

水面艦艇聲納對來襲魚雷 類型識別技術研究

Identifical Technology of Incoming Torpedo for Surface Ship's Sonar

林澄貴、吳柏賢

提 要：

- 一、艦船與魚雷在水面下的輻射噪音源可分為機械噪音、螺旋槳噪音與水動力噪音，其中螺旋槳噪音所產生的低頻線譜是識別水中目標的重要特徵，在水中傳播時具有較高的穩定性與較小的能量損失，可提高對魚雷目標的偵測距離。魚雷預警系統中的目標識別器僅將被偵測歸類為魚雷或非魚雷兩類型。魚雷航速較快且螺旋槳的軸頻也較高，透過LOFAR與DEMON頻譜分析，提取魚雷目標軸頻就可以有效判斷是否為魚雷。本文亦介紹其他常用的聲紋特徵分析與辨識方法，高階統計量分析、倒傳遞類神經網路以及高斯混合模型等，並建議可採用專家系統來降低對魚雷樣本數量的依賴。因此，未來應加強對低頻弱信號檢測及魚雷目標特徵識別等技術的精進，期以提升魚雷識別器的辨識功能。
- 二、魚雷識別器除了以目標聲紋特徵而確定為魚雷或非魚雷證據外，還需要再以魚雷預警聲納偵測追蹤到的目標運動軌跡以及作戰海洋環境、戰場態勢等證據，做數據融合來判定何種類型的魚雷，經由戰術反應決策模組做戰術評估後，再擇一有效魚雷反制器材對抗來襲魚雷予以軟殺或硬殺。

關鍵詞：魚雷目標辨識、魚雷預警、高階統計量、倒傳遞類神經網路、高斯混合模型、作戰海洋環境、戰場態勢、戰術反應決策

Abstract

1. The noise sources of warship or torpedo under water can be separated into mechanical noise, propeller noise and waterpower noise. The line spectrums in low frequency which are produced by the propeller noise is an important characteristic to identify the underwater target, because the

detection distance can be enhanced by low frequency which has lower transmission loss. The target which is torpedo or non-torpedo can be identified and classified according to use torpedo early warning system. The shaft frequency of target is an useful information which can be analyzed by using LOFAR and DEMON to identify the torpedo, because the speed of torpedo is fast and the shaft frequency of propeller is high. In this paper, the higher-order statistics analysis, back-propagation neural network and gaussian mixed model are introduced to identify the torpedo signal, and the quantities of torpedo data can be reduced on torpedo identification by using the professional system. In the further, the low frequency signal detection and the characteristic of torpedo identification must be reinforced to enhance the performance of torpedo identification system.

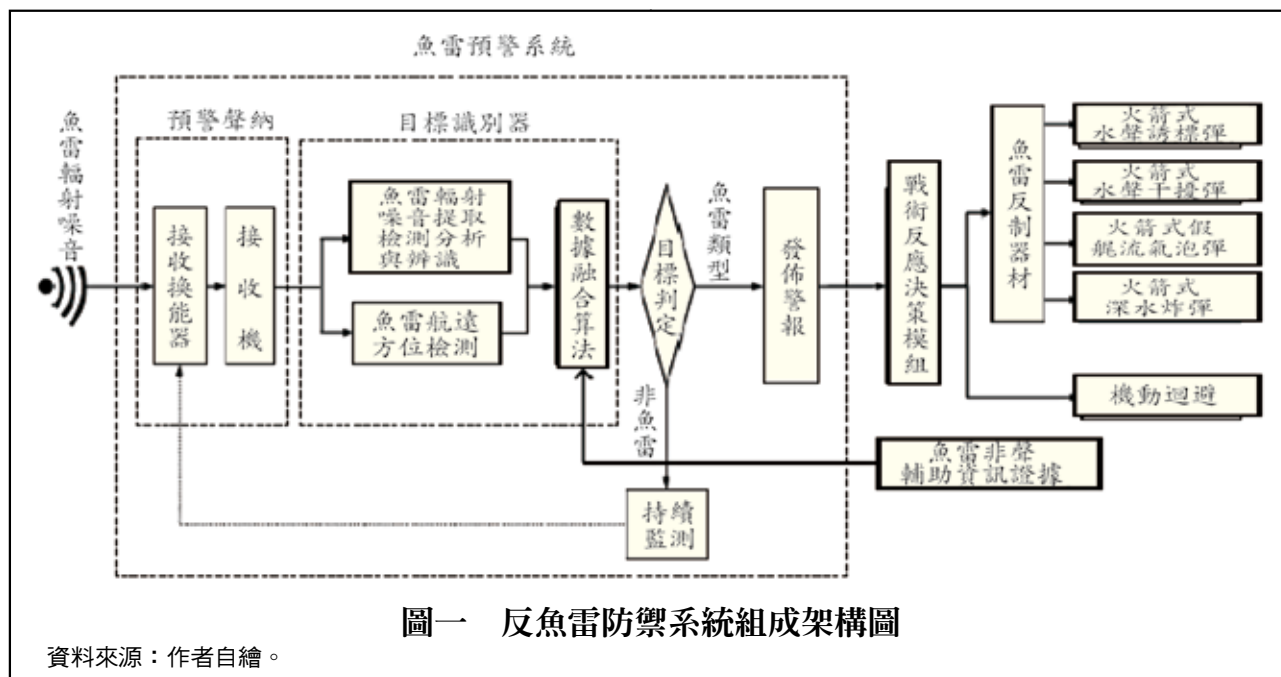
2. But the torpedo identification system just can identify the target signal which is torpedo or non-torpedo, the type of torpedo is decided by using torpedo alert sonar which can detect the locus of target, battle ocean surrounding and battlefield state. The result is used to choose an effective tactics to resist the torpedo after the tactical reaction decision.

Keywords: Torpedo Identification, Torpedo Alert, Higher-Order Statistics, Back Propagation Artificial Neural Network, Gaussian Mixed Model, Battle Ocean Surrounding, Battlefield State, Tactical Reaction Decision.

壹、前言

1982年福克蘭海戰中，英國潛艇發射 MK-24 Mod1 Tigerfish 線導魚雷將阿根廷的貝爾格拉諾將軍號 (ARA General Belgrano) 巡洋艦 (未配備水聲對抗器材) 擊沉；而阿根廷的聖路易斯 (San Luis S-32) 潛艇多次發

射美製 MK-37 及德製 SST-4 線導魚雷攻擊英國的驅逐艦、護衛艦，均被英艦使用的拖曳式聲誘標和聲干擾彈成功執行誘騙與干擾，無一命中，此次海戰結果顯示，要提高水面艦艇的生存能力，必須提高反魚雷水聲對抗能力。2010年3月，南韓海軍天安號護衛艦遭到北韓魚雷攻擊而沉沒，由此，南韓軍方斥



資為其現役艦艇配備引誘魚雷偏離方向的水聲誘標系統，這一事件再次引起世界各國海軍對反魚雷防禦系統發展的高度重視¹。

近年來，由於水下電子戰之偵測與反偵測、反制與反反制等相對抗原則下，攻艦魚雷的作戰需求應會有長足的技術發展方向：

一、新能源、新動力系統和新推進裝置等新技術，實現魚雷航行無航跡、低噪音的要求，從而增強魚雷隱身的效果。

二、新材料(低磁性與在雷體表面塗抹吸聲材料)和全雷結構設計(安裝減振隔音彈性基座及隔音屏蔽夾層、吸聲材料等)，降低魚雷磁性與聲反射能力，以及把振動能轉換成熱能消耗掉，從而達到減振降噪的目的。

三、魚雷智能化彈道的研究，採用導控慣性導航儀和測深儀等裝置，使魚雷能根據海底地形作起伏航行，自動進行變深，接近

目標進行真假識別，最後確認攻擊目標，並在接近目標一定距離後再變深到攻擊深度，從而降低魚雷被目標偵測發現的機率，達到隱身的目的。

四、線導、尾跡自導及聲自導轉換等綜合導控技術，魚雷發射後先隱蔽航行，以消除主動聲自導的聲暴露，接近目標並在被動聲自導與目標可靠接觸後，才中斷線導或進行聲自導轉換，且魚雷又能識別真假目標而主動尋找目標，實施魚雷的隱身攻擊。

五、透過目標和干擾器材的特徵測試，建立真實目標識別軟體(即所謂的專家系統)，提高魚雷識別真假目標的能力，從而增強魚雷水聲對抗的能力。

因此，水面艦艇為能因應上述魚雷技術未來的突破，必要在反魚雷防禦技術及其系統做更多的研究與發展，方能確保免遭魚雷

註1：DAVID EWING, "Pre-emptive defence: guarding against the modern torpedo", Jane's International Defence Review, 2011.

表一 世界各國先進反魚雷防禦系統組成表

反魚雷防禦系統	系統組成
美國SSTD系統	AN/SLR-24拖曳式專用魚雷預警列陣被動聲納、具有多傳感器魚雷識別和預警處理能力的AN/SLX-1 MSTRAP裝置、AN/SLQ-25拖曳式聲誘標、MK-36SRBOC發射架發射火箭助飛干擾器/誘標。
美國AN/WSQ-11系統	HPS主動偵測水平拖曳式聲源、TAIR三元件拖曳式專用魚雷預警列陣被動聲納、具有多傳感器魚雷識別和預警處理能力的AN/SLX-1 MSTRAP裝置、AN/SLQ-25拖曳式聲誘標、MK-36SRBOC發射架發射火箭助飛干擾器/誘標，以及CCAT反魚雷魚雷。
法國SLAT系統	信天翁魚雷預警被動聲納、SALTO戰術決策子系統、CONTRALTO子系統利用艦上的多管火箭發射架來發射火箭助飛噪音干擾器/聲誘標。
英國Sonar2170 /SEA Sentor系統	Sonar2170拖曳式專用魚雷預警列陣被動聲納、AN/SLQ-25拖曳式聲誘標、MK-36SRBOC發射架發射火箭助飛干擾器/誘標。
俄羅斯蟒蛇系統	拖曳式被動聲納/艦艏主動聲納、KT-153型10管發射架發射聲誘標/懸浮干擾器/深水炸彈以及“PACKET/NK”反魚雷魚雷。
以色列ATDS系統	TDTA拖曳式專用魚雷預警列陣聲納、ATC-2 拖曳式聲誘標。

資料來源：林澄貴，〈反魚雷防禦技術與系統發展〉，《新新季刊》，第34卷，第4期，中華民國95年10月，頁139-150。
 林澄貴、涂滿煌，〈魚雷預警技術與防禦系統發展〉，《新新季刊》，第38卷，第4期，中華民國99年10月，頁54-66。
 楊日杰、高學強、韓建輝，〈現代水聲對抗技術與應用〉，北京，國防工業出版社，2008年9月。

攻擊而提高其存活率，其反魚雷防禦系統架構(如圖一)，國外發展(如表一)，具有偵測、識別與定位追蹤來襲魚雷功能之魚雷預警系統為其首要裝備^{2,3,4,5}。

貳、艦船及魚雷水中輻射噪音頻譜特性

由於魚雷識別器是依水中目標輻射噪音來判定魚雷或非魚雷，因此我們必須瞭解艦船及魚雷的水中輻射噪音頻譜結構及差異性，方能利用其特性進行目標識別作業。

一、艦船輻射噪音

各類艦船在水面航行過程當中，必須藉由艦載的機電設備運作來產生動力推進，或間接經由水中物體散射、海底反射等方式將能量傳播至遠處，形成聲波的輻射。產生聲

波的機構可視為聲源，而諸如船艦、潛艇和魚雷所產生的輻射聲源可分為四大類⁶。

(一)推進系統噪音

成因：由推進系統相關機組件在運轉時所產生的輻射噪音。例如：旋轉軸、軸承、齒輪、引擎、渦輪等。

(二)輔機噪音

成因：由非直接與推進系統有關組件在運轉時所產生的輻射噪音。例如：發電機、幫浦、鼓風機等。

(三)螺旋槳噪音

成因：由螺旋槳與其所處流體進行相互作用時所輻射噪音。例如：空蝕噪音(Cavitation Noise)、鳴音(Singing)。

(四)水動力噪音

成因：由水流流過船殼表面所形成的輻

註2：林澄貴，〈反魚雷防禦技術與系統發展〉，《新新季刊》，第34卷，第4期，中華民國95年10月，頁139-150。

註3：林澄貴、涂滿煌，〈魚雷預警技術與防禦系統發展〉，《新新季刊》，第38卷，第4期，中華民國99年10月，頁54-66。

註4：楊日杰、高學強、韓建輝，〈現代水聲對抗技術與應用〉，北京，國防工業出版社，2008年9月。

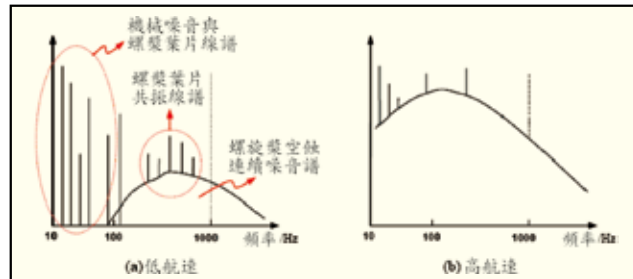
註5：陳玉春，〈反魚雷技術〉，北京，國防工業出版社，2006年4月。

射噪音。

其中以機械噪音(含推進系統噪音與輔機噪音)和螺旋槳噪音在大多數的情況下都是主要的船艦水中輻射噪音聲源，而水動力噪音在強度方面往往被機械噪音和螺旋槳噪音所掩蓋。

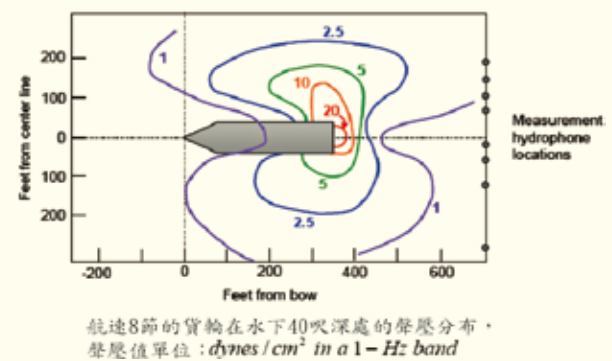
由推進系統與輔機有規律的機械振動，以及螺旋槳噪音在頻譜圖上表現為線狀特徵的譜線，稱之為線譜；由機械摩擦與流體空蝕現象所產生在頻譜圖上表現為頻率的連續函數，稱之為連續譜。艦船輻射噪音是由連續譜與線譜這兩種分量所組成，其頻譜結構(如圖二)。在低航速時，低頻端主要為機械噪音頻譜和螺旋槳葉片的線譜，而高頻端的線譜一般由螺旋槳葉片共振所產生；在低航速時，螺旋槳空蝕噪音譜級增大並移向低頻，恆速運轉的輔機所產生的線譜不變，不受航速增加而有所影響。在固定的航速和深度下，目標噪音頻譜存在一個臨界頻率，低於該頻率時的主要成份是機械和螺旋槳的線譜；高於此頻率時的主要成份則是螺旋槳空蝕的連續譜噪音。

艦船、潛艇與魚雷等水下目標輻射噪音的線譜成份比連續譜具有相對較強的強度和穩定性，其主要分布集中於低頻段範圍，在水中傳播時會有較小的能量損失，可增加對目標的偵測距離，且又能反應如螺旋槳主軸轉速、葉片數等目標特徵參數，在一定信噪比(SNR)下其線譜特徵也較容易被提取與析出，是分類識別水中目標的重要依據，適合做為水下目標被動偵測追蹤與識別的特徵。



圖二 不同航速下的艦船輻射噪音頻譜結構示意圖

資料來源：Urlick, R. J., Principles of underwater sound, 3rd ed., McGraw-Hill, 1983.



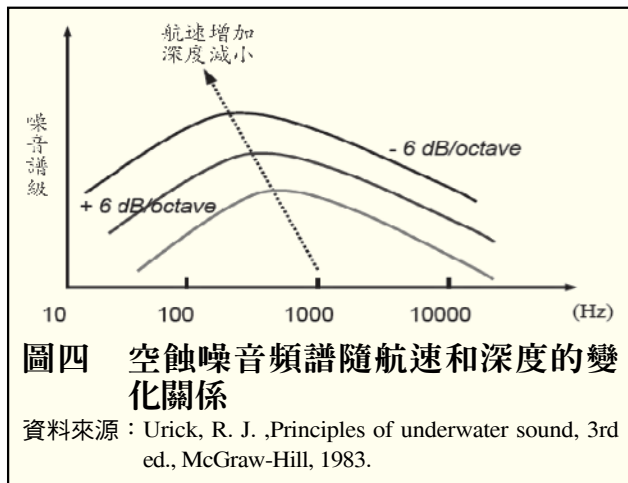
圖三 非均勻輻射方向的螺旋槳噪音分布圖

資料來源：作者自繪。

艦船的螺旋槳噪音是由運轉中的螺旋槳與周遭流體相互作用時所輻射出的噪音，包括因螺旋槳高速旋轉造成氣泡突然產生爆破而激發的空蝕噪音，以及周遭流體對螺旋槳葉片激發振動而產生特殊聲調的鳴音。螺旋槳噪音在不同的方向上具有非均勻的輻射噪音(如圖三)，船舶與船艏方向的輻射噪音較小，是由於船體的遮擋(對船舶而言)以及艏流的影響(對船艏而言)，在與船舶一艏流方向呈30度角內，指向性圖有凹進減小，船舶方向比船艏方向凹進略多一些⁶。

螺旋槳空蝕噪音的功率譜在高頻段以

註6：Urlick, R. J., Principles of underwater sound, 3rd ed., McGraw-Hill, 1983.



-6dB/octave下降，在低頻段則隨著頻率的增加而上升，其功率譜峰值的位置通常在100Hz~1,000Hz之間。對魚雷而言，若保持在固定航速下，則螺旋槳噪音會隨著深度增加而減小；若維持在固定深度下，其螺旋槳噪音則會隨著航速提升而增加。當航速增加或深度變淺時，譜峰位置會往低頻方向移動，其變化關係(如圖四)所示。

空蝕噪音在頻譜上屬於螺旋槳噪音的連續分量，而鳴音則是疊加在連續譜上的線譜分量，線譜頻率值與目標艦船的螺旋槳轉速、螺旋槳葉片數及其諧波有關，其關係式為 $f_m = m \times l \times f_0$ ，其中 f_m 為線譜頻率， m 為諧波次數， l 為葉片數， f_0 為螺旋槳轉速(轉/秒)⁶。

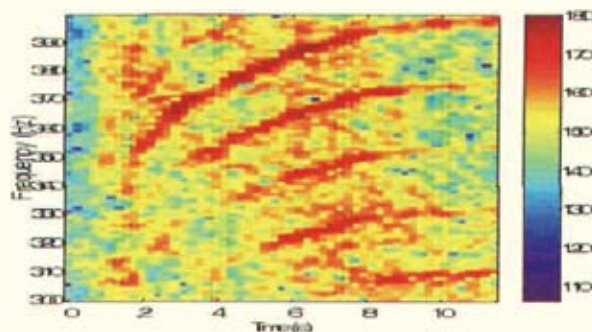
二、魚雷輻射噪音

魚雷從潛艇發射出管至攻擊水面目標的過程中，通常會產生發射初始噪音、航行輻射噪音與主動自導信號等多種聲信號，這些聲信號的時頻譜特徵、都卜勒特徵等與普通艦船目標或水中爆炸聲有所不同，可利用此特點在眾多目標中對魚雷目標實施遠程判別與預警。

(a) 時域波形



(b) LOFAR頻譜分析



圖五 魚雷發射出管之突發沖擊噪音

資料來源：林澄貴、涂滿煌，〈魚雷預警技術與防禦系統發展〉，《新新季刊》，第38卷，第4期，中華民國99年10月，頁54-66。楊春，〈基於魚雷報警聲納的目標識別技術基礎研究〉，哈爾濱工程大學碩士論文，2005年12月。

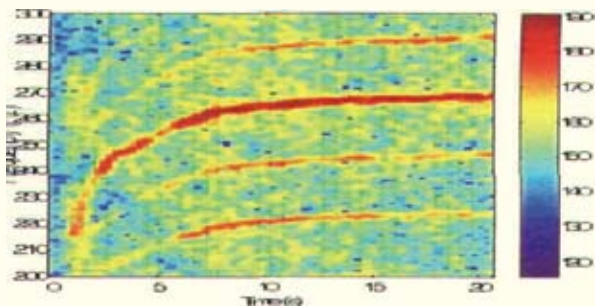
(一) 發射初始噪音

發射初始噪音是指魚雷從潛艇魚雷發射管利用水中高壓發射出管至推進器起動的發射階段所產生的各種噪音，一般包括入水突發沖擊噪音和推進器起動沖擊噪音。入水突發沖擊噪音是因魚雷高壓發射出管與海水發生瞬間撞擊擠壓而形成的突發式強噪音，具有持續時間短(幾秒鐘)、能量集中、波包前緣陡峭、低頻特徵明顯、不可重覆、不易模仿等特點(如圖五a, b) 其頻譜特性為：屬於低頻寬帶連續譜噪音，能量主要集中在500Hz以下的低頻部分，高頻部分衰減很快

(a) 時域波形



(b) LOFAR頻譜分析

**圖六 魚雷啟動或點火之沖擊噪音**

資料來源：林澄貴、涂滿煌，〈魚雷預警技術與防禦系統發展〉，《新新季刊》，第38卷，第4期，中華民國99年10月，頁54-66。楊春，《基於魚雷報警聲納的目標識別技術基礎研究》，哈爾濱工程大學碩士論文，2005年12月。

，對陡峭的波包前緣進行短時傅立葉變換 (SFFT) 時頻分析，其時頻變化特性明顯。推進器起動沖擊噪音是因魚雷推進器起動 (不論是電動力魚雷的電起動或熱動力魚雷的點火起動) 瞬間機械與螺槳形成的突發式沖擊噪音，該噪音持續時間更短、能量較小、具有較高頻率的尖銳譜特性 (如圖六a, b)。

由此可知魚雷發射初始噪音主要為瞬間突發噪音，具有沖擊噪音譜特性。

(二) 航行輻射噪音

航行輻射噪音是指魚雷航行過程中螺

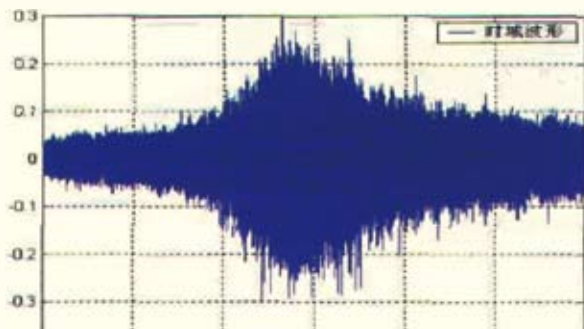
槳旋轉激水受到流體動壓作用所產生的強輻射噪音，以及雷體表面水流摩擦引起的弱輻射噪音，在中、遠程，水流摩擦輻射噪音已衰減到難以探測與感測，僅存螺槳輻射噪音能夠被水聲器檢測得到，因此，一般討論的魚雷航行輻射噪音主要都指螺槳輻射噪音。螺槳輻射噪音分為空化與無空化兩種狀態，包括空化噪音、旋轉打水噪音、鳴音、機械耦合共振輻射噪音等類型。其噪音總效果具有持續時間長 (魚雷航行整個過程皆存在)、能量平穩均勻、低中頻及線譜特徵明顯、傳播距離遠等特點。其頻譜特性為：多葉對轉螺槳的輻射噪音可分為低頻離散、中頻寬帶連續譜和高頻線譜等三種形態噪音，低頻離散噪音是由螺槳葉片和軸旋轉引起的低頻線譜，主要能量分佈在500Hz以下頻帶；中頻寬帶連續譜主要是由螺槳葉片渦流所引起的寬帶噪音，其連續譜能量很強，主要分佈於1,000~5,000Hz頻帶之間；高頻線譜主要由諧波頻率及空化噪音形成，其線譜頻率可達5kHz~10kHz以上，但能量較低。由此可見，魚雷航行輻射噪音主要為螺槳推進噪音，多表現出連續噪音譜特性，特別是低頻離散線譜 (如圖七a, b, c) 所示為大型熱動力裝置魚雷低速航行噪音，(如圖八a, b, c) 為大型電動力裝置魚雷巡航速航行噪音^{4, 5, 6, 7}。

(三) 主動尋標脈波信號

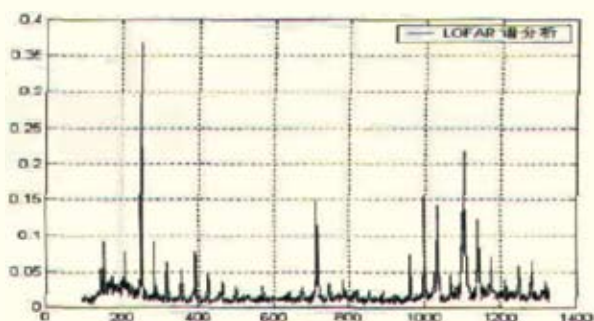
主動尋標的脈波信號是指魚雷偵測追蹤目標而主動產生的脈沖式大功率水聲信號，這種信號具有持續時間長 (魚雷整個搜尋追蹤目標過程存在)、週期性脈沖、能量平穩

註7：楊春，《基於魚雷報警聲納的目標識別技術基礎研究》，哈爾濱工程大學碩士論文，2005年12月。

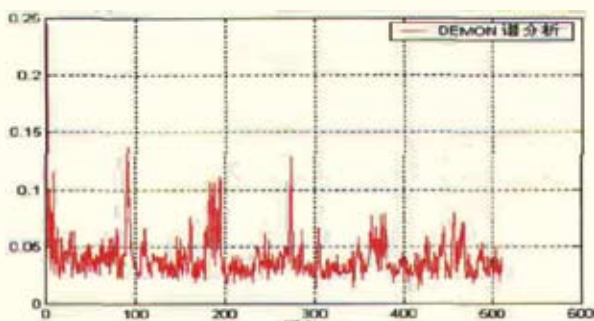
(a) 時域波形



(b) LOFAR頻譜分析



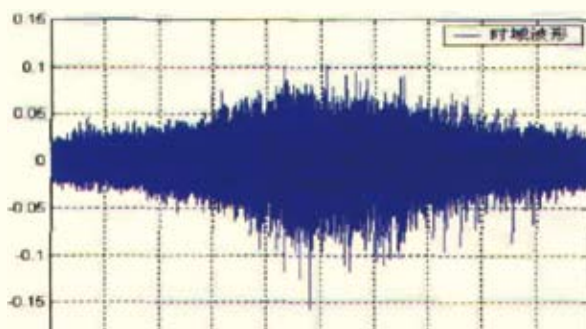
(c) DEMON譜分析



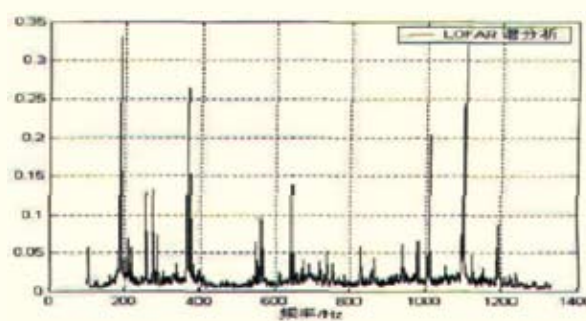
圖七 熱動力魚雷航行輻射噪音

資料來源：林澄貴、涂滿煌，〈魚雷預警技術與防禦系統發展〉，《新新季刊》，第38卷，第4期，中華民國99年10月，頁54-66。楊春，《基於魚雷報警聲納的目標識別技術基礎研究》，哈爾濱工程大學碩士論文，2005年12月。

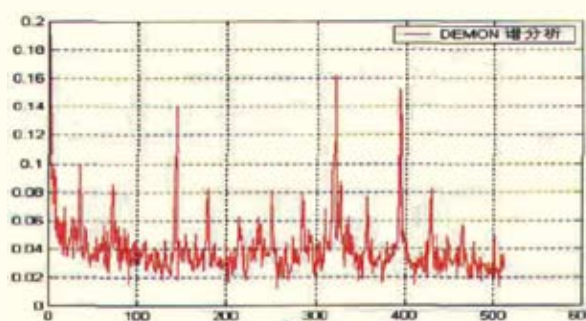
(a) 時域波形



(b) LOFAR頻譜分析



(c) DEMON譜分析



圖八 電動力魚雷航行輻射噪音

均勻、窄頻高頻線譜特徵證明明顯(20kHz~40kHz頻帶線譜)、作用距離較遠(幾千公尺以上)等特點(如圖九所示)。

三、兩者差異性

艦船目標包括水面艦艇與水下潛艇兩類

，這兩類目標的運動聲信息為航行輻射噪音。艦艇目標在水面或水下航行時，其螺槳、機械動力等振動與運轉裝置的工作以及船體與水面的相互作用會產生水噪音、結構噪音和空氣噪音，這些噪音在艇體結構中傳播的



圖九 魚雷主動尋標的脈信號

資料來源：林澄貴、涂滿煌，〈魚雷預警技術與防禦系統發展〉，《新新季刊》，第38卷，第4期，中華民國99年10月，頁54-66。

同時又向水中輻射，形成水中輻射噪音。在正常情況下以艦艇螺旋槳推進噪音為最強，是艦船目標航行輻射噪音的主要音源，從其頻譜來看，含有低頻寬帶連續譜和離散線譜，機械動力裝置形成的輻射噪音具有較強的連續和強線譜，水動力噪音強度相對弱一些，多為連續噪音譜和少數低頻線譜。由於艦艇每分鐘百轉的螺旋槳旋轉速度遠低於魚雷的每分鐘幾千轉，因此，其線譜頻率較低，通常在幾十Hz以下，幾百Hz以上的中頻線譜雖然也存在，但其包絡能量很小，幾乎全淹沒在環境噪音裡。而其他水中軍用目標(如水雷、深水炸彈、聲納偵測系統等)所產生的聲信號通常包括爆炸聲和偵測發射聲等，水雷、深水炸彈的爆炸聲能量和方向性很強，與魚雷出管(或入水)沖擊噪音有點相似，但具有的持續時間短、威力大、頻率相對較高、沖擊波等爆炸特性，是有別於魚雷入水沖擊噪音；偵潛用主動聲納發射聲主要分佈在低頻段，多數形式為大功率單頻寬脈沖信號，與魚雷的尋標信號特性相差較大，特別在頻率上差異較大，兩者很容易區別。

參、魚雷目標聲特徵分析與辨識技術

在實際的作戰海域裏，水面艦艇各型聲納所偵測到是許多水中目標噪音信號的組合，如何從這些信號經信號處理後，判定偵測與否，經分類識別為魚雷目標(如圖十³)，再結合目標運動軌跡而確認判定為何種類型魚雷(直航、聲自導、舵跡自導)，交與戰術反應決策模組做戰術評估後，立即施放魚雷反制器材。

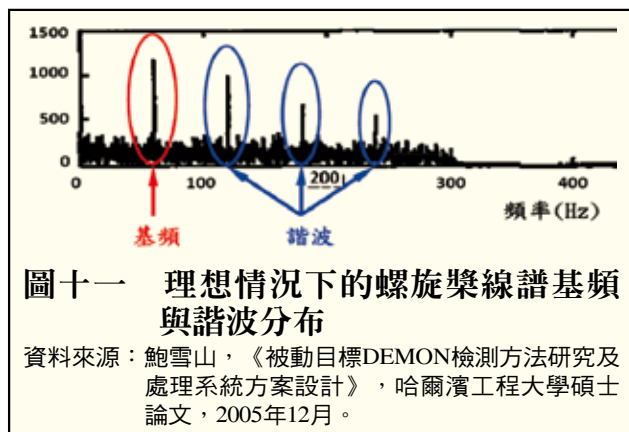
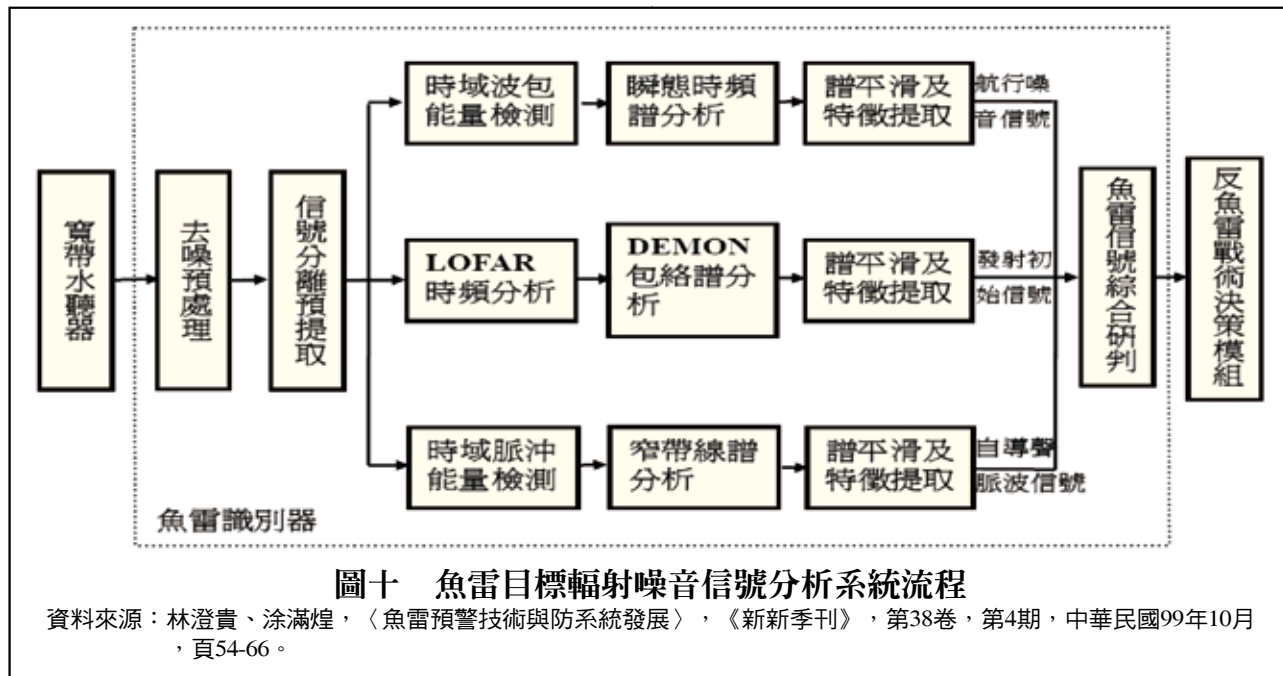
目前常用的水中輻射噪音信號特徵分析與辨識技術，主要有下列幾種方法：

1. Lofar分析。
2. Demon分析。
3. 高階統計/高階譜分析方法(Higher-Order Statistics/Spectra)。
4. 倒傳遞類神經網路(Back Propagation Artificial Neural Network)。
5. 高斯混合模型(Gaussian Mixed Model)。

上述技術可用來對被動預警聲納所收到的水聲信號做魚雷目標特徵分析與辨識，進而判斷周遭是否有魚雷目標的出現，以達到魚雷預警的目的。

一、Lofar與Demon頻譜分析

Lofar和Demon頻譜在目標識別中是做為特徵分析的重要方法。Lofar頻譜分析是對目標輻射噪音直接進行頻譜分析，其線譜分量穩定度小；Demon頻譜分析是透過求取連續信號的包絡(Envelope)來得到線譜成份，可獲得更加穩定的線譜。由於魚雷航速快且軸頻較高，利用Demon頻譜分析來提取目標



軸頻的線譜可以有效判斷是否魚雷。

螺旋槳輻射噪音的包絡譜比較穩定，並有明顯、穩定且能反映其特徵的譜線。譜線的頻率值與目標艦船的螺旋槳轉速、螺旋槳葉片數及其諧波有關。理論上螺旋槳噪音的基頻與其倍頻的諧波能量會依次逐漸降低，其現象(如圖十一)，但由於海洋環境複雜多變，目標信號在傳輸過程中受到環境噪音與

混響的存在直接影響信號的傳播品質，使得被動預警聲納所收到的目標信號信噪比很低，所檢測到的線譜能量受到海洋環境干擾影響而具有隨機性的幅度變化，並不一定隨著頻率的升高而降低；目標基頻與各次諧波所組成的目標線譜，其頻率位置同樣也受到海洋傳播環境而具有隨機性的漂移，各次諧波的實際線譜位置往往是以倍頻為中心做隨機性的偏移。

由上述可知，在海洋環境噪音或是多目標的干擾下，預警聲納有時會偵測不到目標基頻或是漏失部分諧波的線譜信號，故無法以最低頻率的線譜位置來直接求得目標基頻。一般取得目標基頻的做法則是將Demon頻譜上的系列線譜視為一個由一根基頻和其歷次諧波組成的準週期信號，此信號週期即為所欲取得的目標基頻^{8,9}。

註8：王國傳，〈魚雷報警與攔截技術〉，哈爾濱工程大學碩士論文，2003年12月。

註9：鮑雪山，〈被動目標DEMON檢測方法研究及處理系統方案設計〉，哈爾濱工程大學碩士論文，2005年12月。

二、高階統計/高階譜分析方法

艦船輻射噪音是一種非平穩、非線性過程的水聲信號，經與海面及海底的交互作用之後，會經由反射、散射而充斥於海洋中傳播形成不規則的聲訊，稱之混響，在海洋環境中的混響可視為脈衝性質的噪音，是屬於典型的非高斯有色噪音(Non-Gaussian Color Noise)。傳統的功率譜或二階統計量方法，無法避免加性高斯噪音的影響，而高階統計量不僅可抑制高斯或非高斯有色噪音，且能反映信號的相位資訊，又可檢測出信號間的相位耦合，亦可分析非線性信號，並可擷取不同於高斯信號的多種信號特徵，目前已廣泛應用於信號檢測、參數估計、特徵提取及分類識別，是現代信號處理領域近年來十分重要的發展¹⁰。

高階統計量是指大於二階統計量的高階矩(Higher-Order Moments)與高階累積量(Higher-Order Cumulants)，以及其多維傅立葉轉換後的頻譜高階矩譜(Higher-Order Moment Spectra)與高階累積量譜(Higher-Order Cumulant Spectra)。由上述四種主要的高階統計量方法中，由於高斯過程的高階統計量恆等於零而高階矩則無此特性，可以有效抑制加性高斯噪音，並可建立非高斯信號與線性信號傳遞函數間的關係，所以通常使用高階累積量做為分析非高斯隨機過程的主要工具¹⁰。高階累積量譜中的雙譜(Bispectrum)由於階數最低，處理方法最簡單，含有功率譜中所沒有的相位資訊，又能

有效的抑制高斯噪音，是目前高階譜研究中最常用的目標特徵分析法。在艦船水聲目標分類應用中，由於不同類型的艦船其相位耦合的線譜數目不同，耦合的強弱不同，最大耦合強度所對應的頻率位置也不同，因此，高階累積量譜中的耦合特徵可做為水聲目標分類識別的依據¹¹。

三、倒傳遞類神經網路

類神經網路是用多個相連結的人工神經元來模仿生物神經網路的能力，其具有高速計算能力與高容量記憶能力，可透過調整連結神經元的加權值來使網路具有學習能力，並且對資訊的儲存採用分散式記憶，將資訊散佈在每個神經元的連結上，對於不完整或有雜訊的輸入也能做正確的處理，具有模糊推論(Fuzzy Reasoning)的能力，可適用於對受海洋環境干擾與聲納通道失真影響的水聲信號進行目標分類^{9, 12}。目前類神經網路模式可分為四類：

- (一)監督式學習網路。
- (二)非監督式學習網路。
- (三)聯想式學習網路。
- (四)最適化應用網路。

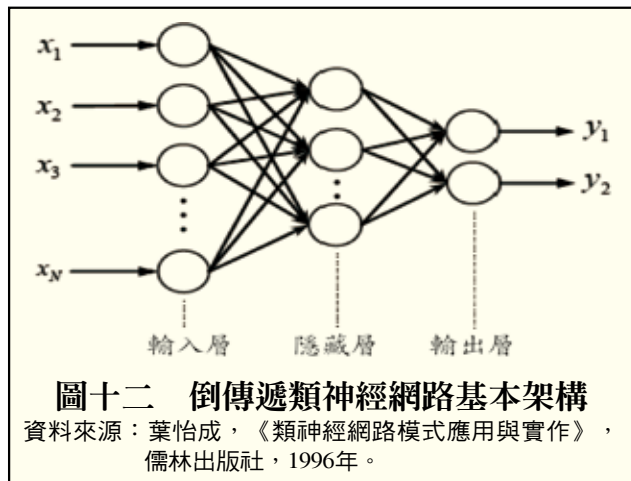
其中以屬於監督式學習網路的倒傳遞類神經網路是現今類神經網路中最具代表性且應用最普遍的模式。其網路架構可分為輸入層、隱藏層與輸出層等三層(如圖十二)。

隱藏層的存在是提供類神經網路表現處理單元間的交互作用與問題內在結構的能力，其處理單元個數的選擇可由下列兩式擇一

註10：張賢達，《時間序列分析—高階統計量方法》，清華大學出版社，1996年。

註11：張義軍，《基於高階統計量的艦船輻射噪音特徵提取及分類識別研究》，西北工業大學碩士論文，2003年12月。

註12：葉怡成，《類神經網路模式應用與實作》，儒林出版社，1996年。



來決定。

隱藏層單元數=(輸入層單元數+輸出層單元數)/2

隱藏層單元數=(輸入層單元數+輸出層單元數)^{1/2}

類神經網路應用在魚雷目標辨識上可分為學習過程與回想過程兩個階段。首先將含有魚雷噪音信號的水聲資料分成訓練範例和測試範例兩部分。在學習過程中，以大量的訓練範例輸入網路中反覆學習，藉以調整網路連結的加權值，使輸出結果與目標一致；回想過程則是以測試範例輸入網路中取得推論輸出值，並將其與目標輸出值做比較，藉以評估網路執行魚雷目標辨識的精度。

四、高斯混合模型

高斯混合模型是利用數個獨立的多維度高斯分佈函數來模擬信號特徵的分佈模式，其模型計算公式如下：

$$p(\vec{x} | \lambda) = \sum_{i=1}^M p_i b_i(\vec{x})$$

其中M為高斯混合模型的混合數，x為維度D的特徵向量， $b_i(x)$ 為基本密度函數， p_i 為混合權數且滿足 $\sum p_i=1$ 的條件。每個D維的基本高斯分佈函數如下式。

$$b_i(\vec{x}) = \frac{\exp\left\{-\frac{1}{2}(\vec{x} - \vec{\mu}_i)^T (\Sigma_i)^{-1} (\vec{x} - \vec{\mu}_i)\right\}}{(2\pi)^{\frac{D}{2}} |\Sigma_i|^{\frac{1}{2}}}$$

上式中的 μ 是平均向量(Mean Vector)， Σ_i 是共變異數矩陣(Covariance Matrix)。一個完整的高斯混合模型 λ 可以用平均值 μ_i 、共變異數矩陣 Σ_i 和混合權數 p_i 等的集合來表示：

$\lambda = \{p_i, \vec{\mu}_i, \Sigma_i\}, i=1, \dots, M$ 使得模型很平滑的近似任意形狀的密度分佈。

由於高斯混合模型具有概念簡單，容易實做的特性，其性能優於類神經網路(Neural Networks)、向量量化(Vector Quantization)辨識法，是目前最廣泛研究與使用的艦船輻射噪音特徵辨識模型^{13,14}。

高斯混合模型的訓練一般採用最大期望值演算法(Expectation Maximization)，其主要目的是將已知的魚雷噪音信號特徵做為訓練範例X，並在初始模型參數下以疊代方式找出一組模型參數集合 λ ，使得 $p(X | \lambda)$ 的期望值達到最大化，即完成模型的訓練。而執行目標識別時則將所接收到的聲納信號特徵代入魚雷噪音模型中計算其相似度值(Likelihood)，若其相似度值大於所設定的臨界門檻值，則可推測接收信號中隱含有魚雷目標輻射噪音特徵的存在(如圖十三)。

五、實際案例

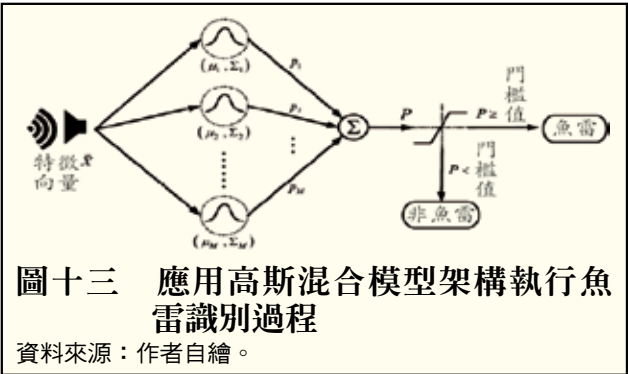
註13：D. A. Reynolds and R. C. Rose, "Robust text-independent speaker identification using Gaussian mixture speaker models", IEEE Trans. Speech and Audio Processing, vol.3, no.1, Jan.1995, pp.72-83.

註14：吳金池，《語音辨識系統之研究》，中央大學電機工程研究碩士論文，中華民國90年6月。

表二 魚雷輻射噪音辨識結果

辨識率	信噪比						
干擾噪音	-10 dB	-5 dB	0 dB	5 dB	10 dB	15 dB	20 dB
有色噪音	22.5%	74.75%	96%	97.5%	98%	99.25%	99.5%
白色噪音	27.25%	72.5%	94.25%	95.25%	96%	96.25%	97.5%

資料來源：本研究整理。



圖十三 應用高斯混合模型架構執行魚雷識別過程

資料來源：作者自繪。

本案例是在高雄外海使用佈放於海中的水中聽音器，實際收錄各型船艦及魚雷的水中輻射噪音，計選用海巡署海巡艇200段聲源檔，輕型魚雷100段聲源檔，重型魚雷100段聲源檔，總共400段聲源檔，並加入有色噪音及白色噪音做為干擾，採用倒傳遞類神經網路辨識方法分析。其結果(如表二)，在信噪比為0dB條件下依舊保有90%以上的辨識率；但當信噪比降至-10dB，其辨識率則只剩20%多。

肆、魚雷目標非聲輔助資訊證據技術

當魚雷目標識別器依聲特徵完成為魚雷或非魚雷辨識後，還是無法判定何種類型的魚雷，還要與預警聲納偵測追蹤到的目標運

動軌跡構成目標特徵資訊證據，再與作戰海洋環境、戰場態勢等資訊證據，經數據融合算法來確認來襲魚雷的類型(如圖十四)，立即經戰術反應決策模組做戰術評估後，擇一有效魚雷反制器材(其功能如表三)，對來襲魚雷予以軟殺或硬殺，或者機動迴避，以減低本艦免遭魚雷攻擊的機會。

一、目標特徵資訊證據

目標特徵資訊證據是指能夠依靠Lofar頻譜和Demon頻譜分析技術直接取得，能客觀反映其屬類型的目標的資訊，主要包括4個證據：

(一)魚雷重量級別

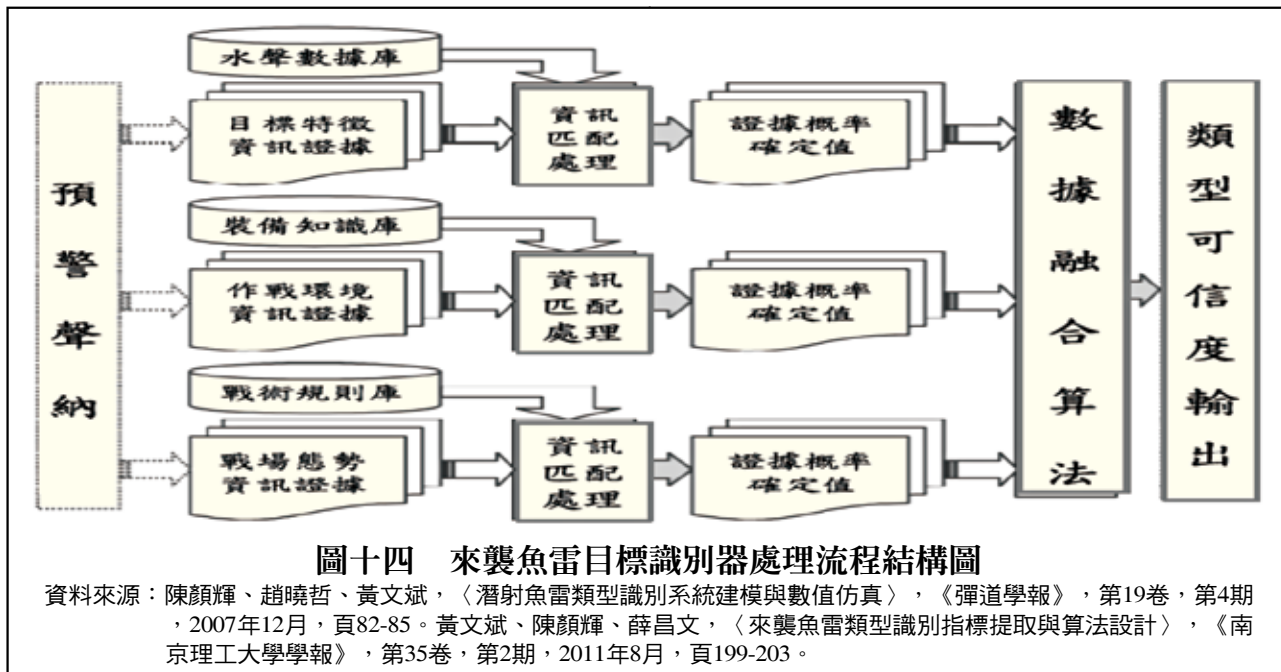
現代魚雷有重型和輕型之分，由於線導魚雷不但有線導投放裝置，還有自導作用，航程遠、動力裝置大，故多為重型魚雷，而傳統的自導魚雷或直航魚雷則相對較輕。

(二)魚雷航態變化

直航魚雷的航速和航向是固定的：自導魚雷通常設計為兩段航速制，航行中可能會實施1次變速；線導魚雷航行狀態可由潛艇實施控制，一些典型導引方法(如間斷控制雷速導引)還要求在高低速間多次交替，從而帶來頻譜明顯的變化。

註15：陳顏輝、趙曉哲、黃文斌，〈潛射魚雷類型識別系統建模與數值仿真〉，《彈道學報》，第19卷，第4期，2007年12月，頁82-85。

註16：黃文斌、陳顏輝、薛昌文，〈來襲魚雷類型識別指標提取與算法設計〉，《南京理工大學學報》，第35卷，第2期，2011年8月，頁199-203。



表三 魚雷反制裝備的功能表

類型	功能	反制對象
火箭式水聲干擾彈	模擬艦船噪音干擾軟殺	聲自導魚雷
火箭式水聲誘標彈	模擬艦船噪音誘騙軟殺	聲自導魚雷
火箭式假艤流氣泡彈	產生氣泡假艤流銜接真艤流，誘騙消耗航程造成軟殺	艤跡自導魚雷
火箭式深水炸彈（類似刺蝟彈）	爆炸寬頻噪音干擾軟殺	聲自導魚雷

資料來源：本研究整理。

（三）魚雷動力類型

由聲納偵測頻譜及音色(Tones)很容易判斷出魚雷的動力裝置類型，電動力無航跡、噪音小，多用於具有聲自導裝置的魚雷上；熱動力魚雷又可分為蒸氣瓦斯魚雷和新型燃料魚雷，目前的蒸氣瓦斯魚雷均為直航魚雷，新型熱動力魚雷多為線導魚雷。

（四）魚雷主動脈波

現代水面艦艇普遍裝配了反魚雷防禦系統，特別是拖曳式魚雷預警聲納的運用，使得檢測來襲魚雷主動聲脈波信號的能力大大增強，如果水面艦艇的魚雷預警裝置探測到來襲魚雷的主動聲脈波，則可判斷該雷的自導裝置必然為聲自導^{17,18}。

二、作戰海洋環境資訊證據

由於受自導機制、導引方式及技術性能方面的限制，不同類型魚雷的作戰使用受到海洋環境因素影響非常明顯，主要包括3個證據：

（一）水文條件

在較大負梯度的海域，魚雷自導裝置的作用距離會大大縮小，嚴重的甚至會失去做為聲自導魚雷使用的意義，潛艇在實施魚雷

註17：趙正業，《潛艇火控原理》，北京，國防工業出版社，2003年9月。

註18：周德善、李志舜、朱邦元，《魚雷自導技術》，北京，國防工業出版社，2009年9月。

攻擊時必然考慮到這一因素，水面艦艇進行魚雷類型判斷時也應予以考慮。

(二) 海域海象等級

高海象時的環境背景噪音會嚴重遮蓋目標噪音，使魚雷聲自導裝置作用距離變得很小，大風浪時的目標艦船艤流邊界模糊不清，使艤跡自導魚雷使用受限；反之，水面艦艇受到潛射直航魚雷和線導魚雷攻擊的可能性就大一些。

(三) 海域深度

魚雷出管後都有一個非穩態的下沉階段，重型魚雷下沉幅度大一些，輕型魚雷的小一些。另外，線導魚雷的導線護管將隨著魚雷向前航行而被拉伸呈自然下垂，較大的航程可使其垂幅達到數10公尺，因此對海域水深要求更高^{17, 18}。

三、戰場態勢資訊證據

戰場態勢對潛射魚雷的選用也有很大的影響，與類型識別有關的載台和魚雷運動資訊包括6個證據：

(一) 水面艦艇航速

主動聲自導魚雷不宜攻擊高速航行的水面艦艇；被動聲自導方式無法攻擊低速或錨泊狀態的水面艦艇；艤跡自導魚雷無法攻擊7節以下的水面艦艇；線導魚雷的導引前提是發射艦艇連續追蹤目標噪音，對於低速或停俾狀態的目標無法適用。

(二) 曲折機動頻度

為了保持隱蔽性，現代潛艇以自導或直航魚雷攻擊時，常常採用純方位法(Bearing on)被動解算目標的運動參數，但純方位法收斂時間長，難以適用曲折機動的運動目標

，因此，頻繁採取變速或變向機動的水面艦艇受線導魚雷攻擊的可能性會比較大一些。

(三) 魚雷攻擊徵兆

由於被動偵測的難度大，潛艇發射自導或直航魚雷前可能使用主動聲納偵測水面艦艇；而對於線導魚雷的導引則只需被動偵測獲取水面艦艇的方位資訊即可，通常不會再冒險使用暴露性的主動偵測方式。

(四) 魚雷發射距離

由發射時的非連續噪音可估算魚雷出管的大概發射距離，通常直航魚雷發射距離較近，自導魚雷可在較遠距離實施發射，線導魚雷則可在更遠的距離發射。

(五) 魚雷齊射數量

潛艇實施直航魚雷攻擊時通常會一次扇面齊射3枚，自導魚雷通常會以單枚也可能2枚前後間距(避免自導自干擾)齊射，線導魚雷一般以單枚攻擊(避免導線纏繞)。

(六) 魚雷攻擊舷角

直航魚雷在目標正橫附近(目標舷角50度~120度)實施攻擊；聲自導魚雷在目標舷角20度~120度實施攻擊；艤跡自導魚雷在目標舷角30度~150度進入目標艤流帶實施攻擊；線導魚雷基本上不受目標舷角的影響^{17, 18}。

上述13個資訊證據與魚雷類型識別有密切的關係，但其資訊取得相當不易，一般其獲取的難易度可概分為3類：

1. 易獲取(是指水面艦艇只需通過簡單探測即可獲取的戰場資訊)：曲折機動頻度、水面艦艇航速、水文條件、海域海象等級、海域深度。

2. 可獲取(是指在加強觀察警戒基礎上

表四 在相同場景條件下魚雷以不同目標舷角攻擊到艦艇的時間

目標舷角	預估撞擊時間
0°	2分8秒
15°	2分11秒
30°	2分19秒
45°	2分34秒
60°	2分58秒
75°	3分31秒
90°	4分17秒
模擬計算條件	1. 水面艦艇航速12節。 2. 魚雷航速30節。 3. 兩者相距3,000公尺。

資料來源：本研究整理。

，水面艦艇充分利用各種探測設備所能獲取的戰場資訊)：魚雷齊射數量、魚雷攻擊舷角、魚雷主動脈波、魚雷動力類型、魚雷攻擊徵兆。

3. 難獲取(是指水面艦艇憑藉目前探測設備有一定獲取難度，但仍存在獲取可能性的戰場資訊)：魚雷重量級別、魚雷發射距離、魚雷航態變化。

因獲取程度不同，很容易造成資訊的確定性與不確定性，因此，需將13個資訊證據經過數據融合算法採用Dempster Shafer理論做識別證據推理分析，剔除不確定性的證據，而得出高可信度的魚雷類型，交由戰術反應決策模組，做戰術評估後，擇一有效魚雷反制器材^{19, 20}。

伍、結語

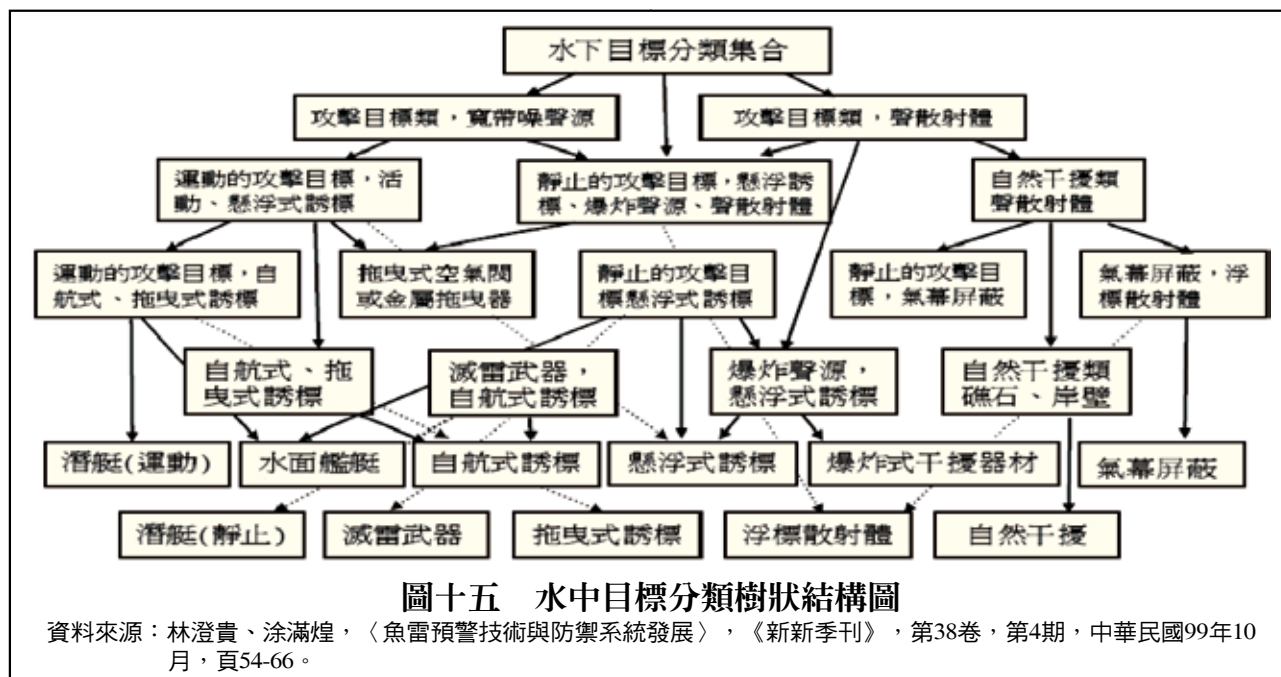
水面艦艇的反魚雷防禦系統通常由魚雷預警系統、戰術決策模組、魚雷反制裝備等

三部分構成。魚雷預警系統的主要功能是對艦艇有威脅的魚雷目標發出警報，並追蹤其方位與距離。假設艦艇以12節航行於海上，若偵測到3,000公尺外有30節航速的魚雷以不同目標舷角來襲，如在無任何防禦反制作為(也無機動迴避)情況下，預估艦艇在3分鐘內會被魚雷擊中，表四為在不同目標舷角被攻擊到的時間。從表四可知，當水面艦艇魚雷預警系統偵測到魚雷威脅目標時，可以採用反魚雷措施的時間相當有限。因此，其魚雷目標識別器的處理時間也相對地短暫。為使水面艦艇在遭受到敵方魚雷攻擊威脅時，能有充足的時間實施有效防禦作為，故所要求的魚雷預警系統之預警距離需儘可能的遠，且其對魚雷目標辨識的處理速度要快以及判定魚雷類型的準確率要高，才能提高水面艦艇的存活機率。

不同動力型式的魚雷在其輻射噪音頻譜上會擁有相異的特徵分佈，然而魚雷輻射噪音的水聲樣本是各個國家的軍事機密，想要擁有各型魚雷完整的水聲信號資料是非常困難的事。若使用類神經網路或高斯混合模型做為目標辨識技術，則魚雷樣本數量的多寡將會影響到類神經網路在學習過程中是否能真正對其特徵做出正確分類，以及所建構出的魚雷輻射噪音模型是否有足夠的代表性，進而影響到對魚雷目標判斷分類的精確度。因此需要採用專家系統判決方法來辨識實際的作戰海域裏的很多噪音(如圖十五)³，專家系統判決方法是基於領域專家的經驗所建

註19：賀一平，《基於信號融合的目標識別分類技術研究》，西北工業大學碩士論文，2002年3月。

註20：周春花，《基於D-S證據推理的目標艦船融合檢測研究》，西北工業大學碩士論文，2004年3月。



立的推理判決系統，具有對樣本依賴性的優點，能滿足魚雷目標識別器的建構需求^{21, 22}。

若是採用螺旋槳軸頻估計做為魚雷目標特徵的識別依據，雖然理論上螺旋槳轉動的輻射噪音在頻譜圖上的線譜基頻與其各次諧波的振幅能量是依次逐漸遞減，但在實際情況下因聲源信號在傳播過程中經過多重路徑與環境噪音干擾等影響，以致無法得到高信噪比的目標輻射噪音，使得線譜振幅會有起伏不定甚至有斷續的現象發生，而造成無法檢測出足夠數量的目標線譜可供執行目標軸頻估計。如有齊射魚雷來襲時出現相近的各自基頻，其諧波成份亦會相近，而造成分辨的困難度，依目前國外研究資料對此狀況亦未有分辨技術，需尚待發展。因此，未來對魚雷預警系統的研究應著重在遠程魚雷輻射

噪音的低頻弱信號檢測以及魚雷目標特徵提取與辨識技術之精進，使其更能結合目標運動軌跡、作戰海洋環境、戰場態勢等資訊證據，做數據融合來判定何種類型的魚雷，期以提升魚雷目標識別器的功能，再經由戰術反應決策模組做戰術評估後，再擇一有效魚雷反制器材，對來襲魚雷予以軟殺或硬殺。

< 參考資料 >

1. DAVID EWING, "Pre-emptive defence: guarding against the modern torpedo", Jane's International Defence Review, 2011.
2. 林澄貴，〈反魚雷防禦技術與系統發展〉，《新新季刊》，第34卷第4期，中華民國95年10月，頁139-150。
3. 林澄貴、涂滿煌，〈魚雷預警技術與

註21：陳航、李志舜、梁紅，〈水下目標分類專家系統的推理方法與實現〉，《系統工程與電子技術》，第24卷，第2期，2002年4月，頁66-68。

註22：許妍，〈被動目標檢測與自動判決專家系統〉，哈爾濱工程大學碩士論文，2007年3月。

防禦系統發展》，《新新季刊》，第38卷，第4期，中華民國99年10月，頁54-66。

4. 楊日杰、高學強、韓建輝，《現代水聲對抗技術與應用》，北京，國防工業出版社，2008年9月。

5. 陳玉春，《反魚雷技術》，北京，國防工業出版社，2006年4月。

6. Urick, R. J., Principles of underwater sound, 3rd ed., McGraw-Hill, 1983.

7. 楊春，《基於魚雷報警聲納的目標識別技術基礎研究》，哈爾濱工程大學碩士論文，2005年12月。

8. 王國傳，《魚雷報警與攔截技術》，哈爾濱工程大學碩士論文，2003年12月。

9. 鮑雪山，《被動目標Demon檢測方法研究及處理系統方案設計》，哈爾濱工程大學碩士論文，2005年12月。

10. 張賢達，《時間序列分析—高階統計量方法》，清華大學出版社，1996年。

11. 張義軍，《基於高階統計量的艦船輻射噪音特徵提取及分類識別研究》，西北工業大學碩士論文，2003年12月。

12. 葉怡成，《類神經網路模式應用與實作》，儒林出版社，1996年。

13. D. A. Reynolds and R. C. Rose, "Robust text-independent speaker identification using Gaussian mixture speaker models", IEEE Trans. Speech and Audio Processing, vol. 3, no. 1, Jan. 1995, pp. 72-83.

14. 吳金池，《語音辨識系統之研究》，中央大學電機工程研究碩士論文，中華民國

90年6月。

15. 陳顏輝、趙曉哲、黃文斌，〈潛射魚雷類型識別系統建模與數值仿真〉，《彈道學報》，第19卷，第4期，2007年12月，頁82-85。

16. 黃文斌、陳顏輝、薛昌文，〈來襲魚雷類型識別指標提取與算法設計〉，《南京理工大學學報》，第35卷，第2期，2011年8月，頁199-203。

17. 趙正業，《潛艇火控原理》，北京，國防工業出版社，2003年9月。

18. 周德善、李志舜、朱邦元，《魚雷自導技術》，北京，國防工業出版社，2009年9月。

19. 賀一平，《基於信號融合的目標識別分類技術研究》，西北工業大學碩士論文，2002年3月。

20. 周春花，《基於D-S證據推理的目標艦船融合檢測研究》，西北工業大學碩士論文，2004年3月。

21. 陳航、李志舜、梁紅，〈水下目標分類專家系統的推理方法與實現〉，《系統工程與電子技術》，第24卷，第2期，2002年4月，頁66-68。

22. 許妍，《被動目標檢測與自動判決專家系統》，哈爾濱工程大學碩士論文，2007年3月。



作者簡介：

林澄貴先生，國立台灣大學海洋研究所海洋物理碩士，現服務於國家中山科學研究院。
吳柏賢先生，國立成功大學系統及船舶機電工程學系博士，現服務於國家中山科學研究院。