

一种多级窄带信号检测方法

陈敬军

(海军驻上海地区电子设备军事代表室, 上海 200233)

摘要: 提出了一种组合应用双门限检测、频率跟踪和专家系统来对窄带信号进行多级检测的方法, 并对影响窄带信号检测性能的因素进行了分析。该方法在不需事先知道窄带信号的强弱、数量、位置等信息的情况下, 能以高检测概率和低虚警概率对低信噪比窄带信号进行自动检测。另外, 由于该方法计算量较小, 适合于实时处理, 通过对海上实际目标数据的处理, 验证了该方法具有良好的宽容性。

关键词: 窄带检测; 频率跟踪; 双门限检测; 专家系统

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2018)-02-0281-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.03.016

A multi-stage detection method of narrowband signal

CHEN Jing-jun

(Military Representative Office of Electronic Equipment of the PLA Navy in Shanghai, Shanghai 200233, China)

Abstract: A multi-stage detection method of narrowband signal is given, which combines the double thresholds detection, frequency tracking, and expert system together. The factors that influence the detection performance of narrowband signals are analyzed. The analysis shows that this method can automatic detect narrowband signal with high detection probability and low false probability at low SNR without knowing their amplitude, position, and number of signals in advance. The proposed method is also robust in dealing with sea trial data and it is fit for real time processing because of small computation amount.

Key words: detection of narrowband signal; frequency tracking; double-threshold detection; expert system

0 引言

窄带信号检测一直是国内外的研究热点^[1-5]。

Thomas A. Lampert 等^[6]对窄带信号的各种检测方法进行了综述。为了提高低信噪比条件下的窄带信号检测性能, 需要利用多个时刻的谱值数据, 并经常将两种或多种方法进行组合, 其目的是利用每一个方法的优势, 使整个算法能够获得较好的处理性能^[6-9]。专家系统作为一种分类方法已经在声呐目标识别中取得了广泛应用, 并在声呐信号处理系统设计中得到应用^[12-15]。本文将双门限检测、目标跟踪、特征提取和专家系统组合成一个三级检测系统来提高窄带信号的检测性能, 并从理论上分析了影响算法性能的因素。

1 窄带信号的初始检测

窄带信号的初始检测是利用当前时刻计算出

的谱值与同设定的门限比较来实现的。记 X_k 为第 k 个频率点的谱值, μ_k 为用排序截断平均算法等估计出该点噪声均值, 按频率从低到高计算并判断是否满足

$$d_k = (X_k - \mu_k) / \mu_k > d_0 \quad (1)$$

式中, d_0 为第一个设定门限。当满足式(1)时, 表示检测到窄带信号。对于一个高信噪比的窄带信号, 可能会有连续的多个频率点上的值都满足式(1)。为了方便表示窄带信号的检测情况, 在连续满足式(1)的多个频率点中选择谱值最大的点表示检测到窄带信号, 而将其它点的谱值置零。当式(1)不满足时, 表示该频率点上没有检测到窄带信号, 对应的谱值同样置零。通过上述处理后, 当前时刻所有谱值非零点表示检测到窄带信号, 其对应的频率表示窄带信号的中心频率。

第一检测门限 d_0 的大小直接影响了窄带信号检测的检测概率 p_d 和虚警概率 p_{fa} 。 d_0 越小, 目标检测概率越大, 虚警概率也越大。为了检测低信噪比的窄带信号, 门限 d_0 应该选取较低的值, 则经过初始检测处理后的谱值非零点有相当一部分对应由随机起伏的噪声引起的虚警。

收稿日期: 2017-10-20; 修回日期: 2018-01-04

作者简介: 陈敬军(1971—), 男, 山东费县人, 博士, 高级工程师, 研究方向为信号处理、人工智能。

通讯作者: 陈敬军, E-mail: cjj_81@sina.com

2 窄带信号的第二级检测

第二级检测主要是利用多个时刻的目标检测情况来降低虚警概率。噪声和窄带信号在多个时刻的检测情况是不同的,可以利用其中的差异进一步剔除噪声点。考虑到窄带检测不允许太多的延迟时间,这里只利用 M 个时刻的目标检测情况。

第一检测门限 d_0 的值可以根据窄带信号检测要求的检测概率 P_d 和虚警概率 P_{fa} 确定^[1,3]。当窄带信号存在时,若在 M 个时刻中有 P 次检测到目标,则 P/M 可以看作是其检测概率估计值。若 M_0/M 为在初始检测中确定门限 d_0 时对应的检测概率,即当信噪比为 R_0 的窄带信号经过门限为 d_0 的第一级检测处理后,获得的检测概率为 M_0/M 。当信噪比高于 R_0 的窄带信号经过第一级检测处理后,在 M 个时刻内检测到该信号的次数 P 应不小于 M_0 。除此之外,对应窄带信号的谱值非零点一般出现在其中心频率附近,呈现出一定的连续性,随着时间的推移,各点的频率变化比较平滑。

而由噪声造成的虚假检测,其出现的位置是随机的,对应虚警的谱值非零点经常是一些孤立的点。为了能够利用多个时刻的目标检测情况剔除噪声点,可以对允许的最大虚警概率加以限制。若跟踪区域 S 内虚警出现的次数小于 M_0 ,即 $P_{fa} < M_0/A_s$,则对应噪声的谱值非零点在 M 个时刻内出现的次数一般要小于 M_0 , A_s 表示跟踪区域 S 内对应的总时间-频率点数。跟踪区域 S 的大小与允许的最大频率变化速率有关,若相邻两个时刻频率最大变化 H 个点,则对应的 $A_s = M \times (2 \times H + 1)$ 。

因此,可把 P 不小于 M_0 作为检测到信噪比高于 R_0 窄带信号的判据,在 M 时刻对所有的谱值非零点进行目标跟踪,统计目标检测次数,将 P 小于 M_0 的谱值置零。具体做法是:

(1) 搜索 M 时刻中的谱值非零点,若搜索到谱值非零点,则执行(2),若搜索到行尾则执行(4)。

(2) 若相邻时刻跟踪门内出现谱值非零点,选择最临近的谱值非零点继续跟踪,目标检测次数 P 增加 1;否则以估计的跟踪中心开始继续跟踪。目标跟踪到当前时刻或者连续无谱值非零点次数大于允许连续丢失门限 M_L ,目标跟踪结束。

(3) 若 P 小于 M_0 ,对应的谱值置零。

(4) 输出 M 时刻的数据,更新 M 个时刻的数据,从(1)开始重复执行,直至处理完所有数据。

经过第二级检测处理,超过门限 d_0 的噪声点被

大量剔除,虚警概率被显著降低。但对于高于 R_0 的窄带信号,其检测结果会被保留下来,检测概率基本不变。

3 窄带信号的第三级检测

海上的情况复杂多变,目标辐射噪声各种各样,背景噪声起伏较大。信号和背景起伏对窄带信号检测将产生显著影响^[8]。第三级检测主要利用提取出的目标特征应用专家系统来保证对窄带信号的检测性能,提高算法的宽容性。

随着目标距离的变化,声呐接收到的目标辐射噪声的强度、信噪比等变化范围很大,在前两级检测中通过选择相对的门限,已经使算法具有较好的宽容性。值得注意的是,经过第一级初始检测后检测概率小于 M_0/M 的窄带信号,即信噪比低于 R_0 的信号,经过第二级检测处理后,表示其被检测到的谱值非零点同样也会被剔除。为了提高对更低信噪比信号的检测能力,必须降低 d_0 和 M_0 。降低 d_0 在提高目标检测概率的同时虚警概率也同时提高了,而 M_0 的降低会影响虚假检测的剔除能力。若在 M 时刻内跟踪到的虚警数大于 M_0 ,就会作为对应窄带信号保留下来,所以第二级检测降低虚警的能力会降低。

为了能够在低信噪比条件下无论信号和背景是否起伏都能以高检测概率检测信号,可以先取两个低值门限,在进行目标检测的同时,估计出目标的信噪比、检测概率、稳定度等信息,然后利用提取出的目标特征,送入专家系统中,进一步判断保留的谱值非零点对应的是窄带信号还是噪声,以保证在各种情况下的检测性能。

对于在 M 时刻经过第二级检测处理后留下来的谱值非零点,可利用目标跟踪路径上的 P 点对应的谱值 X_i 、噪声均值 μ_i 和频率 F_i 等提取出相关的特征。文献[8-9]给出的线谱识别专家系统,是根据信噪比 R_{SN} 和检测概率 P_d 测度来进一步判断谱值非零点对应窄带信号还是噪声,其中

$$R_{SN} = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P (X_i - \mu_i) / \mu_i \quad (2)$$

$$P_d = P/M \quad (3)$$

该专家系统根据估计出的信噪比大小自动调整第二门限 M_0 ,使算法兼顾信号以及背景噪声不同的起伏情况。若要进一步检测更低信噪比的信号,可利用更多的特征(如频率光滑度等)提高虚警剔除能力。这样就通过允许算法在前两级检测中更

高的虚警来提高对弱信号的检测性能。若表征频率光滑程度的测度 C_F 为

$$C_F = \sum_{i=2}^{M-1} \{|F_{i+1} - F_i| + |F_i - F_{i-1}| - |F_{i+1} - F_{i-1}|\} \quad (4)$$

对应窄带信号和噪声的跟踪路径上的频率变化的光滑程度是不同的，前者显然更光滑。这样即使两条跟踪路径上的检测次数是相同的，利用两条路径光滑程度的不同也可以剔除虚假检测。虚警剔除能力的提高就可以在最终不提高虚警概率的情况下允许选择更低的门限 d_0 和 M_0/M 来检测更低信噪比的窄带信号。增加分类特征只要对文献[8-9]给出的线谱识别专家系统的规则作适当的修改就可以实现了。

经过专家系统识别后，只保留最终判定为正确检测到窄带信号的点。对一个窄带信号而言，可以把第一个谱值非零点对应的时刻作为信号的开始时刻，把后续跟踪过程中其后连续超过 M_L 个时刻无谱值的非零点作为窄带信号的结束时刻。在窄带信号起止时刻之间，无论是否检测到目标，信号都是存在的。对于中间漏检的时刻，可在该时刻跟踪路径上对应的点上用一个非零值来表示漏检的信号。原本漏检的时刻现在已经明确信号存在，该操作无疑会提高窄带信号的检测概率。

4 影响算法性能的因素分析和门限选取方法

4.1 偏转量 d 的计算

水声信号中的窄带信号可以用正弦信号来表示。若用 H_1 代表窄带信号存在， H_0 代表信号不存在，只存在噪声的情况下，接收到的信号 $x(n)$ 可以定义为

$$\begin{cases} H_1: x(n) = A \exp(j2\pi fn / f_s) + g(n) \\ H_0: x(n) = g(n) \end{cases} \quad (5)$$

式中： A 为窄带信号幅度； f 为窄带信号频率； f_s 为采样频率。为了便于分析，假定 $g(n)$ 表示均值为 0、标准差为 σ_g 的高斯白噪声。功率谱 $I(k)$ 的计算是用 K 次谱样点值相加平均过程来实现的：

$$I(k) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K |Y_i(k)|^2 \quad (6)$$

式中， $Y_i(k)$ 是利用输入序列 $w(n)x[n+(i-1)N/R]$ ，($n=0, \dots, N-1$) 计算的第 i 个离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)第 k 个频率点的值：

$$Y_i(k) = \sum_{n=0}^{N-1} w(n)x[n + \frac{(i-1)N}{R}] \exp(-j\frac{2\pi kn}{N}) \quad (7)$$

其中， $w(n)$ 是窗函数， R 定义为 $R=N/N_{\text{new}}$ ， N 为离散傅里叶变换的长度，但每一次计算离散傅里叶变换时，输入序列只移动了 N_{new} 个样点。

定义描述由于窄带信号存在而产生的偏转量 d ：

$$d = \frac{E\{I(k)|H_1\} - E\{I(k)|H_0\}}{\sigma\{I(k)|H_0\}} \quad (8)$$

其中， $E\{I(k)|H_1\}$ 为窄带信号存在时短项积累的信号均值。 $E\{I(k)|H_0\}$ 、 $\sigma\{I(k)|H_0\}$ 分别为窄带信号不存在、只有噪声存在时短项积累的均值和标准差。由 $I(k)$ 的定义可得^[1,8]：

$$E\{I(k)|H_0\} = \sigma_g^2 \sum_{n=0}^{N-1} w^2(n) \quad (9)$$

$$\sigma\{I(k)|H_0\} = \frac{\sigma_g^2 \sum_{n=0}^{N-1} w^2(n)}{\sqrt{K/\alpha}} \quad (10)$$

$$E\{I(k)|H_0\} = \sqrt{K/\alpha} \cdot \sigma\{I(k)|H_0\} \quad (11)$$

其中，

$$\alpha = 1 + \frac{2}{K^2} \cdot \sum_{i=1}^K (K-i) \cdot [\sigma_g^2 \sum_{n=0}^{N-1} w(n)w(n + \frac{iN}{R})]^2 \quad (12)$$

$$\left[\sum_{n=0}^{N-1} w^2(n) \right]$$

同样可以推导出：

$$E\{I(k)|H_1\} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K E\{|Y_i(k)|^2\} =$$

$$\left| A \cdot \sum_{n=0}^{N-1} w(n) \cdot \exp[j2\pi n(\frac{f}{f_s} - \frac{k}{N})] \right|^2 +$$

$$\sigma_g^2 \sum_{n=0}^{N-1} w^2(n) \quad (13)$$

把式(9)、(10)、(13)代入式(8)，得：

$$d = \frac{\left| A \cdot \sum_{n=0}^{N-1} w(n) \cdot \exp[j2\pi n(\frac{f}{f_s} - \frac{k}{N})] \right|^2}{\frac{\sigma_g^2 \sqrt{\alpha}}{\sqrt{K}} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} w^2(n)} \quad (14)$$

对信号进行谱分析时加时间窗，在降低旁瓣和提高谱分辨率的同时，增加了主瓣的宽度，让更多的噪声通过检测器，使检测性能降低。此检测性能损失可以用窗函数的等效噪声带宽 B_n 来表示：

$$B_n = \frac{N \cdot \sum_{n=0}^{N-1} w^2(n)}{\left[\sum_{n=0}^{N-1} w(n) \right]^2} \quad (15)$$

扇边效应损失(Scalloping Loss, SL)是加时间窗对谱估计的另一个影响。由于加时间窗，导致窗函数的频率响应的主瓣只是在频率点的中心达到最大，而在相邻两频率点的中心对应的频率上达到最小。如果一个正弦信号的频率恰巧是相邻频率点的

中间值，则产生了最大的扇边效应损失。扇边效应损失定义为

$$L_S = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_{n=0}^{N-1} w(n)^2}{\left[\sum_{n=0}^{N-1} w(n) \exp[j2\pi n(\frac{f}{f_s} - \frac{k}{N})] \right]^2} \right\} \quad (16)$$

把式(15)、(16)代入式(14)可以得到：

$$d = \frac{A^2}{\sigma_g^2 / f_s} \cdot \frac{1}{f_s / N} \cdot \frac{\sqrt{K_I}}{B_n} \cdot \frac{1}{10^{10}} \quad (17)$$

其中， $K_I = K/\alpha$ 称为有效的独立样点数，与累加的平均次数和数据重叠程度有关。

4.2 第一、二级检测门限的选取方法

第一检测门限的选取直接影响了窄带信号的检测概率和虚警概率，下面推导 d_0 与检测概率和虚警概率的关系。若 ϕ_N 表示噪声的概率密度函数，对应的均值为 M_N ， ϕ_{S+N} 表示噪声加信号的概率密度函数，对应的均值为 M_{S+N} 。本文假定 ϕ_N 是高斯分布，在小信噪比下可近似认为 ϕ_{S+N} 是高斯分布，并且其标准偏差为 $\sigma = \sigma_N \approx \sigma_{S+N}$ ，则虚警概率 p_{fa} 为

$$p_{fa} = \int_{\lambda}^{\infty} \phi_N \left(\frac{x - M_N}{\sigma} \right) dx = \int_{\frac{\lambda - M_N}{\sigma}}^{\infty} \phi(x) dx \quad (18)$$

所以，

$$p_{fa} = 1 - \int_{-\infty}^{\frac{\lambda - M_N}{\sigma}} \phi(x) dx = 1 - \Phi \left(\frac{\lambda - M_N}{\sigma} \right) \quad (19a)$$

其中， Φ 定义为

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy$$

同样可以求出，

$$p_d = 1 - \Phi \left(\frac{\lambda - M_{S+N}}{\sigma} \right) \quad (19b)$$

可把上面的 19(a)、19(b)改写成如下形式：

$$\frac{\lambda - M_N}{\sigma} = \Phi^{-1}(1 - p_{fa}) \quad (20)$$

$$\frac{\lambda - M_{S+N}}{\sigma} = \Phi^{-1}(1 - p_d) \quad (21)$$

根据偏转量的定义可知：

$$d = \frac{M_{S+N} - M_N}{\sigma} = \Phi^{-1}(1 - p_d) - \Phi^{-1}(1 - p_{fa}) \quad (22)$$

将要求的虚警概率 p_{fa} 和检测概率 p_d 代入式(22)，即可计算出要求的偏转量值。比较式(1)、(8)、(11)可知，第一检测门限 d_0 可由式(22)求出的 d 值乘上 $\sqrt{K/\alpha}$ 求得，即：

$$d_0 = \sqrt{K/\alpha} \cdot d \quad (23)$$

在第二级检测过程中，窄带信号经过门限为 d_0 的第一级检测处理后，若其检测概率不小于 M_0/M ，谱值非零点会判为对应窄带信号保留下

来，后续通过对漏检时刻确认信号存在来提高窄带信号的检测概率；而对于检测概率小于 M_0/M 的窄带信号，会判为对应噪声点被置零，检测概率反而会进一步降低。

而对于噪声而言，若 $p_{fa} < M_0/A_S$ ，则跟踪区域 S 内虚警出现的次数小于 M_0 ，在第二级检测过程中对应的谱值非零点会判为对应噪声而置零，虚警概率降低；在第一级检测过程中，若虚警概率过高，如 $p_{fa} > M_0/A_S$ 时，会出现跟踪区域内虚警出现的次数不小于 M_0 的情况，则经过第二级检测过程中对应的谱值非零点会判为对应窄带信号保留下来，降低虚警的能力会降低。

为了便于分析在什么情况下可以同时以高检测概率和低虚警概率检测窄带信号，我们利用了最小可检测信号的概念。最小可检测信号定义为在给定的虚警概率和检测概率的情况下，系统能够完成所需的检测功能时输入端用分贝数表示的 1 Hz 带宽内的信噪比。由于白噪声信号的功率谱密度是 σ_g^2/f_s ，而 A^2 是复正弦信号的功率，则最小可检测信号为

$$S_{MD} = 10 \lg \left(\frac{A^2}{\sigma_g^2 / f_s} \right) \quad (24)$$

在实际情况下，模数转换、滤波以及不合适的噪声均值估计和去除等在实现时会带来一定的损失，式(24)中通过加入 L_p 来表示上述几个因素的影响。由式(17)、(24)得到的最小可检测信号的大小为

$$S_{MD} = 10 \lg(f_s / N) + 10 \lg B_n + SL + L_p - 5 \lg K_I + 10 \lg d \quad (25)$$

在上面影响最小可检测信号的因素中， $10 \lg d$ 可由检测概率 p_d 、虚警概率 p_{fa} 确定，其它与计算功率谱时的选择的时间窗、累加次数等因素有关。在其它因素确定后，若将要求的虚警概率 $p_{fa} = M_0/A_S$ 和检测概率 $p_d = M_0/M$ 代入式(22)、(23)、(25)，即可计算出最小可检测信号幅值和第一门限 d_0 的值。比此最小可检测信号强的窄带信号经过第二级处理后，同第一级检测结果相比，噪声点基本剔除干净，虚警概率显著降低；检测概率基本不变，但经过后续对漏检时刻确认信号存在可进一步提高检测概率。前两级检测因为使用了两个检测门限而被称为双门限检测。

5 试验数据分析

检测性能的提高可以体现在几个方面：(1) 需要的先验信息少；(2) 降低了虚警概率；(3) 提高了

目标检测概率;(4)具有很好的宽容性;(5)可以检测更低信噪比的窄带信号。本文给出的窄带信号多级检测算法在进行窄带信号检测时并不需要任何先验信息,通过剔除噪声点降低了虚警概率,通过确认漏检时刻信号存在提高了目标检测概率,而低检测门限和专家系统的组合使用,又使算法在各种情况下具有很好的宽容性。本文给出的多级检测算法可以同时以高检测概率和低虚警概率检测低信噪比的窄带信号。

用海上实际录取的20多个目标数据验证了算法的性能,这些数据还来自几部不同的声呐。不需要作任何参数调整,就获得了非常好的处理结果,算法体现出很好的宽容性。图1给出了先后跟踪不同目标的处理结果,图中横坐标表示频率,纵坐标表示时间。算法中所用的参数如下: $d_0=1$, $M=20$, $M_L=5$, $M_0=9$ 。

图1(a)是利用海上试验数据计算出的原始LOFAR图,用256级灰度表示幅度;图1(b)是经过多级检测算法处理后的结果,为了便于观察,所有的表示检测到窄带信号的谱值非零点全部用白色亮点表示。可以看出本文给出的算法能够同时以高检测概率和低虚警概率检测低信噪比的窄带信号。

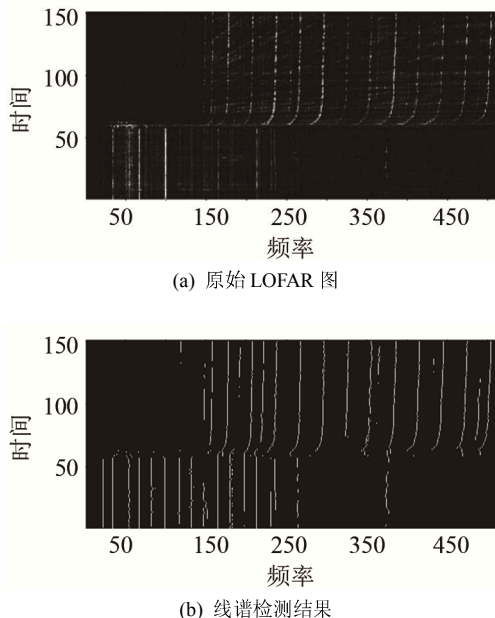


图1 海上先后跟踪两个不同目标对应的LOFAR图和多级检测算法处理后的结果

Fig.1 (a) the original LOFARgram corresponding to two different targets successively tracked at sea, and (b) the processing result of multi-stage detection method

6 结论

本文组合应用双门限检测、目标跟踪和专家系

统技术实现了对窄带信号的多级检测。算法利用了多个时刻的谱值信息,与只利用单个时刻谱值进行窄带信号检测的方法相比,明显降低了虚警概率、提高了检测概率,能同时以高检测概率和低虚警概率自动检测窄带信号。另外本文给出的检测方法还具宽容性好、计算量小的优点。

参 考 文 献

- [1] NIELSEN R O. Sonar signal processing[M]. Artech House, Inc. 1991.
- [2] 李山, 王德俊, 王海斌. 一种基于线谱特征函数提取 LOFAR 图线谱的方法[J]. 声学技术, 2016, 35(4), 373-377.
LI Shan, WANG Dejun, WANG Haibin. An approach to lofar-gram spectrum line detection based on the spectrum line feature function[J]. Technical Acoustics, 2016, 35(4), 373-377.
- [3] GUNES T, ERDÖL N. HMM based spectral frequency line tracking: improvements and new results[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2006(2): 673-676.
- [4] LAMPERT A, O'KEEFE S E M. A detailed investigation into low-level feature detection in spectrogram images[J]. Pattern Recognition, 2011, 44(9): 2076-2092.
- [5] LAMPERT T A, O'KEEFE S E M. On the detection of tracks in spectrogram images[J]. Pattern Recognition, 2013, 46(5): 1396-1408.
- [6] LAMPERT T A, O'KEEFE E M. A survey of spectrogram track detection algorithms[J]. Applied Acoustics, 2010, 71: 87-100.
- [7] 陈敬军, 陆佳人. 被动声呐线谱检测技术综述[J]. 声学技术, 2004, 23(1): 57-60.
CHEN Jingjun, LU Jiren. A review of techniques for detection of line-spectrum in passive sonar[J]. Technical Acoustics, 2004, 23(1), 57-60.
- [8] 陈敬军. 鱼雷目标检测和识别技术研究[D]. 南京: 东南大学博士学位论文, 2004.
CHEN Jingjun. The research on the technique about detection and recognition of torpedo[D]. Nanjing: Southeast University, 2004.
- [9] 陈敬军, 孟昭文, 陆佳人. 模糊专家系统在线谱检测中的应用研究[J]. 船舶工程, 2004, 26(6): 67-70.
CHEN Jingjun, MENG Zhaowen, LU Jiren. Application of fuzzy expert system in detection of line_spectrum[J]. Ship Engineering, 2004, 26(6): 67-70.
- [10] ABEL J S, LEE H J, LOWELL A P. An image processing approach to automated LOFARgram to frequency tracking[C]// ICASSP-92, II-561-564.
- [11] JAUFFERET C, BOUCHET D. Frequency line tracking on a lofargram: an efficient wedding between probabilistic data association modelling and dynamic programming technique[J]. IEEE, 1997, 486-490.
- [12] KUMMERT A. Fuzzy technology implemented in sonar systems[J]. IEEE J. of Oceanic Eng., 1993, 18(4), 483-490.
- [13] MAKSYM J N, BONNER A J, DENT C A, et al. Machine analysis of acoustical signals[J]. Pattern Recognition, 1983, 16(6): 615-625.
- [14] RAJAGOPAL R. Target classification in passive sonar -- an expert system approach[C]//Proc. of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1990: 2911-2914.
RAJAGOPAL R, KUMAR K A, RAO P R. An integrated passive target classification[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1994: II313-316.