

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.11.025

基于小波子带模型匹配的同水域下目标探测*

李鹏^{1,2} 叶方跃^{1,2} 李剑乔³ 陈展鹏^{1,2}

(1. 南京信息工程大学 江苏省气象探测与信息处理重点实验室 南京 210044; 2. 南京信息工程大学 江苏省气象传感网络技术工程中心 南京 210044; 3. 南京邮电大学 电子科学与工程学院 南京 210023)

摘要:针对水下声呐目标搜寻过程中环境复杂、成像分辨率低、人工识别目标困难等实际问题,提出基于双树双密度复小波子带模型匹配的方法自动判别水下目标有无。首先利用双树双密度复小波对所传回待测声图进行分解得到不同方向子带,接着采用三参数广义 Γ 函数对不同方向子带系数分布拟合作为特征项,最后利用含有目标声图与背景声图在分布特征上存在差异性,根据计算两者间KL距离进行相似度匹配并通过设定最优门限对声图目标有无自动判别。实验证明,利用所提出方法对含有多目标声呐图像判别,其检测品质因子达97.2%,并在不同噪声水平下其检测品质因子对比其他方式平均高出10%,具有较高的检出率和一定鲁棒性。

关键词: 声呐;水下目标探测;双树双密度复小波;广义 Γ 模型;KL距离

中图分类号: TP751 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520.6030

Target detection in the same water area based on wavelet sub-band model matching

Li Peng^{1,2} Ye Fangyue^{1,2} Li Jianqiao³ Chen Zhanpeng^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Procession, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Meteorological Sensor Network Technology Engineering Center, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

3. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Aiming at the problems such as complex environment, low separation rate and difficult to identify the targets in the process of underwater sonar target search, a new method based on dual tree double density complex wavelet sub-band model is proposed to identify the underwater target automatically. Firstly, the dual tree double density complex wavelet is used to decompose the acoustic image to get different direction sub-bands. Then, using the three parameters generalized Γ function of different directional sub-band coefficients to fit as feature items. Finally, using the difference in distribution characteristics between acoustic target image and background sonar image calculating the KL distance, the similarity is matched and the optimal threshold is set to distinguish the existing target automatically. The experiments prove that the proposed method is applied to the identification of sonar images with multiple targets, the quality factor of detection is 97.2% and the detection quality factor is 10% higher than that of other methods at different noise levels, and has high detection rate and robustness.

Keywords: sonar; underwater target detection; double tree double density complex wavelet; generalized Γ model; KL distance

收稿日期: 2017-05 Received Date: 2017-05

* 基金项目: 江苏省第11批六大高峰人才项目(2014-XXRJ-006)、江苏省重点研发计划社会发展项目(BE201569)、国家自然科学基金(41075115)、江苏高校优势学科II期建设工程项目资助

0 引 言

近年来,随着水下声学研究和信号处理技术的发展,水下声呐技术进入了一个前所未有的新阶段,一批高分辨率、处理速度快、探测覆盖范围广的声呐成像设备涌现^[1],为人类探索水下世界诸如水下资源勘查、地形地貌研究,水底目标搜寻与打捞等提供有力工具。声呐水下目标识别关键一步是利用传回的声图提取我们所感兴趣区域,由于水中环境复杂及目标的不确定性对图像分割造成一定困难,近年来国内外学者在这方面开展了大量研究工作,如文献[2-4]对水下目标分割提取感兴趣区域并取得了一定成果。目前上述分割处理都是假设声图中含有目标为前提,实际在水下探测时所传回的声图中并非都含有目标,如对所有声图都进行特征提取势必会造成大量运算资源浪费且会增加目标误识别率,因此在对声图作进一步处理前有必要对其判断是否包含目标。在广阔水域下目标物是稀疏存在的,目标有无判别须要传回大量声图数据作比对判别,在面对海量声图成像数据如仅靠人工目视对目标判别有无这一传统检测方式,显然存在效率低下、成本高、主观性强检测周期长等缺陷,已远不能满足现代社会对获取高效准确信息的要求,快速准确对水下目标自动判别逐渐成为研究新热点。

在目标探测方面,文献[5]利用小波能量作为特征量对雷达目标检测,此方法在大目标情况下可得到较高检测率,但在小目标情况下目标能量特征量会淹没在噪声中造成漏警;文献[6]认为图像背景灰度分布近似符合高斯分布,对那些不符合高斯分布便可认为目标点,该算法可以在未知目标大小情况下对目标检测,但这是在假设背景服从近似高斯分布前提下,而作为水下复杂背景声图并不服从高斯分布这一假设。基于此,本文提出基于双树双密度复小波子带模型匹配的方法探测水下目标,该算法首先采用高冗余双树双密度复小波对声图分解得到更精准子带特征信息,接着提出并验证声图小波子带系数模符合广义 Gamma 分布模型的假设并结合信息论中 KL 距离量化待检测声图和背景模型间特征差异,最后通过设置最优门限判别该声图是否包含目标。

1 双树双密度复小波变换

小波作为多尺度分解的有效工具,通过对图像分解得到不同小波子带系数,这些子带系数包含图像在不同方向上的纹理特征信息^[7],而传统小波存在平移不变性和方向选择性差等缺点,为克服这方面缺点相继有学者提出通过增加小波的冗余度来改进传统小波分解精度差的问题^[8]。本文将使用双树双密度复(double tree density

double complex wavelet transform, DtDdCwt) 小波作为声图的分解工具。DtDdCwt 由 Selesnick^[9] 提出一种冗余度为 3 的紧支撑结构,其设计综合了双树小波近似平移不变性和双密度小波带通滤波器组高设计自由性等特点。图 1 所示为一维信号 DtDdCwt 两层分解结构,有两组并行的过采样滤波器组,其中 $\{h_i(n)\}$ 和 $\{g_i(n)\}$ ($i=0,1,2$) 为有限冲击响应滤波器。DtDdCwt 的小波基是由两个尺度函数 ϕ_h, ϕ_g 和 4 个小波函数 $\{\psi_{h,i}, \psi_{g,i} (i=1,2)\}$ 构成,其关系等式如下:

$$\begin{aligned} \phi_h(t) &= \sqrt{2} \sum_n h_0(n) \phi_h(2t-n) \\ \phi_g(t) &= \sqrt{2} \sum_n g_0(n) \phi_g(2t-n) \\ \psi_{h,i}(t) &= \sqrt{2} \sum_n h_i(n) \phi_h(2t-n) \\ \psi_{g,i}(t) &= \sqrt{2} \sum_n g_i(n) \phi_g(2t-n) \\ \psi_{h,1}(t) &\approx \psi_{h,2}(t-0.5), \psi_{g,1}(t) \approx \psi_{g,2}(t-0.5) \\ \psi_{g,1}(t) &\approx H\{\psi_{h,1}(t)\}, \psi_{g,2}(t) \approx H\{\psi_{h,2}(t)\} \end{aligned} \quad (2)$$

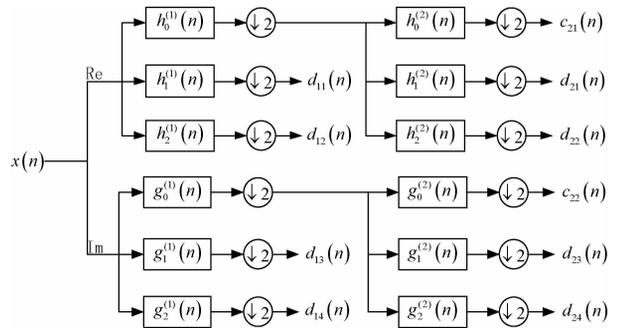


图 1 双树双密度分解结构

Fig. 1 The structure of DtDdCwt decomposition

二维 DtDdCwt 为一维扩展,采用 4 个双密度过采样滤波器组,分别对图像进行行滤波和列滤波,图像由 DtDdCwt 分解后得到 4 个近似子带和 32 个细节子带系数,如图 2 所示,第 1 层为其实际部有 $\pm 15^\circ, \pm 45^\circ, \pm 75^\circ$ 6 个方向,第 2 层为其虚部同样有 6 个方向,因此每层分解都有 12 个方向且每个方向都有两个小波表示,增加信息冗余度,每一层分解得到 32 个细节子带代表了各个方向,每个细节子带是图像的同边缘或轮廓信息在不同



图 2 DtDdCwt 方向图

Fig. 2 Directional pattern of DtDdCwt

方向、不同分辨率下由细到粗的描述。经过双树双密度复小波变换后,图像分解的频带更细,能有效的从多角度描述声呐图像重要特征信息,尤其更利于对水下复杂声图纹理分析。

2 小波子带系数统计模型

常用的小波系数统计特征有均值、标准差、能量和直方图等,研究表明均值、方差或能量方面用来识别建筑背景、人造花纹等规则的光学成像纹理可达到较高的识别度,但用来描述水下声呐复杂声图特征并不准确,因此本文将尝试采用小波子带直方图的边缘分布统计模型作为声图纹理特征。由于小波稀疏特性使得图像经小波分解后细节子带分布成非高斯特性^[10],具体表现为子带直方图的边缘密度在零点有尖锐的峰值且比高斯分布具有更长拖尾。图 3 所示为声呐图小波子带直方图,图 3(b)为实部子带,图 3(c)为虚部子带,图 3(d)为子带系数模直方图,与提取小波系数的实部和虚部特相比,采用小波系数模提取特征可以比原有特征减少一半,降低特征维数和存储空间^[11],因此本文将采用子带系数模。

地貌背景纹理和目标结构轮廓。海底地貌主要由岩石、砂质、泥质等底质构成,不同底质在声图上具有不同纹理,直接反映为海底表面结构粗糙程度,如图 4(a)~(c)所示。就一般性而言,岩石底质为明显起伏脊状强纹理,砂质呈现分布均匀低灰度纹理,泥质则表现为小块状分布^[12],图 4(d)为沉船声图即本文所要探寻的目标物。

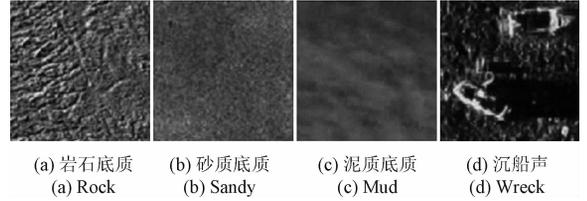


图 4 不同底质与沉船声图

Fig. 4 The sonar image of different sediments and sunken ships

为证明不同声图在直方图中区别,对图 5 所示各声图进行 DtDdCWT 变换产生 32 个细节子带系数,并提取细节子带系数模的统计直方图,限于篇幅此处仅讨论一个方向的小波系数直方图,如图 5 所示,从图 5 可以看出不同纹理其直方分布有着显著差异,这里以岩石和砂质底质为例,虽然在整体结构上非常相似,但不难发现岩石的有效 bin 个数要多于砂质,即其分布更为松散。从这里可以得出以声图子带分布模型作为对声图纹理分析是可行的。

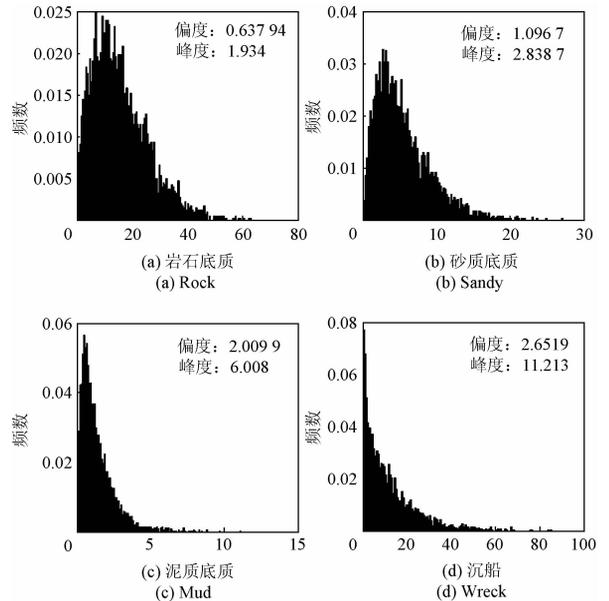


图 5 不同声图小波子带系数模直方图

Fig. 5 The histogram of different wavelet sub-band coefficient modulus

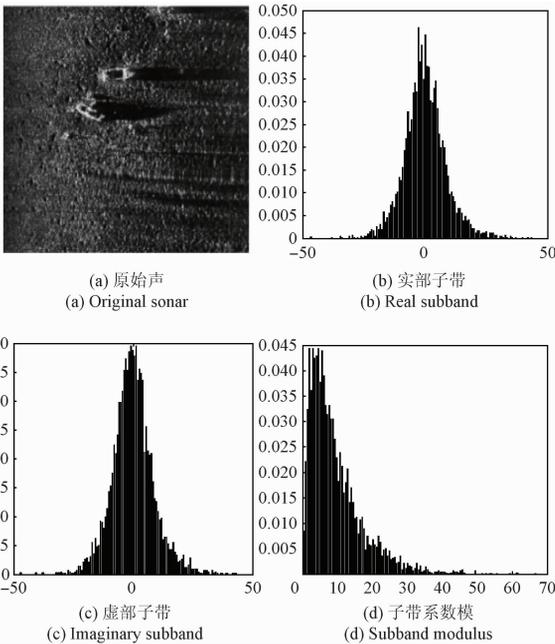


图 3 DtDdCwt 子带系数分布

Fig. 3 DtDdCwt sub-band coefficient distribution

为了进一步研究声呐图像目标判别,首先对声呐图像纹理特点分析。声传感器接收不同强弱回波信号,这些信号反应了不同反射面特性,硬的、粗糙的、凸起的物体回波较强,软的、平缓的、凹的物体其回波较弱,回波强弱在声图反映为像素灰度变化,以此显示不同

3 广义 Γ 函数子带小波系数拟合及参数估计

3.1 广义 Γ 函数

不同纹理直方图具有不同分布特性,在多尺度变换域中寻找合适分布拟合直方图统计特性是目前研究的热点,对图像统计建模可分为非参数模型和参数模型^[13],非参模型虽然建模灵活但需要大量样本数据,因此本文将采用复杂度低的参数模型进行建模。最早 Mallat 提出小波在各个尺度的高频子带系数直方图服从指数分布,随后相继提出了广义高斯分布、广义 Gamma 分布等模型,并在语音信号处理、缺陷检测及图形统计模型中得到广泛应用^[14-16]。从图 3 子带系数模直方图表现出的长拖尾、右偏等形状特性与 GFD 极为相似,故本文提出声图由 DtDdCwt 分解后得到高频子带系数模分布符合 GFD 的假设。广义 Gamma 分布 (GFD) 模型由 Stacy 提出^[17],其概率密度函数为:

$$f(w; \theta) = \frac{\beta w^{\beta\alpha-1}}{2\alpha^{\beta\alpha} \Gamma(\lambda)} \exp(-(w/\alpha)^\beta), w > 0 \quad (3)$$

式中: $\theta = (\alpha, \beta, \lambda)$, $\alpha > 0, \beta > 0, \lambda > 0$ 分别为尺度参数,功率参数和形状参数, w 为高频子带系数模, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数,表达式为 $\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-\tau} \tau^{x-1} d\tau, x > 0$ 。当使上述 3 个参数取特定值时该分布可以退化成为常见分布,如指数分布、Nakagami 分布、Gamma 分布、威布尔分布等,具有广泛模型建模的兼容性。

3.2 参数估计

对 GFD 中 θ 的三参数估计,通常可通过计算最大似然估计获得,参数 $\hat{\theta}$ 估计式:

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} \log \prod_{i=1}^n f(w_i; \theta) \quad (4)$$

式中: w_i 为小波高频子带系数。此处为了方便求导对式(4)取对数后分别对三参数微分,则最大值即偏导函数为 0 时各参数取值,如式(5)所示。

$$\frac{\partial l(\theta)}{\partial \alpha} = \sum_{i=1}^N \beta \alpha^{-\beta-1} w_i^\beta - \frac{N\beta\lambda}{\alpha} = 0$$

$$\frac{\partial l(\theta)}{\partial \beta} = \frac{N}{\beta} + \sum_{i=1}^N \lambda \ln w_i - \sum_{i=1}^N \left(\frac{w_i}{\alpha}\right)^\beta \ln \frac{w_i}{\alpha} - N\lambda \ln \alpha = 0$$

$$\frac{\partial l(\theta)}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^N \beta \ln w_i - N\beta \ln \alpha - N\psi(\lambda) = 0 \quad (5)$$

由式(5)不难发现求解方程组计算复杂且方程非线性程度高^[18],因此采用常规的牛顿迭代法难以计算该方程的数值解。为解决这一问题秦先祥等人提出独立尺度形状估计方法 (SISE) 对部分参数先分离后估计^[19],SISE 方程为:

$$S(\beta) = \ln\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |w_i|^{2\beta}\right) - 2\ln\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |w_i|^\beta\right) - \ln\left[1 + \beta \left(\frac{\sum_{i=1}^n |w_i|^{\beta \ln |w_i|}}{\sum_{i=1}^n |w_i|^\beta}\right) - \frac{\sum_{i=1}^n \ln |w_i|}{n}\right] \quad (6)$$

具体求解过程:1) 利用 Newton-Raphson 估计形状参数 $\hat{\beta}^{k+1} = \hat{\beta}^k - (S(\hat{\beta}^k)/S'(\hat{\beta}^k))k = 1, 2, \dots, 2)$ 将求出的 $\hat{\beta}$ 代入式(5)可分别求出尺度参数 $\hat{\alpha}$ 和功率参数 $\hat{\lambda}$ 。该估计算法较求解方程组而言,仅用简单迭代运算便可得到确定的解,提高了计算效率。图 6 红色曲线为通过 SISE 估计的三参数 GFD,同时画出另外两种较常用的分布广义高斯分布和瑞利分布作对比参考,从图 6 可以看出,单参数瑞利分布虽然在参数估计上简单但图 6(c)、(d) 出现较大偏差出现较大偏差,广义高斯分布由于系数模分布存在较为明显的左右非对称差异对其拟合略显不足,而 GFD 拟合原始直方图曲线近似度较高,通过对比不难发现

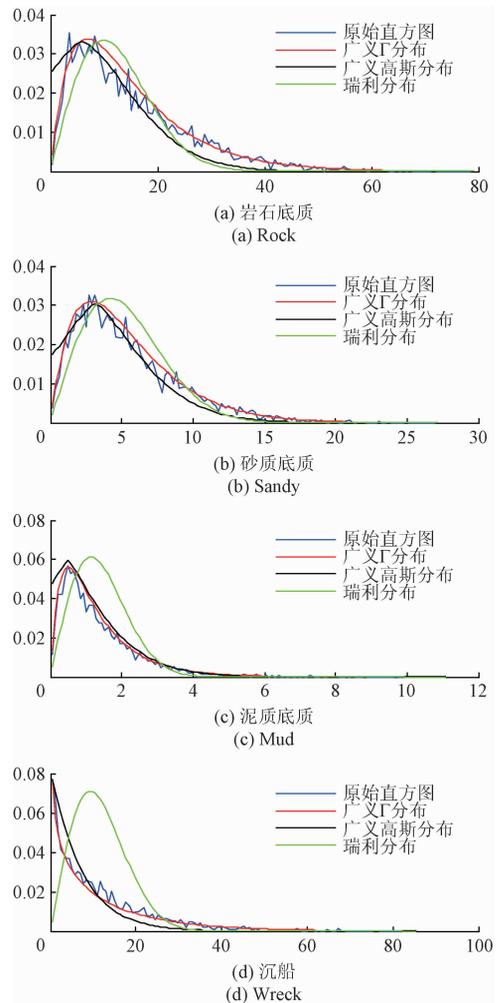


图 6 不同分布拟合直方图

Fig. 6 Different distribution fitting histogram

GFD 对于声图不同纹理具有广泛的适应性,且利用 GFD 3 个参数作为特征量表示高频子带系数模可降低计算复杂度。

3.3 模型间相似度分析

在信息论中常使用相对熵来衡量两概率分布间的差异程度,也称之为 Kullback-Leibler 距离。鉴与此,在估计出声图各方向高频子带系数模的 GFD 各参数后,采用 KL 距离作为声图间相似性测度,如式(7)所示。

$$KLD(f_1, f_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(w_1; \cdot) \ln \frac{f_1(w_1; \cdot)}{f_2(w_2; \cdot)} dx \quad (7)$$

其中 $f_i(w_i; \cdot) = f(w_i; \alpha_i, \beta_i, \lambda_i)$ $i = 1, 2$, α, β, λ 为 w 模系数在广义 Gamma 分布中的参数估计值,经推导可得:

$$KLD(f_1, f_2) = \ln \left(\frac{\beta_1 \alpha_2^{\beta_2} \Gamma(\lambda_2)}{\beta_2 \alpha_1^{\beta_2} \Gamma(\lambda_1)} \right) + (\beta_1 \lambda_1 - \beta_2 \lambda_2) \frac{\varphi(\lambda_1)}{\beta_1} + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^{\beta_2} \frac{\Gamma(\lambda_1 + \beta_2/\beta_1)}{\Gamma(\lambda_1)} - \lambda_1 \quad (8)$$

显然 KL 距离不满足对称性要求,即 $KLD(f_1, f_2) \neq KLD(f_2, f_1)$, 因此对式(8)稍作改进得到对称的 KLD 公式:

$$SKLD(f_1, f_2) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} [f_1(w_1; \cdot) + f_2(w_2; \cdot)] \cdot \ln \frac{f_1(w_1; \cdot)}{f_2(w_2; \cdot)} dx = \frac{1}{2} (KLD(f_1, f_2) + KLD(f_2, f_1)) \quad (9)$$

4 算法分析与实验数据仿真

4.1 声呐目标探测算法分析

在对声呐探测设备传回的每帧声图做诸如特征提取、目标识别等处理前,首先要判别声图是否包含目标物,对于含目标的水下声图主要包含背景区、目标亮区和目标影区,通常影区也可作为目标特征之一^[20],故本文将两者统称为目标区。通过上文分析可知在不同图像纹理存在着不同分布特性,同理背景声图和包含目标声图也必然存在着分布差异,利用待检测声图和背景进行相似度匹配检测目标。在前人对于水下研究基础上得知在同一水域情况下由于受潮流、波浪、沉积等相同水文环境作用,其水底地貌结构分布特点基本一致,如杭州湾在长江口泥沙扩散和湾内动力条件共同作用下,海底底质以粉沙和泥质粉沙为主的细颗粒沉积物为主^[21],因此在特定区域中水底底质分布可视为已知的先验知识,避免对大面积水底底质取样,只需建立部分水域底质分布模型便可作背景匹配项。因此声图目标探测基本原理可通过含目标和不含目标概率模型的差异值判别,算法流程如图7所示。

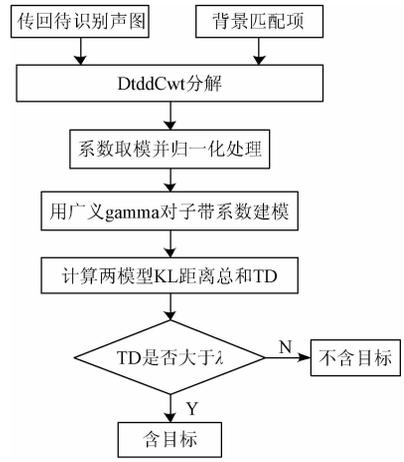


图7 算法流程

Fig. 7 Flowchart of algorithm

主要实现步骤如下:

1) 对获取声图进行 DtDdCwt 分解得到高频子带系数,这些子带代表不同方向声图特征,由于低频子带在多层分解后信息损失较多故本文主要对高频子带边缘分布进行统计建模。

2) 由于不同设备或同一设备采用不同声呐发射功率所获取的声图灰度值存在差异,因此在对子带建模前对小波系数归一化处理以达到统一量化标准,如式(10),并对每个方向上包含的 2 个子带取模得到 16 个小波系数幅值特征,如式(11)。

$$w_{\text{normal}} = \frac{w - \min(w)}{\max(w) - \min(w)} \quad (10)$$

$$w_{\text{abs}} = \sqrt{w_{\text{Re}}^2 + w_{\text{Im}}^2} \quad (11)$$

3) 选择广义 Gamma 分布对求出各尺度小波高频子带系数模建模,得到对应的概率分布函数 $f_i(w; \alpha_i, \beta_i, \lambda_i)$, $(i = 1, 2, \dots, 16)$ 。

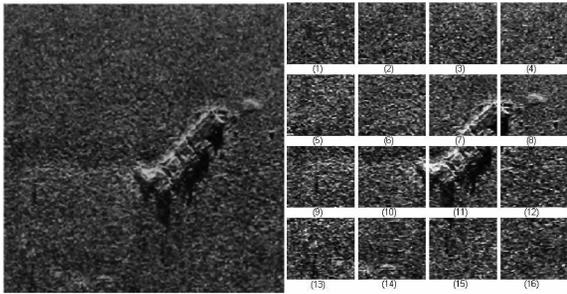
利用式(10)分别计算两幅声图各尺度下相同方向上的概率模型 SKL 距离,将距离之和作为两模型的差异度:式(12),其中 J 为小波分解层数,计算结果与预设的门限 λ 进行比较,如果 $TD(I_1, I_2) \geq \lambda$, 则说明为该声图含有目标物,否则为背景。

$$TD(I_1, I_2) = \sum_{j=1}^{16J} SKLD(f_1(\cdot; \alpha_1^{(j)}, \beta_1^{(j)}, \lambda_1^{(j)}), f_2(\cdot; \alpha_2^{(j)}, \beta_2^{(j)}, \lambda_2^{(j)})) \quad (12)$$

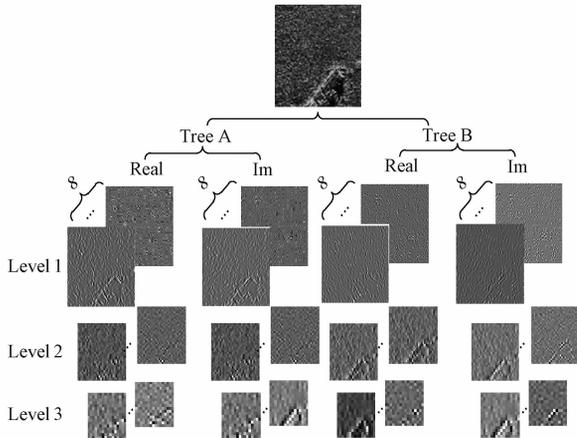
4.2 仿真实验

为了验证所提出的算法在判别水下声呐目标有无的有效性,选取 512×512 含目标物的深海沉船声呐图进行仿真实验,如图 8(a) 所示。实验在 Intel Core i3-2100 CPU 3.10 GHz, 4 G 内存平台环境中运行。为模拟声呐传回的帧结构将图 8(a) 划分为 16 张 128×128 子图作

为待检测目标项,从图 8(b)可以看出有 3 个子图包含目标。由上文分析并非所有声呐传回的每帧图像都包含目标且在同一水域下背景区域呈现同一分布,故可取图 8(b)中 1 图背景项设为先验匹配模型。图 8(c)为声图经 DtDdCWT 分解示意图,每一层分解产生 32 个细节子带系数代表了不同方向上声图特征,此处分解层数 J 取 3,该值选定已在文献[22]中通过实验数据对比证实过多分解级数不会进一步提升处理效果反而会使信息特征丢失过多且会增加计算量。



(a) 原始沉船声 (b) 划分后子



(c) 声图DtDdCwt三层分解
(c) Three-layerdecompositionby DtDdCwt

图 8 声呐图像

Fig. 8 The sonar image

表 1 给出图 8(b)声图目标判别结果,因限于篇幅仅罗列部分数据加以说明。表 2~3 列为各层子带分布模型通过式(10)计算得到的差异值,第 4 列为所有子带相似度距离总和,从计算结果可以得出当子图中包含目标时其距离之和相对于无目标要大,因此只要设置一门槛便可判断出子图中是否包含目标。为衡量门槛对目标检测的影响此处引入品质因子 FoM ,公式如下:

$$FoM = \frac{C_t}{C_f + C_g} \quad (13)$$

式中: C_t 为检测结果中正确识别目标数; C_f 为虚警目标

数; C_g 为声图中实际包含目标数, FoM 值越大则说明检测性能越好。

表 1 图 8(b)中部分声图目标检测结果

Table 1 Partial target detection results in Fig. 8(b)

序号	1-level	2-level	3-level	SKL 距离总和	目标判别
7	0.763 7	0.402 4	0.217 8	1.383 9	有
8	0.502 1	0.246 5	0.253 8	1.002 4	有
9	0.042 2	0.063 8	0.105 3	0.211 3	无
10	0.248 2	0.048 9	0.251 4	0.548 5	无
11	1.848 9	0.907 7	0.340 9	3.097 5	有
12	0.148 1	0.087 4	0.164 9	0.400 4	无

图 9 所示为不同门槛对目标检测影响的曲线图,从图 9 反映出门槛设置过低或过高都会产生大量的虚警和漏警^[23],因此选取最佳门槛值 λ 使经判别后声图品质因子最大化,即 $FoM(\lambda)$ 取最大,如式(14):

$$\hat{\lambda} = \operatorname{argmax} FoM(\lambda) \quad \lambda = 0, 0.1, 0.2 \dots i \quad (14)$$

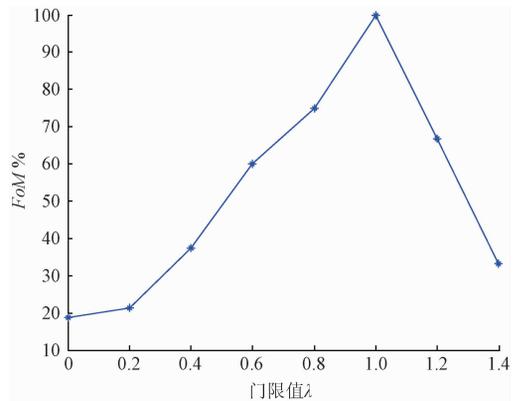


图 9 门槛对声图目标判别影响曲线

Fig. 9 Influence curve of threshold on target identification

表 1 第 6 列为判别结果,本次实验 3 个目标被全部判别出。为了进一步验证本文算法对多目标判别效果和鲁棒性,对图 10 中含有多目标判别,该声图为海底残骸,经图像划分处理得到 64 个 128×128 子块,由人工预判该当声图目标所占比例超过 1/5 时该子图判为含目标,从图中可以看出包含 35 个目标声图,分别采用瑞利分布、广义高斯分布和广义 Γ 分布模型对图 10 中目标判别并对文献[2]中所提出基于小波能量求和检测目标方法比较。结果如表 2 所示,从 3 种不同分布检测对比结果发现利用 GFD 模型检测出所有目标物且仅出现 1 个虚警,GGD 检测效果次之,而使用 Rayleigh 分布模型虽然在单幅目标检测运行时最少但检测效果最差,究其原因 GFD 为多参数分布模型相对其他两种分布可提供更加灵活精准方式拟合声图小波子带系数。对比表 2 中能量法检测结果虽然 FoM 略高于 GGD 但由于声图中包含有

小目标导致能量总和接近无目标时能量而出现较高的漏警,在实际应用目标探测时虚警可以最终通过人工排除而漏警率高直接导致目标探测失败,显然利用本文提出方法具有较高检出率。复杂的水下环境等多方面噪声干扰使获得声图模糊不清,而声图主要噪声源为斑点噪声,因此本文将考察斑点噪声对所提出目标检测算法的影响,对图 10 进行不同级别噪声腐蚀,为降低所加噪声随机性对检测结果影响,分别在每级噪声水平做 10 次测试后求平均,结果在表 3 中显示,从表中可以看出随着斑点噪声方差增大造成含目标声图细节边缘轮廓模糊,匹配后 SKL 距离减小,导致漏警数逐渐增多,因此品质因子总体上呈下降趋势。对比实验数据不难发现利用本文所提出的 GFD 模型法在各个噪声水平得到了比其他方法都高的 *FoM*,这表明该方法在一定程度上能降低噪声对其影响,具有一定的鲁棒性。

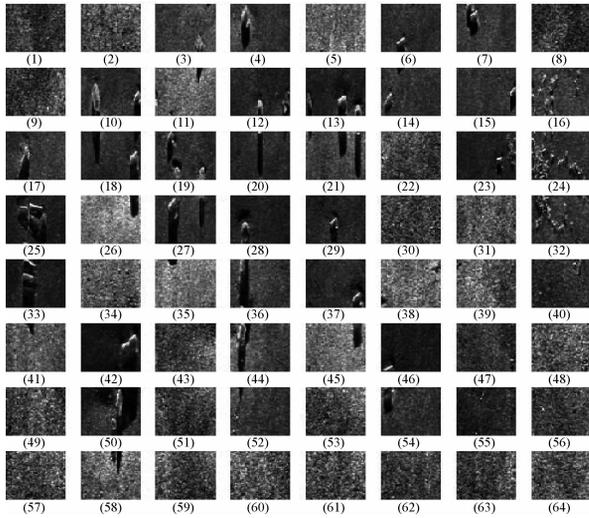


图 10 海底残骸声图

Fig. 10 Acoustic picture of submarine debris

表 2 不同算法检测结果

Table 2 Detection results of different algorithms

算法	Energy	Rayleigh	GGD	GFD
正确检测数	30	25	34	35
虚警个数	2	13	7	1
漏警个数	5	10	1	0
<i>FoM</i>	0.811	0.521	0.809	0.972
运行时间 /s	0.354	0.279	0.498	0.563

表 3 不同噪声水平对比实验

Table 3 Experimental comparison of different noise levels

噪声水平	Energy	Rayleigh	GGD	GFD
	<i>var</i> = 0.01	<i>var</i> = 0.013	<i>var</i> = 0.015	<i>var</i> = 0.017
方法 Energy	0.784	0.722	0.639	0.571
方法 GGD	0.786	0.757	0.675	0.594
方法 GFD	0.921	0.861	0.771	0.685

5 结 论

本文针对水下目标探测实际问题,提出基于双树双密度复小波子带模型匹配的方法,对水下目标有无进行自动判别。其中所提出的利用双树双密度复小波对声图分解能有效的从多角度描述声呐图像重要特征信息,更利于对水下复杂声图纹理分析;采用三参数广义 Gamma 函数对分解后的小波子带系数模分布拟合,实验仿真证明该模型对于声图不同纹理具有广泛的适应性且节省数据存储空间;为分析待测声图与背景匹配项相似度提出改进型对称 KL 距离对两分布模型计算,并采用最优门限对目标有无判别以提高正确识别率。实验证明,利用本文所提出方法能有效对水下目标有无进行判别,并在噪声干扰的情况下具有一定的鲁棒性。同时需要指出的是在模型参数估计算法中由于采用迭代运算占用了大部分运行时间,造成总体时间复杂度略高于其他方法,下一步将采取算法优化进一步降低运算时间。

参考文献

[1] 李海森,周天,徐超. 多波束测深声纳技术研究新进展[J]. 声学技术, 2013, 32(2):73-80.
 LI H S, ZHOU T, XU CH. New developments on the technology of multi-beam bathymetric sonar [J]. Technical Acoustics, 2013, 32(2):73-80.

[2] CELIK T, TJAHJADI T. A novel method for sidescan sonar image segmentation[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2011, 36(2): 186-194.

[3] 王雷,叶秀芬,王天. 模糊聚类的侧扫声纳图像分割算法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2012, 40(9):25-29.
 WANG L, YE X F, WANG T. Segmentation algorithm of fuzzy clustering on side scan sonar image[J]. Huazhong Univ. of Sci & Tech; Natural Science Edition, 2012, 40(9):25-29.

[4] 叶秀芬,张元科. 基于马尔可夫随机场的非监督声呐图像分割方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015(4): 516-521.
 YE X F, ZHANG Y K. Unsupervised sonar image segmentation method based on Markov random field[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 40(9): 25-29.

[5] 张伟军,李卉,李毅,等. 基于小波包能量特征及 LVQ 的目标检测方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(3):297-299.
 ZHANG W J, LI H, LI Y, et al. Study on target detection based on wavelet pack energy feature and LVQ neural

- networks[J], *Computer Measurement & Control*, 2007, 15(3):297-299.
- [6] 刘德连, 张建奇. 一种基于纹理分割的遥感图像目标探测算法[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, 25(3):236-240.
- LIU D L, ZHANG J Q. Approach of texture base anomaly detection for remote sensing image [J]. *Infrared Millimeter Waves*, 2006, 25(3):236-240.
- [7] 金汉均, 曾婷. 小波变换在 HSV 颜色空间上的图像检索应用研究[J]. *电子测量技术*, 2016, 39(7):106-109.
- JIN H J, ZENG T. Application of wavelet transform to image retrieval in HSV color space [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2016, 39(7):106-109.
- [8] SELESNICK I W, BARANIUK R G, KINGSBURY N C. The dual-tree complex wavelet transform [J]. *Signal Processing Magazine IEEE*, 2005, 22(6):123-151.
- [9] SELESNICK I W. The double-density dual-tree DWT[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(5):1304-1314.
- [10] ARANI M N, ZHANG X P. Generalized Gaussian mixture conditional random field model for image labeling[C]. *Signal and Information Processing, IEEE*, 2015:1068-1072.
- [11] KWITT R, UHL A. Lightweight probabilistic texture retrieval[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(1):241-253.
- [12] 石丹, 李庆武, 范新南, 等. 曲波变换域侧扫声纳图像海底底质分类[J]. *应用科学学报*, 2009, 27(5):498-501.
- SHI D, LI Q W, FAN X N. Seafloor sediments classification of side-scan sonar imagery in fast discrete curvelet transform domain [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2009, 27(5):498-501.
- [13] GAO C, ZHANG H, WANG C, et al. SAR change detection based on generalized Gamma distribution divergence and auto-threshold segmentation[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(4):710.
- [14] BORGSTRÖM B J, ALWAN A. Log-spectral amplitude estimation with generalized Gamma distributions for speech enhancement [C]. 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2011:4756-4759.
- [15] 苑玮琦, 李绍丽, 李德健, 等. 基于子区域变尺度高斯拟合的木材表面缺陷识别[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(4):879-886.
- YUAN W Q, LI SH L, LI D J. Wood surface defect recognition based on sub-region zoom Gaussian fitting[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(4):879-886.
- [16] 张久文, 米进财, 张同峰. 基于双树复小波和广义高斯密度的纹理图像检索[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2013, 43(S1):69-72.
- ZHANG J W, MI J C, ZHANG T F. Texture image retrieval based on DT-CWT and generalized gaussian density[J]. *Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition*, 2013, 43(S1):69-72.
- [17] LI H C, HONG W, WU Y R, et al. An efficient and flexible statistical model based on generalized Gamma distribution for amplitude SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2010, 48(6):2711-2722.
- [18] SONG K S. Globally convergent algorithms for estimating generalized gamma distributions in fast signal and image processing[J]. *IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2008, 17(8):1233-50.
- [19] 秦先祥, 高贵, 周石琳, 等. 基于 SISE 方程的广义 Gamma 分布参数估计方法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(8):1860-1865.
- QIN X X, GAO G, ZHOU SH L. Method on parameters estimation of generalized Gamma distribution based on scale-independent-shape-estimation (SISE) equation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(8):1860-1865.
- [20] PETILLOT Y, PAILHAS Y, SAWAS J, et al. Target recognition in synthetic aperture and high resolution side-scan sonar [C]. *European Conference on Underwater Acoustics, ECUA*, 2010:10.
- [21] 赵宝成. 杭州湾北岸水下岸坡微地貌特征及其海床侵蚀指示意义[J]. *上海国土资源*, 2011, 32(3):27-34.
- ZHAO B CH. Bedforms on northern Hangzhou bay subaqueous slope; its implication to seafloor erosion[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2011, 32(3):27-34.
- [22] CHOY S K, TONG C S. Statistical wavelet subband characterization based on generalized gamma density and its application in texture retrieval[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(2):281-289.
- [23] 宋晓琳, 张三林, 张伟伟. 应用匹配滤波器的车道线恒虚警率识别方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2015, 29(3):328-336.
- SONG X L, ZHANG S L, ZHANG W W. Lane detection method of constant false alarm rate by using matched filter [J]. *Journal of Electronic Measurement And Instrumentation*, 2015, 29(3):328-336.

作者简介



李鹏(通讯作者),1990年于南京理工大学获得学士学位,2003年于中国矿业大学获得硕士学位,2008年于西安交通大学获得博士学位,现南京信息工程大学副教授,主要研究方向为超声检测与成像技术、信号与信息处理、气象要素检测方法和仪器装备。

E-mail:lipengdcy@nuist.edu.cn

Li Peng (Corresponding author) received B. Sc. from Nanjing University of Science and Technology in 1990, M. Sc. from China University of Mining and Technology in 2003, and Ph. D. from Xi'an Jiaotong University in 2008, respectively. Now he is associate professor in Nanjing University of Information

Science & Technology. His main research interests include ultrasonic detection and imaging, signal and information processing, and meteorological element measurement methods and instruments.



叶方跃,2008年于南京信息工程大学获得学士学位,现南京信息工程大学硕士研究生,主要研究方向为声呐图像数据处理。

E-mail:yefangyue@163.com

Ye Fangyue received B. Sc. from Nanjing University of Information Science & Technology in 2008. Now he is a M. Sc. candidate in Nanjing University of Information Science and Technology. His main research interest includes sonar image data processing.