

⑧ 38-64

水下目标识别技术的研究

景志宏 讲师 * 林钧清 研究员

* * 钱建立 讲师 赵俊渭 教授

(西北工业大学航海工程学院)

(* 船舶系统工程部)

(* * 空军电讯工程学院)

摘要: 本文分析了水下目标识别技术的研究现状,阐述了水下目标识别技术的基本原理,为了提高水下目标识别的正确率,给出了三种新的研究方法,最后提出了水下目标识别系统面临的主要困难与亟待解决的问题。

关键词: 特征提取 目标识别 分形

声纳

水声对抗

1 引言

水下目标识别

水下目标识别是现代声纳系统与水声对抗的一个重要的组成部分,它的研究一直受到许多学者、工程技术人员以及军事部门的极大关注^[1-5,7-13]。

水下目标识别是潜艇及水面舰艇在海域中,先敌发现并有效地对敌进行水声对抗,先敌使用武器攻击,克敌制胜的前提,也是我海军目前各型潜艇和水面舰艇急需解决的关键技术。然而,如何根据声纳接收到的舰船辐射噪声和目标反射回声对目标进行分类识别,是长期困扰人们的问题。传统的识别方法根据声纳员的经验和主观判断来确定目标的类型,此法有一定弊病。在当今作战环境下,随着各种传感器形式的增多、各种信息量的增大、水下运载体所产生的噪声信号的降低以及更高级灵敏声纳系统的出现,目标识别问题变得越来越复杂。

近十多年来,声纳的探测距离和定位精度

有了显著的提高,各式各样的舰壳声纳、吊放声纳、拖线阵声纳正在不断地更新。人工识别与先进的探测技术相比,显得极不相称。实际上,目标识别问题已经成为当前水声装备技术发展的主要障碍^[21,21]。如何利用声纳信号本身来完成目标自动识别是迫在眉睫的重大研究课题,显然只有兼备探测与识别功能的新型声纳才能完成高新技术条件下我国海军对敌作战的艰巨任务。

2 水下目标识别在国外的研究状况^[14,15]

水下目标识别是随着声纳技术、信号检测理论、计算机技术等进步而发展起来的。

50年代初,随着信息论、信号检测理论、计算机技术等的发展,水声信号处理迅速发展为一个十分活跃的独立分支。

60年代,快速傅立叶变换的提出和发展,使得声纳实时信号处理成为可能,自适应波束

* 收稿日期:1998-10-14

— 38 —

《舰船科学技术》1999.4

形成技术得到发展。序贯检测用于声纳自动判决,提高了后置数据处理能力。

70年代,声场最佳时空处理理论、自适应信号处理、现代谱估计等促进了目标识别技术的发展。

80年代以来,人工智能、计算机科学、信息科学、认知科学以及脑神经科学等均为水下目标识别提供了强有力的分析和处理手段,使得目标识别在特征提取及分类识别上取得了可喜的成绩。

在被动目标识别研究领域,美国早期曾推出一种称为BQQ-3的潜用声纳目标分类系统,采用的是1/3倍频程分析方法。70年代中期,美国海军又装备了以拖线阵为主体的BQQ-5潜用声纳,工作频段可降至100Hz,以检测舰船噪声的低频线谱,并配有频率分析器,用于识别目标性质。

80年代中期已有海上目标识别系统装备海军舰船,例如MITRE公司开发的用于海军指挥控制机构的专家系统就具有目标识别的功能。美国斯坦福大学研制了HASP/SLAP潜用声纳目标识别系统,之后,美国的MK-II型核潜艇及英国的KAF5型常规潜艇均装备了这一水下目标识别系统。HASP由有经验的工作人员识别线谱,并变换成符号描述。而SLAP则抛弃了人的参与,将前端信号处理算法和符号推理部分组成一个耦合系统,前端信号处理完成信号到符号的变换,符号推理部分利用前端结果进行推理,同时控制着前端信号处理算法。

日本研制出一种代号为SK-8的海岸预警

体系,中心部件为一台FFT系统,采用比较方法将目标信号与存储的八个样本进行模板匹配,以判别目标性质。其工作频段为0-10Hz、50Hz、200Hz、400Hz、800Hz、1kHz、2kHz、4kHz,并采用时间平均来提高输出信噪比。此外,还提出一种称为MVSACII和“音纹”的识别方法。MVSA-CII方法旨在检测目标的谱和空间声信息,这些信息包括窄带、宽带、调制宽带信息及其空间影响,宽带调制信息对应的载波波段为1-2kHz、2-4kHz、4-8kHz。

加拿大的J.N. Maksym和A.J. Bonner等人研究开发了INTERSENSOR舰船辐射噪声的信号分析专家系统。法国汤姆逊公司生产的TSM-8202声纳浮标也具有目标声源分类功能,使用的是LOFAR和DEMON特性(即信号的低频线谱和包迹特性)。

最近,英国SD-Scicon公司还开发了一种声纳目标分类系统,该系统采用人工神经网络结构,综合了有监督和无监督两种学习原理。

资料报道,在主动识别领域,美国早期装备的SQS-23声纳就已具有主动目标识别的功能,另一种猎雷声纳SQQ-14也具有目标分类功能。后来美海军的SQS-26声纳也多次进行了目标识别实验。以资料来看,一些外军鱼雷自导系统业已具备识别舰艇要害部位的能力。

3 水下目标识别系统的基本原理

水下目标识别系统的总体框架如图1所示。

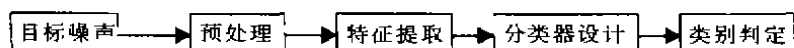


图1 总体框架

3.1 目标辐射噪声

水下航行体的辐射噪声通常由水动力噪声、机械噪声及螺旋桨空化噪声三大部分组成。其中机械噪声及螺旋桨空化噪声在大多数情况下是主要的辐射噪声。噪声谱有两种类型:一种是有连续谱的宽带噪声,另一种是具有非连

续谱的单频噪声,这种噪声由出现在离散频率上的线谱组成。水下航行体的辐射噪声在很大的频率范围内由这两类噪声叠加而成。

3.2 目标特征提取

所谓特征提取就是对目标的某些物理性质进行数学描述,具体地讲就是对原始数据进行

变换,得到最能反映目标分类的本质特征。一般我们把原始数据构成的空间叫测量空间,把分类识别赖以进行的空间称为特征空间。通过映射可以把维数较高的测量空间中表示的目标变为维数较低的特征空间中表示的目标。

特征提取是目标分类的关键环节。特征提取得好,即所得的特征向量中包含的类别信息足够多,而干扰信息足够少,则分类效果就好;反之再好的分类器也无法成功地分类。然而,由于海洋环境的复杂性和水声信道的特殊性,要从舰船辐射噪声信号中提取一种既能反映目标本质特征又能满足水下远距离探测要求的有效性特征表示,一直是这一领域的难题^[2,3,4]。为了提高水下目标识别的正确率,人们从不同的角度,对水下目标辐射噪声原始信号进行了分析和研究,得出了几种常用的特征提取方法^[2,7,14]。主要有:时域波形结构特征提取^[2,3,7,10,14]、信号谱估计的特征提取^[18,19]、时间-频率分析特征提取^[5,16,17]等。

3.2.1 时域波形结构特征提取

舰船目标原始信号的时域波形结构中含有丰富的目标类别特征信息^[20,21]。通过对信号的过零点分布、峰间幅值分布、波长差分布等方面的特性分析,可以得到信号波形结构的多维特征向量。

(1) 过零点分布

定义噪声信号波形的过零点波波长分布概率函数为:

$$P(\alpha_i) = \frac{S(\alpha_i)}{\sum_{j=1}^N S(\alpha_j)} \quad (1)$$

式中 α_i 表示一个过零点波的波长, $S(\alpha_i)$ 表示一个信号样本中波长为 α_i 的过零点波的个数; $\sum_{j=1}^N S(\alpha_j)$ 表示一个信号样本过程的总持续时间。

(2) 峰间幅值分布

定义噪声信号波形的峰间幅值分布概率函数为:

$$P(\beta_i) = \frac{S(\beta_i)}{\sum_{j=1}^{20} S(\beta_j)} \quad (2)$$

设在一个样本波形的峰谷序列中,最大的峰间幅值为 $H = \max(A_k)$, 归一化后将峰间幅值划分为 20 个等间隔的分组区间 $\beta_i (i=1, 2, \dots, 20)$, $S(\beta_i)$ 表示峰间幅值落在 β_i 区间的峰谷个数。

(3) 波长差分布

相邻两个过零点波波长之差的分布情况就是波形的波长差分布。定义波长差分布概率函数为:

$$P(\theta_i) = \frac{S(\theta_i)}{\sum_{j=1}^R S(\theta_j)} \quad (3)$$

式中 $S(\theta_i)$ 表示一个样本信号中相邻两个过零点波波长差为 θ_i 的个数。

3.2.2 信号谱估计的特征提取

谱估计是分辨和跟踪水下目标辐射噪声信号并从中提取目标特征参数的重要手段。谱估计的方法很多,主要有^[14]:

(1) 非参数化谱估计 即基于傅立叶分析的谱估计方法,又叫经典谱估计,其主要缺点是频率分辨率低;

(2) 参数化谱估计 又叫现代谱分析,因其具有频率分辨率高的优点,有时又叫高分辨率谱估计;

(3) 高阶谱估计 高阶谱是根据累积量来定义的,所以也叫累积量谱。利用高阶谱的基本目的有三个^[22]:一是在检测、参数估计、信号重构问题中抑制未知谱特征的高斯噪声;二是高阶谱可以保存信号的相位特征;三是高阶谱是辨识一个系统的非线性特征的有力工具。

3.2.3 时间-频率分析特征提取

近年来的时-频分析方法主要有:短时傅立叶变换、Wigner-Ville 分布、子波变换、Gabor 变换等。下面主要介绍时-频分析中极具吸引力的研究方法——子波变换。

子波变换与短时间谱相比较,其基本差别在于,在短时间谱中使用一个固定时间长度的分析窗,而子波变换在高频段用短时间段,在低频段用长时间段。这种方法克服了短时间谱在时频平面上均匀分割而带来低频频率分辨率低,而高频时间分辨率低的缺点。

《舰船科学技术》1999.4

水声信号分析中的子波变换:

设 $g(t)$ 为以给定解析子波, 它满足平方可积条件, 即

$$\int_{-\infty}^{\infty} |g(t)|^2 dt < \infty \quad (4)$$

且满足条件

$$\int_{-\infty}^{\infty} |G(f)|^2 / |f| df < \infty \quad (5)$$

则任意信号 $s(t)$ 的子波变换可表示为

$$W_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} g\left(\frac{t-b}{a}\right) s(t) dt \quad (6)$$

或

$$W_{a,b} = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{\infty} G^*(af) S(f) \exp(j2\pi bf) df \quad (7)$$

式中 a 代表伸缩因子; b 代表子波位置; $G(f)$, $S(f)$, 分别为 $g(t)$, $s(t)$ 的傅立叶变换; “ $*$ ”表示共轭。

从以往的研究中可以看出, 采用子波分析具有以下好处^[1]:

(1) 子波变换后功率谱特征比原始信号的功率谱特征具有更好的类别可分性;

(2) 子波变换后信号的功率谱特征空间确定的目标类别边界的复杂度明显小于原始信号的特征空间;

(3) 任一级子波变换后的谱特征都比原始信号的谱特征更易识别;

(4) 子波变换可在不损失识别率的情况下, 压缩特征空间的维数, 简化系统结构。

3.3 结构自适应神经网络分类器

传统的分类器与神经网络分类器的最大区别是前者需要事先从训练样本中获得参数估计, 从而计算待识别样本与各类模式样本的匹配程度。由于水下目标型号繁多, 且工况多变, 难以得到完备的样本集, 这使得水下目标识别在实际应用中难以达到预期的性能。而神经网络分类器的样本参数隐含于网络的连接权中, 它无须被事先知道, 在反复训练中通过网络输出误差的反馈, 自动调整, 以达到期望目标。因此, 神经网络的在线学习、自适应功能, 使得神经网络分类器有可能在未来海战中, 实现对目标的现场学习和分类^[2,5,10-15]。

《舰船科学技术》1999.4

基于 BP 算法的多层感知器模型, 因其具有较强的非线性映射能力, 而得到广泛的应用。但是由于其训练速度慢、确定网络结构比较困难等, 使得这类模型只适用于离线学习, 因此, 由这类神经网络构成的分类器难以满足实时性的要求。

研究表明^[2,23-25], 结构自适应神经网络具有学习速度快、自组织自适应能力强、推广性能好等优点。由于水下目标种类繁多, 工况复杂, 海洋环境变化大, 样本集不完备, 因而, 需要神经网络具有较好的自适应自组织能力, 以及具有较好的推广能力。结构自适应神经网络为水下目标的分类, 提供了良好的结构和算法。该网络可在训练中自动生成隐层节点, 随时记忆新知识, 使网络在实践中不断完善, 从而提高网络对外部环境的适应能力。

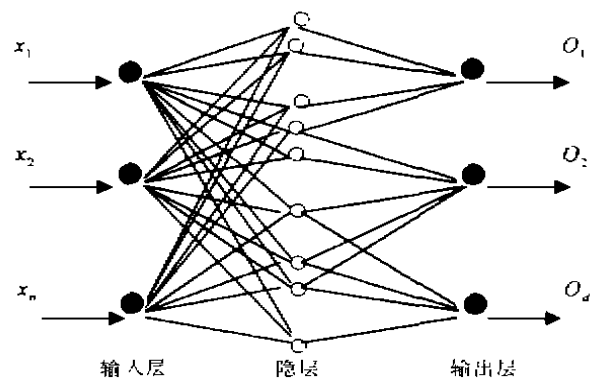


图2 结构自适应神经网络拓扑结构图

结构自适应神经网络^[2,14,23]的拓扑结构参见图2, 它由三部分组成: 第一层为输入层, 采用扇入—扇出作用函数; 第二层为隐含层, 又称模糊记忆层; 第三层为输出层。当网络接收到外部信号时, 首先经过输入层预处理, 然后将它与隐层记忆中的“知识”进行匹配。观察网络是否能比较清楚地回忆起该信号, 若有则表示网络已记忆了该信号, 通过修正相应权向量对其加强记忆, 否则, 该信号作为新的“知识”被记忆。这种记忆方式实际上模拟了人脑对事物的分区记忆方式, 对某一大类事物划分成若干个子类, 每一个子类则表示了该事物在某一方面或某几个方面的相似性。这样, 具有一定相似

性的某一大类事物就由若干隐层神经元分别加以记忆。网络在经过充分的学习之后,模式特征均被隐层神经元所记忆。

根据实际的要求,我们把待识别的水下目标分为三大类:Ⅰ类目标,Ⅱ类目标,Ⅲ类目标。经过特征提取后,将所得的特征矢量样本集划分成:训练样本和测试样本。训练后,用测试样本集即可检测分类器的效果。

4 水下目标识别技术研究展望

水下目标识别是一个十分复杂而极其重要的研究课题。为了提高水下目标识别的正确识别率,研究人员主要应从以下三个方面展开深入的研究

(1) 寻求有效的特征提取方法。

(2) 开展神经网络与模糊推理的交叉应用技术研究。既考虑到可以用神经网络精确识别处理某些模式,又注意到神经网络精确识别处理的局限性。从模糊推理的角度出发,充分利用神经网络和模糊推理的组合效益,使得识别系统具有较强的容错能力,从而提高了识别系统的效率与柔性。这对探索远距离低信噪比情况下,水下目标的高效识别具有重要的应用前景和深远的科学意义。

(3) 综合利用神经网络方法和传统人工智能方法构造专家系统,充分利用符号系统和神经网络系统的各自优点,避免各自的不足,使得识别系统不仅具有好的逻辑思维能力,而且具有好的形象思维能力。

4.1 分形与目标参数提取

分形理论是非线性科学中一个前沿课题,其研究对象是在非线性系统中产生的不光滑和不可微的几何形体,对应的定量参数是分形维数。80年代以来,分形学已渗透到图像处理、模式识别、人工智能等信息科学的许多分支。

长期以来,自然科学工作者习惯于对复杂的研究对象进行简化和抽象,建立起各种理想的数学模型(绝大多数是线性模型),使问题得以解决。然而,在复杂的动力学系统中,简单的

近似不可能认识与非线性有关的特性。而分形则直接从非线性复杂系统的本身入手,从未经简化和抽象的研究对象本身去认识其内在的规律性,这一点就是分形理论与线性近似理论方法本质上的区别^[6]。

水下弱信号的检测和识别是当今水声信号处理领域中存在的难题^[12]。基于随机系统理论的信号处理方法一直是水声信号检测与分析的重要理论工具,然而,这些常规的理论手段面对复杂的实际问题,如:弱信号检测,复杂目标信号的识别等,有时会显得软弱无力^[11]。文献[1]从舰船辐射噪声可能产生混沌现象的机理、相空间轨迹、Lyapunov指数和分维特征等四个方面全面研究了舰船辐射噪声存在混沌的可能性。研究表明,舰船辐射噪声信号中的确存在混沌现象,而且不同类型的信号具有不同的分维特征。这一研究为水下目标信号的检测和识别提供了崭新的研究途径。

4.2 用模糊推理设计神经网络分类器

传统的分类问题,总是将每个待识别的对象严格地划分到某一类别集合里。但是实际遇到的模式对象并不具有严格的属性,它们可能位于两类或多类之间,这时,如果使用模糊分类的方法来解决这些问题,可能会取得更好的效果。

如果将模糊集理论与神经网络系统结合起来用于模糊模式分类问题,那么可以得到模糊神经网络分类器,这是模式识别领域的一个发展方向。因为模糊信息处理是人脑神经系统信息处理和表现的基本特征,因此,真正的神经网络分类器应该是模糊神经网络分类器。

模糊分类器与神经网络分类器的结合主要体现在以下几个方面:

(1) 如何将神经网络的并行计算原理嵌入到模糊分类器上;

(2) 如何将模糊集的基本运算,扩展原理和逻辑推理结合到神经网络模式分类器上;

(3) 如何将神经元节点的求和运算和传输函数用模糊运算来代替等。

在模糊神经网络分类问题中,模糊的类别

《舰船科学技术》1999.4

边界可以给人以“柔性”的类别判决,从而提高了判别的灵活度,增强了判决的可信度。而且,这种方法由于考虑了模式间重叠的信息,将明显改进分类器的性能。

4.3 神经网络与专家系统的结合^[1]

水下目标识别是一个很复杂的技术问题,与诸多因素有关,其中声纳员的经验知识是很重要的。但声纳员的识别经验是一种直觉性知识,其特点之一是按相似性分类。声纳员在多年的实践训练中,脑子里存储了许多型号舰船的声纳信号,同时又具有一种模糊的直觉联能力。当遇到一个新的声纳信号时,他是由相似性而联想到过去的某种可能情况,并与之比较。这种相似性是不能用严格的逻辑形式描述清楚的,也即不能用语言描述。

对于声纳信号知识的这一特点,在传统的专家系统方法中较难体现出来,这是由规则和框架这样的知识表达方法所限制的。基于规则的知识表达只适合于表示可用语言清晰描述的分类,不适合表达实例与实例相对照所体现的相似性。然而,人工神经网络分布式的存储结构可以体现这一特点。通过几个相似样本的学习,可以得到把它们分为同一类的权值分布。虽然很难给这种权值以意义明确的逻辑解释,但其所体现的正是实例与实例相对照所反映的相似性,因此,人工神经网络可以获取声纳员的按相似性来识别的经验知识。

从思维与智能的关系角度看,专家系统主要是通过物理符号系统来实现某种智能行为,

可以说是模拟人的逻辑思维。神经网络或更广泛的连接机制网络,则是在一定程度上致力于模拟形象思维。把两者结合起来,则能完成更复杂的功能。

神经网络与专家系统的结合,既能发挥各自的特点又能相互补充,这是一种必然发展的新趋势。如图3所示。

首先,在知识表达方面,将专家系统中以符号表达和处理知识的产生式和框架式等的逻辑形式和人工神经网络中知识的分布隐含表达形式相结合,从模型角度看,它是将高层逻辑模型和低层数值模型相结合。其次,知识无需被转换成一条条的描述规则,可通过神经网络中学习方法自动获取。第三,在过去的系统中,推理过程由一系列认知动作循环构成,当知识库扩大,规则增多,势必引起“组合爆炸”,严重影响系统运行速度。由于基于人工神经网络的知识库是并行处理的,即使神经元、细胞或权向量增加,也不会产生“组合爆炸”问题,这就大大提高了运行速度。

把神经网络和专家系统结合起来的设计,一般来说有两种方法:一是将专家系统完全构造为一个大的神经网络,利用其可学习性确定网络中的加权量,这些权将作为不确定因子,并在网络上进行不精确推理;另一种方法是将神经网络理解成知识表达的一类模型,用它表达那些与形象思维有关的知识,这些模型与其它知识表达模型结合起来,去表达论域专家的知识。

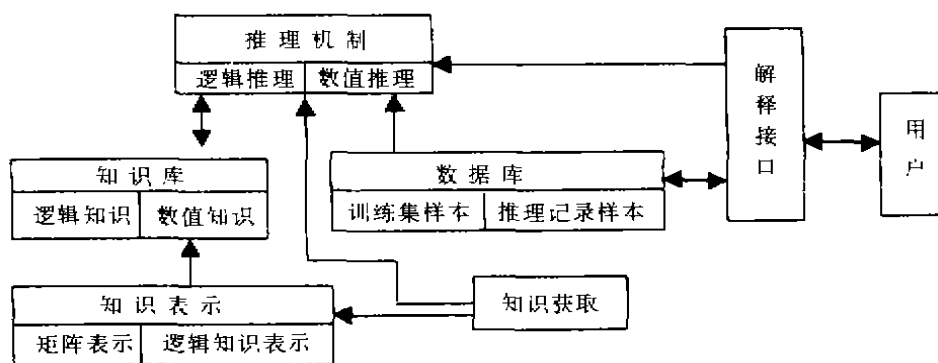


图3 混合专家系统

其中,第一种方法实际是把神经网络看成为专家系统,用专家系统的思想来解释神经网络。即把神经网络的学习阶段看作知识获取,工作阶段看作推理。这种结合的方法我们称为神经网络专家系统(NNES)。第二种方法与第一种有质的不同,我们称之为基于神经网络的专家系统(NNBES)。

5 存在的问题

多年来,研究人员在水下目标特征提取和识别方法上均作了大量的工作,也取得了一定的成绩。然而,水下目标识别技术距实际应用还有一定的距离,在以下方面极需作大量的研究:

(1) 在远距离、低信噪比情况下,如何从船舶辐射噪声及反射回声中提取有效特征,仍是需重点解决的难题。这对分类器走向实用化起着至关重要的作用。

(2) 完善具有在线快速自学习及自适应功能的目标识别分类器的研究设计,完善神经网络与专家系统相结合的技术,以提高目标识别的正确率。

参 考 文 献

- 章新华,张晓明,林良骥.“舰船辐射噪声的混沌现象研究”.《声学学报》,1998,23(2):134-140.
- 章新华,林良骥.《中国船舶科技报告》.760-4-7B,1995,09.
- 林良骥,林钧清.《中国船舶科技报告》.760-4-7B,1995,09.
- 吴国清,任锐,陈耀明等.“舰船辐射噪声的子波分析”.《声学学报》,1996,21(4)增刊:700-708.
- 洪健,陆诒人.“子波变换及径向基函数网综合水声信号识别”.《东南大学学报》,1994,24(6):112-118.
- 张济忠.《分形》.北京:清华大学出版社,1995.
- 卢迎春,桑恩方.“基于主动声纳的水下目标特征提取技术综述”.《哈尔滨工程大学学报》,1997,18(6):43-54.
- 朱锡清,吴武生.“水下高速航行体对转螺旋桨线谱噪声预报研究”.《声学学报》,1998,23(2):123-133.
- 刘群等.“一个水下多目标识别系统的主动式黑板模型”.《系统工程与电子技术》,1997,10:6-10.
- 赵矿所,林钧清.《中国舰船科技报告》.760-4-7B,1995,09.
- L. R. Medsker. Hybrid Neural Network and Expert Systems. Kluwer Academic Publishers, USA, 1994.
- T. L. Hemminger Detection and Classification of Underwater Acoustic Transients Using Neural Networks. IEEE Trans NN, 1994, 5(5):712-718.
- J. Ghosh. A Neural Network Based Hybrid System for Detection, Characterization, and Classification of Short-Duration Oceanic Signals. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1992, 17(4):351-363.
- 蔡悦斌.“水下目标辐射噪声的特征提取与分类研究”.上海交通大学博士论文,1998,1.
- 张艳宁.“自适应子波,高斯神经网络及其在水中目标被动识别中的应用”.西北工业大学博士学位论文,1996,9.
- 章新华,王骥程,林良骥.“基于小波变换的舰船辐射噪声特征提取”.《声学学报》,1997,22(2):139-144.
- 范中,田立生.“利用子波变换检测瞬态信号”.《电子学报》,1996,24(1):78-82.
- 陶笃纯.“按辐射噪声平均功率谱形状识别舰船目标”.《声学学报》,1981,4:219-227.
- 吴国清,魏学环,周钢.“提取螺旋桨识别特征的两途径”.《声学学报》,1993,18(3):210-216.
- 林良骥.“提取回声信号特征的过零点方法”.《水声通讯》,1981,1:7-12.
- 林良骥.“波形峰间幅值的分布特性及其用于回声信号的识别”.《水声通讯》,1983,3:22-28.
- 吴国清,任锐,陈耀明等.“舰船辐射噪声高阶谱分析和标记图”.《声学学报》,1996,21(1):29-39.
- 章新华,张晓明,林正青.“一种自组织神经网络及其应用”.《火力与指挥控制》,1997,22(1):51-54.
- Tsu-Chang Lee. Structure, Level Adaptation For Artificial Neural Networks. Kluwer Academic Publishers, 1991.
- W. Weng and K. Khorasani. An Adaptive Structure Neural Networks with Application to EEG Automatic Seizure Detection. Neural Networks, 1996, 9(7):1223-1240.

作者简介:景志宏,讲师,男,1965年4月生,1985年毕业于空军电讯工程学院,1996年毕业于西北工业大学电子工程系,获硕士学位。现在西北工业大学航海工程学院攻读博士学位,研究方向为水声信号处理,水下目标识别技术。