, 具体为:

- 1) 截取目标各舷角对应的回波数据, 对回波数据进行拷贝相关处理, 输出相应舷角的目标散射函数估计;
- 2) 对输出的散射函数估计进行归一化和低通滤波;
- 3) 结合亮点阈值分析进行目标回波亮点判别;
- 4) 根据实验的声场配置情况和目标二维散射函数图, 对由外部干扰信号造成的伪亮点进行去除;
- 5) 对亮点个数、位置关系和强度分布特征进行提取.

4.1 目标二维散射函数图

对所有舷角的回波数据进行拷贝相关处理, 可得到如图 8 所示的标准潜艇模型目标二维散射函数图, 其中图 8(a) 为试验测得的标准潜艇模型二维散射函数图, 图 8(b) 为理论计算的标准潜艇模型二维散射函数图. 理论计算与实验结果符合较好, 图中艏艉方向细碎亮点背景及离散亮点散布的尺度大, 正横方向上的亮点强度高, 亮点数少, 亮点背景弱.

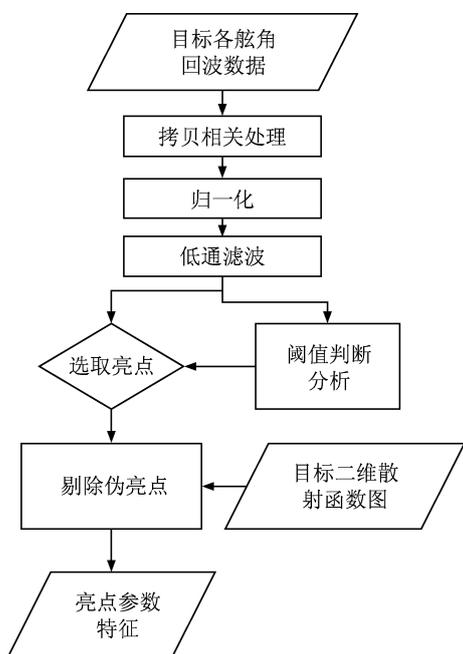


图 7 亮点统计特征提取流程图

从图 8 可以看出, 随着舷角的变化, 目标回波亮点的个数和强弱显著变化, 单一角度下的目标回波特征难以表征目标回波的全面特征. 由潜艇目标回波亮点形成机理可以知道潜艇目标回波亮点分为固定亮点和移动亮点两种, 由艇艏、艇艉和指挥台反射区构成的固定亮点, 对应艇体上的固定位置, 艇体表面的镜反射区构成的移动亮点, 移动亮点和固定亮点强度均随舷角变化, 从而体现了定量的数值变化. 在稳态情况下, 目标亮点统计特征是固定的, 体现了潜艇复杂体目标的固有属性, 因此可以通过实测的方法定量的确定目标亮点的统计特征.

4.2 目标散射函数 $B(\theta, \tau)$ 的估计

图 9—15 为不同舷角的回波进行相关处理和低通滤波后得到的标准潜艇缩比模型目标散射函数估计. 通过对比, 可以看出不同舷角情况下的目标散射函数显著不同, 按照目标回波亮点的统计特征模型对不同舷角情况下的亮点参数进行统计分析.

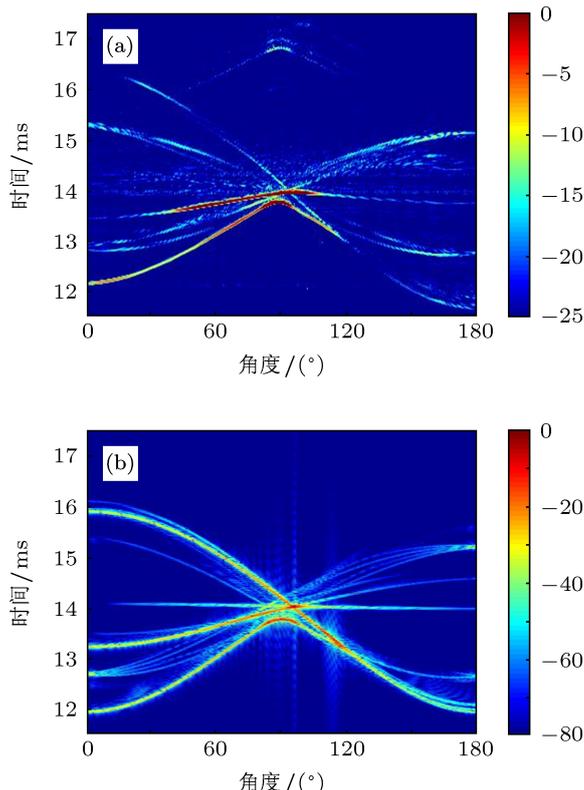


图 8 单层壳体 Benchmark 潜艇时域回波结构 (a) 实验结果; (b) 理论计算结果

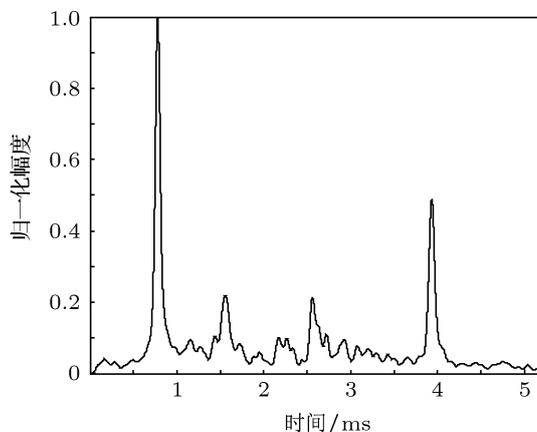


图 9 0° 舷角目标散射函数

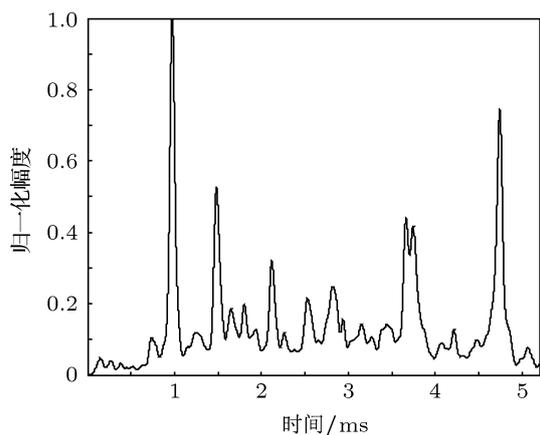


图 10 30° 舷角目标散射函数

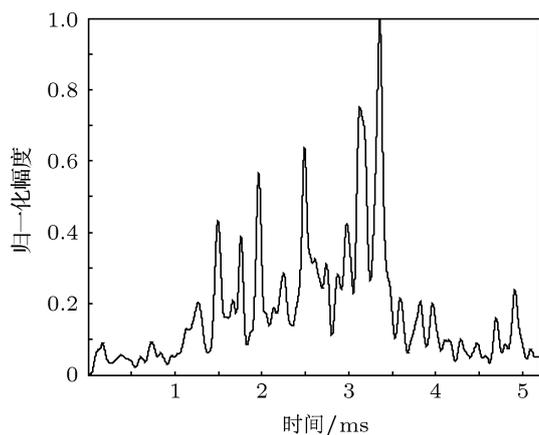


图 13 120° 舷角目标散射函数

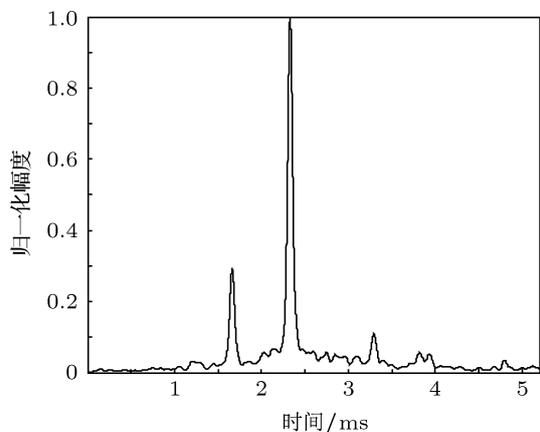


图 11 60° 舷角目标散射函数

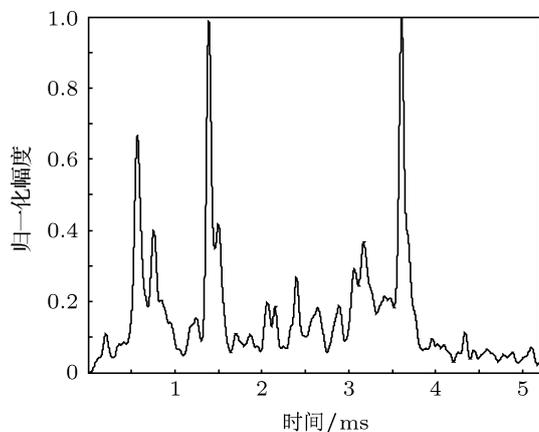


图 14 150° 舷角目标散射函数

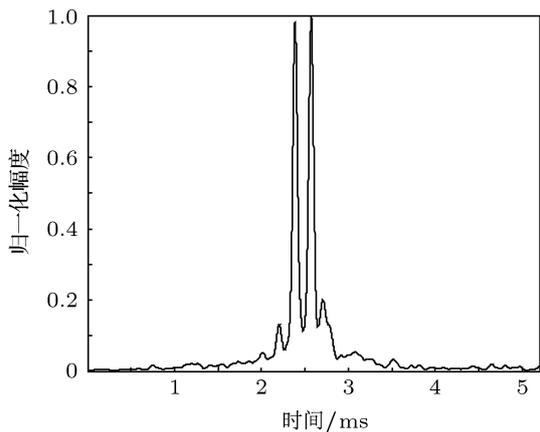


图 12 90° 舷角目标散射函数

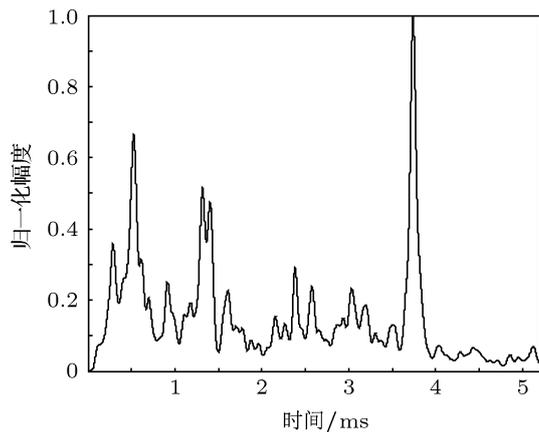


图 15 180° 舷角目标散射函数

4.3 回波亮点个数 $n(\theta)$

从 (7) 式中可以看出, 目标散射函数中除了亮点特征项之外也包含了散射背景项, 因此在进行亮点参数提取时, 首先需要确定亮点与散射背景之

间的比例关系, 即亮点判别的阈值. 这里采用一种以类间方差和类内方差为判断准则的阈值确定方法 [16]. 对于给定的阈值 k , 可以将回波数据分为亮点数据与非亮点数据两类, 亮点类数据个数为 $W_1(k)$, 平均值为 $M_1(k)$, 方差为 $\sigma_1^2(k)$; 非亮点类数

据个数为 $W_2(k)$, 平均值为 $M_2(k)$, 方差为 $\sigma_2^2(k)$, 整个数平均值为 $M_r(k)$, 则类内方差计算公式为

$$\sigma_w^2(k) = W_1(k)\sigma_1^2(k) + W_2(k)\sigma_2^2(k), \quad (8)$$

类间方差计算公式为

$$\sigma_b^2(k) = W_1(k)(M_r(k) - M_1(k))^2 + W_2(k)(M_r(k) - M_2(k))^2, \quad (9)$$

当 $\sigma_b^2(k)/\sigma_w^2(k)$ 最大时, 表示在该段数据上, 两类数值被最明显的区分出来, 所以满足 $\sigma_b^2(k)/\sigma_w^2(k)$ 最大时的阈值 k , 可认为是针对该数据的最优阈值. 对各角度回波数据进行阈值扫描得到各阈值均在 0.2 左右浮动, 故设定亮点阈值为 0.2. 需要说明的是, 阈值的选取与实际信号的信/混比或信/噪比相关, 阈值增大会导致实际统计的亮点数减少, 因此对于目标亮点统计特征集的建立应该保证实际信号具有一定的信/混比或信/噪比.

表 1 不同舷角回波亮点个数

舷角	亮点个数	标准差	舷角	亮点个数	标准差
0°	4	0.55	100°	1	0
10°	3	0.45	110°	4	0.71
20°	3	0.45	120°	16	2.00
30°	8	0	130°	14	0.84
40°	9	1.10	140°	14	1.52
50°	5	0	150°	9	1.64
60°	2	0	160°	9	0.84
70°	2	0	170°	13	1.22
80°	3	0.55	180°	10	0.55
90°	2	0.45	—	—	—

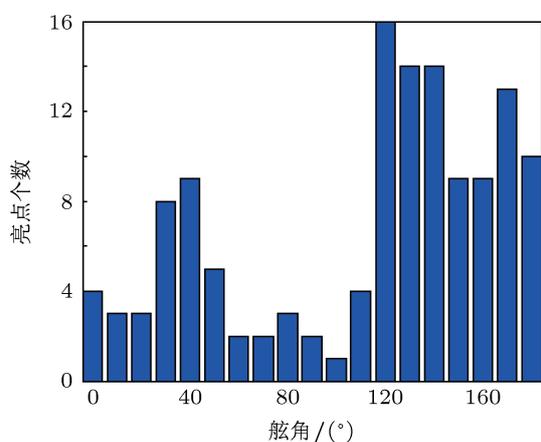


图 16 亮点个数随舷角分布

依照选定的阈值对不同舷角下的散射函数进行回波亮点个数统计, 并将作为目标分类的重要特征参量. 表 1 为实际提取的不同舷角亮点个数, 图 16 为亮点个数随方位变化分布图, 其中每个舷角参与统计分析的回波个数为 5 个. 通过对不同舷角下的回波亮点个数的对比分析可以看出, 在正横方位, 目标体上各部位的反射回波几乎同时到达接收阵, 只表现出两个亮点, 随着角度偏离正横位置, 各部位反射回波到达接收阵的时间差逐渐增大, 表现为亮点个数的增加, 亮点个数的变化体现了水中复杂体目标的方位信息, 可作为目标识别的特征之一.

4.4 亮点间的位置关系特征 $r(\theta)$

亮点在散射函数中的位置及时序是决定目标散射函数的另一个重要参数, 亮点的绝对时序间隔随目标的尺度而变化, 因此亮点的绝对位置信息不具有普遍意义, 但是对于形状相同目标, 亮点间的相对位置关系是一个固定的比例关系, 表征了目标的形状信息, 因此其可以作为目标识别的重要参数之一.

表 2 不同舷角回波亮点位置关系

舷角	亮点位置关系
0°	0, 0.25, 0.57, 1.00
30°	0, 0.14, 0.31, 0.41, 0.49, 0.71, 0.74, 1.00
60°	0, 1.00
90°	0, 1.00
120°	0, 0.06, 0.11, 0.13, 0.19, 0.27, 0.34, 0.40, 0.47, 0.47, 0.51, 0.57, 0.64, 0.70, 0.74, 1.00
150°	0, 0.06, 0.27, 0.31, 0.60, 0.82, 0.86, 0.94, 1.00
180°	0, 0.07, 0.18, 0.30, 0.32, 0.38, 0.61, 0.66, 0.79, 1.00

基于已经得到的不同舷角的散射函数估计, 将高于阈值的第一个亮点作为基准亮点, 高于阈值的最后一个亮点作为结束亮点, 各亮点位置进行归一化处理得到表 2 所示的不同舷角亮点之间的位置关系. 可以看出, 舷角不同, 亮点分布各不相同, 亮点间的定量位置关系是目标形状的特征体现.

4.5 亮点间的强度系数特征 $v(\theta)$

亮点强度是决定目标散射函数的另一个重要参数, 体现了目标几何散射和弹性散射的综合影响,

将高于阈值的亮点强度进行归一化处理, 得到如表 3 所示的不同舷角亮点间的相对强弱关系. 通过对比可以看出, 不同舷角的亮点强度分布各不相同, 回波亮点强度变化关系是表征目标形状、材质和内部结构的重要特征, 该特征对于水中复杂体目标回波与礁石和海洋动物回波的识别具有重要意义.

表 3 不同舷角回波亮点强度变化关系

舷角	亮点强度变化关系
0°	0.48, 0.96, 1.00, 0.62, 0.43
30°	0.58, 0.48, 0.49, 0.41, 1.00
60°	1.00, 0.49, 0.44
90°	0.42, 1.00
120°	0.48, 0.60, 0.55, 0.72, 0.73, 0.77, 0.94, 0.68, 1.00
150°	0.54, 0.32, 0.64, 0.39, 0.59, 1.00
180°	0.75, 1.00, 0.73, 0.66, 0.79

4.6 亮点集中度特征 $l(\theta)$

基于散射函数估计, 对不同舷角下的亮点集中度进行计算, 图 17 为不同舷角下的亮点集中度分布图, 可以看出, 对潜艇类目标随着舷角偏离正横位置, 回波亮点的集中度逐渐降低.

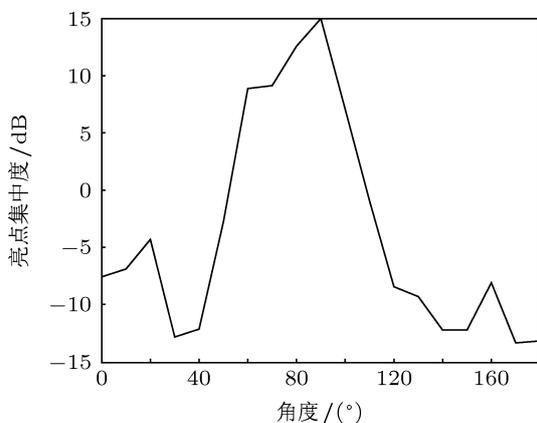


图 17 标准潜艇模型回波亮点集中度随舷角分布

5 海边礁石亮点统计特征

为了对比人造目标和礁石目标亮点分布特征, 本文同时也测试分析了如图 18 所示的海边礁石的亮点统计特征, 试验测量所用礁石的最大尺度为 60 cm. 由于礁石目标形状不规则, 没有潜艇目标舷角的概念, 因此选定礁石某方位为起始角度, 旋转 180° 测量回波数据, 具体测量方法与标准潜

艇缩比模型散射特性测量方法相同. 测试实验的发射信号为 40—80 kHz 宽带线性调频信号, 脉冲宽度为 2 ms.

5.1 目标二维散射函数图

图 19 为海边礁石目标的二维散射函数图, 与人工目标不同, 礁石目标不存在规则的几何形状, 礁石目标亮点细碎, 与人工目标亮点特征差异明显.



图 18 试验测试的海边礁石照片

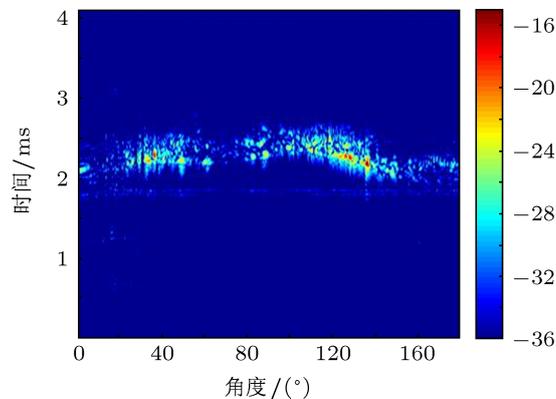


图 19 礁石目标二维散射函数图

5.2 目标散射函数 $B(\theta, \tau)$ 的估计

图 20—23 分别为礁石目标四个不同角度下的目标散射函数估计. 通过对比, 可以看出礁石目标亮点细碎, 亮点间隔小, 且不同方位角情况下, 礁石目标散射函数与人工目标散射函数相比, 变化不明显, 这是由于礁石目标没有人造目标的规则外形和复杂内部结构, 目标的细碎亮点主要是由目标的不规则外形散射引起的.

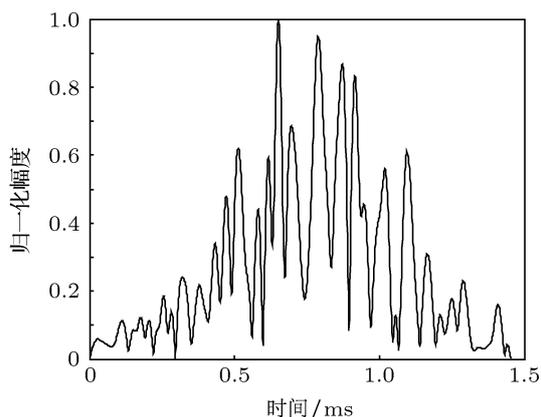


图 20 0° 方位角礁石目标散射函数

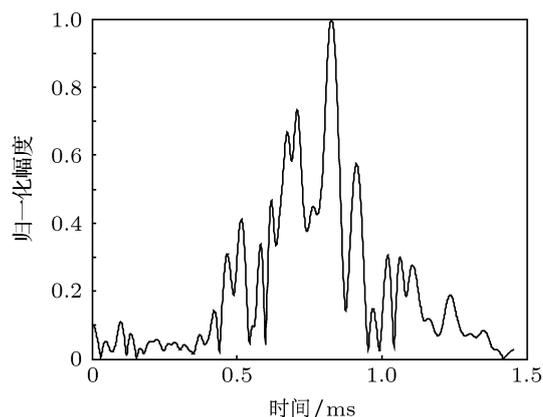


图 22 120° 方位角礁石目标散射函数

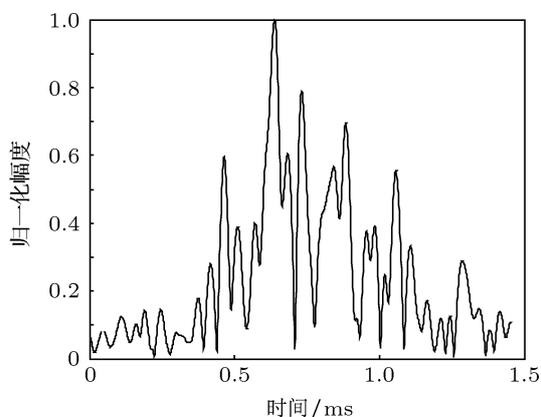


图 21 60° 方位角礁石目标散射函数

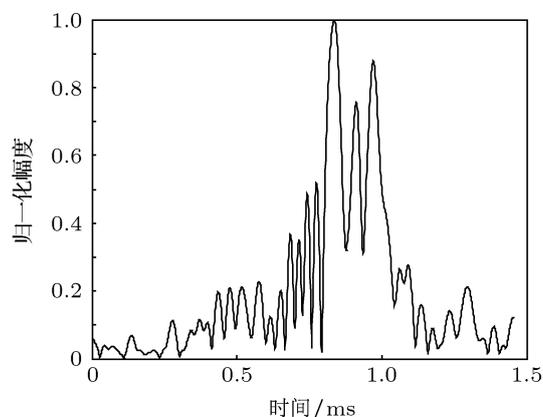


图 23 180° 方位角礁石目标散射函数

5.3 亮点集中度特征 $l(\theta)$

基于散射函数估计,对礁石目标不同方位下的亮点集中度进行计算.图 24 为不同方位角下的礁石目标亮点集中度分布图,可以看出,对于礁石类目标,其回波主要表现为细碎亮点,并且亮点分布无明显方位变化特性.因此礁石类目标的亮点集中度随方位变化相对较小,与之相对应,潜艇目标的亮点集中度具有显著的方位变化特征,这也是人造目标与礁石区分的重要特征.

6 结论

本文从水中目标分类识别的应用角度出发,研究了水中目标不同舷角下的回波亮点统计特征,通过分析可以得出如下结论:

1) 目标回波亮点是水中复杂体目标回波的重要特征,基于目标散射函数的目标回波亮点统计特征是对目标回波的细致描述和表征,体现了水中复

杂体目标回波亮点更为精细的特征;

2) 通过对不同舷角的目标回波进行散射函数估计,并基于目标散射函数估计进行目标回波亮点参数统计分析,可以获得目标回波亮点特征的定量描述和表征;

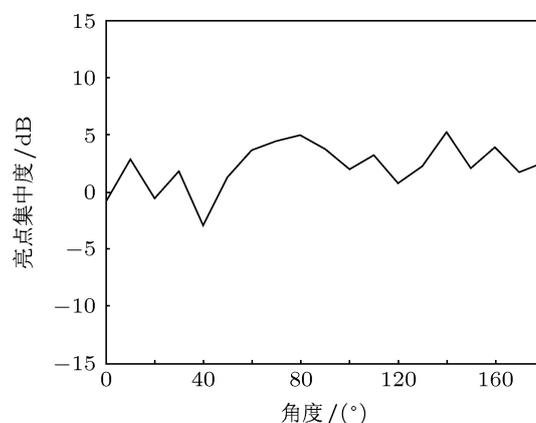


图 24 礁石目标亮点集中度随角度分布

3) 通过不同舷角的目标回波亮点统计特征,可

以建立目标回波特征样本库,使得目前广为研究的目标时间-角度谱图中所蕴含的目标特征信息能够很直接的转化为主动声纳易于应用的目标特征;

4) 本文提出的基于亮点模型的水中复杂目标散射函数估计方法中重点考虑了目标的艏艉方向回波亮点的统计特征,尚未考虑目标的横向(径向)

尺度对回波亮点的影响,因此,进一步的工作需要综合考虑复杂目标的横向和纵向尺度对回波亮点特征的影响.

感谢哈尔滨工程大学水声工程学院惠俊英教授的讨论.

-
- [1] Tang W L 1994 *Acta Acustica* **19** 92 (in Chinese) [汤渭霖 1994 声学学报 **19** 92]
- [2] 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)]
- [3] Fan J, Zhuo L K 2006 *Acta Acustica* **31** 511 (in Chinese) [范军, 卓琳凯 2006 声学学报 **31** 511]
- [4] Pan A, Fan J, Zhou L K 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 214301 (in Chinese) [潘安, 范军, 卓琳凯 2012 物理学报 **61** 214301]
- [5] Jiang Y M, Feng H H, Hao X Y 1997 *Acta Acustica* **22** 21 (in Chinese) [姜永珉, 冯海泓, 郝新亚 1997 声学学报 **22** 21]
- [6] Jiang Y M 2002 *Ship Science and Technology* **24** 30 (in Chinese) [姜永珉 2002 舰船科学技术 **24** 30]
- [7] Zhang B, An T S 2009 *Acoustic Technology* **28** 24 (in Chinese) [张波, 安天思 2009 声学技术 **28** 24]
- [8] Zhang B, An T S, Han J, Ma Z C, Zhu L G 2010 *J. Harbin Eng. Univ.* **31** 872 (in Chinese) [张波, 安天思, 韩静, 马忠成, 祝令国 2010 哈尔滨工程大学学报 **31** 872]
- [9] He X Y, Jiang X Z, Lin J Y 2001 *Torpedo Technology* **9** 15 (in Chinese) [何心怡, 蒋兴舟, 林建域 2001 鱼雷技术 **9** 15]
- [10] Liu C H, Ma G Q, Zhou M 2005 *J. Dalian Navy Academy* **28** 60 (in Chinese) [刘朝晖, 马国强, 周明 2005 海军大连舰艇学院学报 **28** 60]
- [11] Liu C H, Li Z S, Ma G Q 2004 *Ship Engineering* **26** 68 (in Chinese) [刘朝晖, 李志舜, 马国强 2004 船舶工程 **26** 68]
- [12] Yan W, Huang J G, Wang X X, Hu F 2005 *Computer Simulation* **22** 23 (in Chinese) [闫伟, 黄建国, 王新晓, 胡方 2005 计算机仿真 **22** 23]
- [13] Mark W M, Whitlow W L, Paul E N, John S A 2007 *J. Acoustic. Soc. Am.* **122** 2255
- [14] Lois A D, David A H, Patrick W M, Justine M Z 2002 *J. Acoustic. Soc. Am.* **112** 1702
- [15] Nell W, Gilroy L E 2003 *DRDC Atlantic Technical Repor.* Canada **TR2003-199** p10
- [16] Gao M 2009 *M. Eng. Dissertation* (Harbin: Harbin Engineering University) (in Chinese) [高苗 2009 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工程大学)]

Statistical feature of underwater target echo highlight*

Chen Yun-Fei^{1)2)†} Li Gui-Juan²⁾ Wang Zhen-Shan²⁾
Zhang Ming-Wei²⁾ Jia Bing²⁾

1) (*Department of Ship Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

2) (*Science and Technology on Underwater Test and Control Laboratory, Dalian 116013, China*)

(Received 29 June 2012; revised manuscript received 3 November 2012)

Abstract

Clutter caused by reel and ocean animals is the primarily interference for active sonar. How to classify and identify underwater vehicle echo between reel and ocean animal echo is the most confusing problem that affects the performance of active sonar. Characterization and application mode of underwater target omnibearing echo characteristic are studied for the application of active sonar target identification. A method of estimating the acoustic scattering function based on highlight model is presented, through which underwater target acoustic echo characteristics could be well characterized by statistical feature, and the method is more suitable for the application in active sonar classification. Based on the method studied in this paper, statistical feature of echo highlight is extracted from lake acoustic scattering test of scaled benchmark submarine model.

Keywords: underwater target, echo highlight, statistical characteristics

PACS: 43.30.+m, 43.40.Ey, 43.60.Lq

DOI: 10.7498/aps.62.084302

* Project supported by the Foundation of Science and Technology on Underwater Test and Control Laboratory, China (Grant No. 9140C260206100C26).

† Corresponding author. E-mail: dlinstitute@vip.163.com