

一种基于功率谱特征参量的水中目标辐射噪声 非母板匹配分类识别方法

田 甜[†] 李启虎 孙长瑜

(中国科学院声学所 北京 100080)

摘要 本文阐述了一种非母板匹配的水中目标辐射噪声分类识别的思想、技术路线及算法的计算机实现关键技术。该算法基于提取水中目标辐射噪声信号功率谱中的最强谱带位置、线谱位置、线谱根数、线谱平均间隔等特征参量,通过特定处理后,直接给出识别结果,不需要附带庞大数据库。经试验验证,该技术突破了传统的母板匹配目标识别的算法思想,能够适用于复杂海况,做到宽容性匹配。识别效率高,识别率达到试验预期要求。

关键词 非母板匹配, 特征参量, 宽容性, 识别效率, 识别率

An algorithm for the non-motherboard-matching identification of the radiated noise of underwater target

TIAN Tian LI Qi-Hu SUN Chang-Yu

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract In this paper, a new idea about the identifying of the noise of underwater target is described. It's based on the pick-up of the characteristic parameters (such as the position of the frequency band, the line spectrum and others) of the noise signal radiated from an underwater target. The algorithm is non-motherboard-matching, which is completely different from the earlier ones in this area. It gives the result directly without the need of searching the motherboard database. As a result, this arithmetic matches most situations of the ocean. The efficiency of the identification is in a high level. And the identifying rate accords with our anticipation in an ocean.

Key words Non-motherboard-matching, Characteristic parameters, Allowance, Efficiency of identification, Identifying rate

2005-03-22 收稿; 2006-05-08 定稿

作者简介: 田甜 (1979-), 男, 成都市人, 研实员, 工学硕士, 研究方向: 水声信号处理、嵌入式操作系统等。

李启虎 (1939-), 男, 研究员, 博士生导师, 中国科学院院士, 孙长瑜 (1954-), 男, 满族, 研究员, 博士生导师。

[†] 通讯联系人 Email: tt@ocean.ioa.ac.cn

1 引言

水面 / 水下被动目标辐射噪声识别一直是水声信号处理领域中一项难度很大的课题, 这是因为它不仅包含了船舶类型和大小的识别, 而且船舶噪声又随海况和工况的不同是时变的; 另外, 分类器在实际工程中的可应用性也一直困扰着人们。但另一方面, 它又是声纳设计的一个重要和必要的内容, 是主被动声纳必须具备的功能。对它的研究一直受到国内外学术界及军事部门极大的关注。由于对这些目标的分类识别直接关系到作战指挥系统的决策能力, 所以目标识别技术至关重要。

目前理论方面的文章都是基于神经网络理论、混沌理论、聚类分析等方面的, 其基本框架是需要一批大信噪比的样本对其加以训练, 需要“学习”。而实际情况往往是微弱信号, 信噪比很低, 那种在大信噪比下学习得到的知识、规则用在微弱信号下, 不能发挥有效作用。并且, 即使这种依靠大信噪比样本学习的办法可行, 如何得到样本呢? 特别是敌方水下目标辐射噪声的样本是高度机密的, 我们无法得到。

另一方面, 目前应用于实际环境的目标识别系统大都是基于母板匹配的最小邻近原则来进行识别的。需要附带一个庞大的母板数据库, 在识别时需要将提取到的信号特征参量与数据库中的母板数据进行逐一对比, 得到判决结果。这种方法一则大大牺牲了识别效率, 二则在匹配的宽容性上大打折扣。海洋的水声信道非常复杂, 信号在这样的信道中经过长距离传输后能够被正确识别, 则对系统的宽容性要求很高。因此综合来看, 目前的目标识别系统仍然处于摸索阶段, 尚不能满足充当声纳决策系统的实际应用要求。

因此, 我们在非母板匹配的全新目标识别思想上做出了一些尝试, 力图找到避免上述不足的方法, 提高匹配的宽容性, 同时提高识别效率。

我们的基本思路是: 通过对相当数量的试验数据进行研究、归纳和总结, 寻找到一个适合判决的目标特征参量向量, 并总结出这个向量的判决阈值向量, 在具体识别过程中, 不需要再将提取到的信号特征与母板数据进行比较匹配, 而是通过判决阈值筛, 直接得到判决结果。这样, 在判决效率和匹配的宽容性上均有较大提高。我们在最近某型声纳预研项目的海上试验中对这种算法思想进行了验证, 取得了较为理想的效果。

下面具体阐述这种非母板匹配的算法的关键技术思想。

2 算法描述

2.1 时域检测^[1]

时域检测利用声纳系统后置处理的方位历程显示结果。我们用人工干预的方法, 人为选定波束号, 将该波束的单波束信号作为目标识别的信号源。设采样周期是 T_s , 音频输出和后置处理输出的波束数均为 M (两者可以不同, 但经过适当内插处理, 即可实现两者相同, 并且不影响后面的应用), 第 i 路信号是

$$x_i(k) = x_i(kT_s), \quad i = 1, \dots, N.$$

设波束间隔为 $\theta_0 = 360^\circ/M$, 第 m 号波束的延时量为 $\tau_i(m\theta_0)$, 于是, 第 m 号波束的音频信号表达式应为

$$u_m(k) = \sum_{m=1, \dots, M} x_i[kTs - \tau_i(m\theta_0)] / N, \quad (1)$$

图 1 是时域检测的原理框图。在现有声纳系统中, 听测仍然是一个重要的侦察手段。但本文所述的目标识别模块采用的是方位历程显示和目标搜索后得到的单波束信号; 输出信噪比解算是为了获得识别结果的置信度, 不是本文讨论的主要问题。

2.2 频域特征提取

在时域检测求得 m_0 号波束作为候选波束之后, 我们利用 $u_{m_0}(k)$ 的信息, 提取频域特

征。

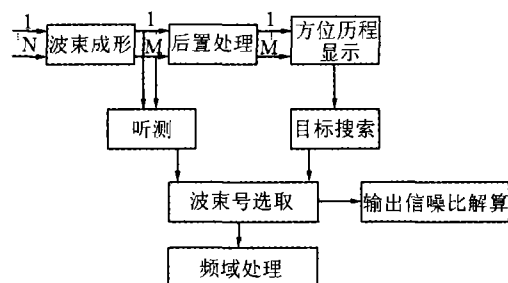


图 1 时域检测原理图

2.2.1 频谱分析

第一步是对信号做谱分析和平滑处理。假设信号采样率为 10kHz, 对信号作 2048 点 FFT, 这样, 分辨率为 $10000/2048=5\text{Hz}$, 足够小, 能够用于线谱提取。然后对频谱序列进行 16 次平滑, 平滑的目的是减少毛刺, 同时增强目标特征量^[2]。

设输入的时域信号为 $u_{m0}(k)$, 经过 2048 点 FFT 后, 频域序列表示为 $U_{m0}(l)$, 其中 $l=0, 1, 2, \dots, 2047$ 。16 次平滑之后, 得到:

$$\bar{U}_{m0}(l) = \left(\sum_{p=0}^{15} |U_{m0}^{(p)}(l)| \right) / 16, \quad l = 0, \dots, 2047 \quad (2)$$

$\bar{U}_{m0}(l)$ 序列就是我们需要进行分析并从中提取目标特征参量的序列。

2.2.2 均衡处理^[1,3,4]

第二步是 OTA 均衡处理。均衡处理的目的是去掉无关的直流背景分量, 而保留最强谱带和线谱等特征信息。具体算法如下:

由于频段方面的选择, 我们不需要从 $l=0$ 开始, 一直处理到 $l=1023$ 。例如, 如果用频段 200Hz~10,000Hz, 则 l 从 11 至 633。

在极端情况下, 如果需要对 $\bar{U}_{m0}(l)$ 从 $l=0$ 作起, 那么先要对 $\bar{U}_{m0}(l)$ 进行数据扩展, 以避免 OTA 处理的边缘效应。为简单起见, 我们把 $\bar{U}_{m0}(l)$ 中作均衡处理, 并拿去作频域分析、特征提取的数据记作

$$Y(1), \dots, Y(P)$$

假定均衡处理的窗口长度为 $2K+1$ ($K \ll P$) 对 $Y(1), \dots, Y(P)$ 的数据扩展处理是

$$Y(K+1), \dots, Y(2), Y(1), Y(2), \dots, \\ Y(P), Y(P-1), \dots, Y(P-K)$$

实际作均衡时仍从 1 到 P 进行, 由于数据事先已经进行了扩展, 就不必担心边缘点的问题。这个新的序列我们记作

$$Z(1), Z(2), \dots, Z(K), Z(K+1), \dots, \\ Z(K+P), Z(K+P+1), \dots, Z(2K+P)$$

显然 $Z(K) = Y(1), \dots, Z(K+P) = Y(P)$, 等等。

对 K 至 $K+P$ 的每一个 $Z(K)$ 作点到点的均衡处理, 算法如下:

对于 K 取数组

$$Z(k-K), \dots, Z(k), \dots, Z(k+K) \text{ 共 } 2K+1 \text{ 个点,}$$

把它们重新从小至大排列, 得到

$$V(1) \leq V(2) \leq \dots \leq V(2K+1)$$

求出

$$\bar{V} = \sum_{k=K+1}^{2K+1} V(K) \quad (3)$$

如果

$$Z(k) \geq \alpha \bar{V}, \text{ 令 } NEW Z(k) = Z(k)^{-\bar{V}} \\ Z(k) < \alpha \bar{V}, \text{ 令 } NEW Z(k) = 0 \quad (4)$$

其中, α 是一个门限值, 我们称之为均衡门限。再重新设置 $Y(1), \dots, Y(P)$ 的值, 得到

$$NEW Y(1) = NEW Z(K) \\ NEW Y(P) = NEW Z(K+P) \quad (5)$$

为方便起见, 我们把新的 $NEW Y(p)$ 序列, 仍记作

$$Y(p), \quad p = 1, \dots, P$$

图 2 中图组是均衡前后的一段舰船辐射噪声谱,可以看出,直流背景分量被很好地去掉,留下了线谱等有用的信息。

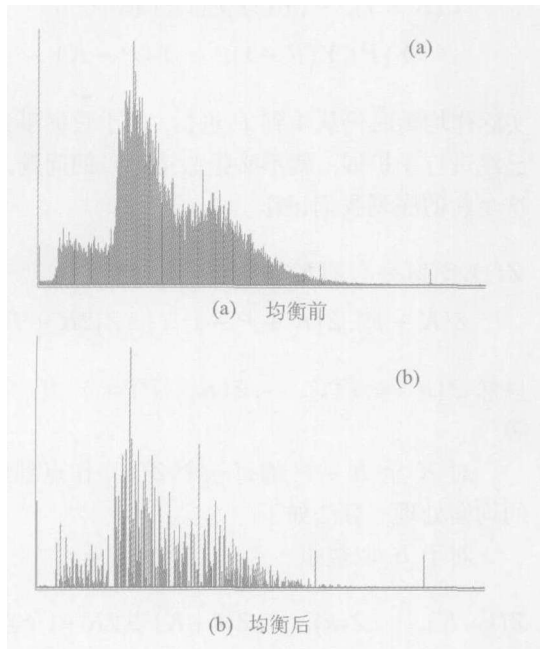


图 2 均衡处理效果图

2.2.3 特征提取

第三步是特征提取,我们提取的是最强谱带位置、线谱根数等 4 个目标特征参量,由于篇幅限制,在此我们只介绍最强谱带位置和线谱的提取算法。

先确定最强谱带位置,流程如下:

对 $Y(l)$, 求出 $Y(l+k)$ 中第一个使 $Y(l+k) = 0$ 的 k , 设为 k_0 , 如果 $k_0 \geq M$ (M 为一个常数,表示窗口长度),令 $k_0 - l = A_1$, 这样,我们就求出了第一个谱带位置 A_1 , 即 $Y(l), \dots, Y(A_1)$; 如果 $k_0 < M$, 则不算作谱带,继续向下搜索,再从 $Y(k_0+l)$ 开始,搜索第一个非零的 $Y(k)$, 设为 $Y(p_1)$, 再求 $Y(p_1+k)$ 中第一个使其为 0 的 k , 设为 k_1 , 如果 $k_1 \geq M$, 则令 $k_1 - l = A_2$, 我们求得第二个谱带 A_2 , 即 $Y(p_1), \dots, Y(p_1 + A_2)$ 。以此类推,直到 $Y(P-M+1)$ 为止。

假设我们找到了 q 个谱带, $A_1, \dots, A_q$, 把

他们中使 $Y(p)$ 最大的 p 选出来, 设为 p_0 , 于是 $Y(p_0)$ 就是最大谱带的谱值, p_0 就成为最强谱带位置。记作 $x_1 = p_0$ 。

然后介绍线谱的确定方法: 对任一 $Y(k)$, $k = 1, \dots, P$, 如果

$$\frac{\{Y(k) - \sum_{i=1}^N [Y(k-i) + Y(k+i)]/2N\}}{\left\{ \sum_{i=1}^N [Y(k-i) + Y(k+i)]/2N \right\}} \geq \beta \tag{6}$$

我们就认为 $Y(k)$ 是线谱。其中 β 是一个门限值,我们称之为线谱门限, N 是一个常数,表示窗口长度。

在所有线谱中强度最大的线谱,其谱值记为 $Y(v_1)$, 则 v_1 就是最强线谱位置, 记作 $x_2 = v_1$ 。

2.2.4 判决^[5~7]

目标特征参量提取完毕之后,就进入判决过程。通过对大量试验数据的分析归纳和总结,我们得到了一个判决阈值筛,对于上面提到的 x_1 和 x_2 ,我们分别对水面舰艇、潜艇、商辅船进行研究,得到这些目标类型中这两个目标特征参数的表现特点,总结出各自的判决阈值。判决方法可以通过表 1 中的方式表示出来:

表 1 判决规则示意

判决	潜艇	水面舰艇	商辅船	海洋噪声
	$x_1 < a_1$	$x_1 \geq a_2$	$x_1 < a_3$	
判据	$x_2 < b_1$	$x_2 \leq b_2$	$x_2 \leq b_3$	其它
	...	...	...	

表中, a_1 、 b_1 等参数就是通过研究,总结出来的判决阈值筛。例如,潜艇的最强谱带频率较之水面作战舰艇偏低,则 a_1 为潜艇谱带位置的上限,在其他条件确定的情况下,只要满足最强谱带位置数值小于该上限的,就可以判定为潜艇。

这种判决方法仅仅是将对信号处理的结果进行几个非常简单的数值比较,就可以得出

结论，而不需要对母板数据进行繁冗的匹配计算，大大提高了识别效率。

频域分析和判决的总体流程如下图所示：

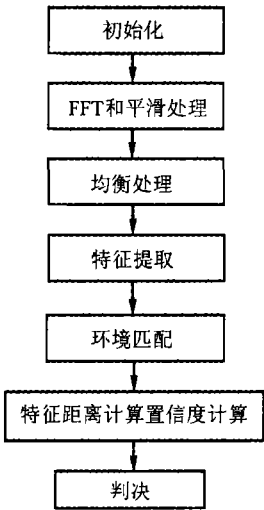


图 3 频域处理和判决流程

图 3 中，环境匹配这个流程是为了有效抑制本舰噪声，增加信号信噪比而专门设置的，有其一套特殊的算法，不是本文讨论的范畴。

3 实验结果

上述算法思想应用到实验室的仿真环境中，做到了较高识别率。其中，水面舰艇识别率 96.5%；潜艇识别率 87.2%；商辅船识别率 98%；

在某型声纳预研项目的海上试验中，我们

将该算法制成功能模块，参与了试验，在实际条件有限的情况下，测得对本舰自噪声判定成功率 100%（识别三次，正确三次，每次对一段 8 秒长的数据进行识别，下同）；对目标水面舰艇判定成功率 66.7%（识别三次，正确二次）；对目标潜艇判定成功率 66.7%（识别三次，正确二次）。

4 结束语

目标识别技术是有相当难度的一个研究课题，上述非母板匹配的目标识别思想是我们通过对现有技术的研究分析，找到不足之处之后，做出的一些创新的尝试。通过一系列的试验，我们已经摸索到了一些方法，但远不是完备的。不过我们应该看到，在传统的母板匹配方法效果停滞不前的情况下，非母板匹配这个思想应该值得发展。

参 考 文 献

- 1 李启虎. 数字式声纳设计原理, 合肥: 安徽教育出版社, 2002. 360~370.
- 2 沈凤麟, 叶中付, 钱玉美. 信号统计分析与处理, 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001. 439~446.
- 3 胡广书. 数字信号处理, 北京: 清华大学出版社, 2003. 118~121.
- 4 程佩青. 数字信号处理教程, 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 1995. 215~252.
- 5 章新华. 哈尔滨工程大学博士后研究报告, 1999.
- 6 Rajagopal R, Saankaranarayanan B, Ramakrishna Rao P. *IEEE ICASSP-90*, 5:2911~2914.
- 7 Foley D H. *IEEE trans IT*, 1992, 18(2):618~626.