

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

高頻主動聲納效能分析研究 (III)

計畫編號：NSC 89 - 2623 - D - 002 - 003

執行期限：88 年 7 月 1 日至 89 年 6 月 30 日

執行單位：國立台灣大學應用力學研究所 造船及海洋工程學研究所

計畫主持人：郭茂坤 教授

協同主持人：陳琪芳 副教授

研究助理：林穎聰、謝力文、黃明俊

一、中文摘要

本文以模組分析的理論為基礎，建立三維的模組分析模式(Modal Spectrum of 3D PE Field, MOS3DPEF)，進行有關模組分析計算。以台灣東北海域為算例，首先以 FOR3D 做三維聲場計算，再利用模組分析程式求得模組模態及振幅。結果顯示台灣東北海域之海洋環境為一方位角效應強烈且模組耦合效應強烈的海洋環境。

Abstract

The modal spectra of the three-dimensional sound field (abbreviated as MOS3DPEF) are determined by integration of the three-dimensional sound field computed by FOR3D code and the local modal function computed by FEMODE. The case of off Northeastern Taiwan is studied using MOS3DPEF. Results show that ocean environment where off Northeastern Taiwan exists has both 3D effect and strong modal coupling effect.

二、研究背景

反潛作戰是海軍作戰中最困難與複雜的作戰型式，主要原因在於海洋環境使潛艦偵測困難，因而使潛艦具有高度的隱匿性，使其在戰略與戰術上享有優勢。為了消弭此種不對稱發展，如何強化海軍偵潛能力應為當務之急。由於反潛作戰在時間上具有連貫性，必須由偵測、鑑定、定位、追蹤與獵殺

逐一開展。這兩項因素的交互作用，使得發展偵潛技術成為各國海軍在反潛作戰上的重要工作，各國也投入了大量人力與物力從事此領域的研究。聲納、可變深度聲納、拖曳式聲納與水中監聽系統均在此需求下產生。這些不同偵潛裝備的運用，使得偵潛成功率大為提升。

海軍目前使用的聲納系統主要分為主動式聲納與被動式聲納兩種型態。主動式聲納主要是將聲波由聲納發射出去，當聲波撞及目標後，再將其輻射或反射回來之聲波信號加以接收研析進而研判目標之位置。被動式聲納則主要是傾聽及接收水下目標或其它水面艦船所輻射來之噪音。主動式聲納由於其工作頻率高，一般約為 3k-20k 左右，因其高頻的特性，使其聲波在水中傳播時極易衰減，它的偵測距離有限。又由於聲納發射功率強大的音源，所以不僅能對水下目標提供“預警”，更容易暴露自己的位置而遭潛艦攻擊。被動式聲納的運用，近年來有迅速成長的趨勢，因其接收較低頻信號使其偵測距離較遠，又具隱密性。但其主要缺點則是大多數被動式聲納只能偵知水下目標的方位而無法得悉距離，因此在目標定位及信號處理時較費時。固定在海床上的水下監聽系統可改善此一缺點，但定位精確度仍嫌不夠。兩型聲納各有優缺點，彼此可取長補短，相互支援。被動聲納可做早期廣泛監視，主動聲納則在被動聲納建立目標基準點後，給於精確定位及獵殺。不論使用何種聲納，都必須經由聲音在水中的傳播方能達成目的。因此，欲求有效進行反潛作戰，必須

對聲音在水中的傳播有所瞭解。

三、研究動機與目的

由於主動聲納之操作頻率在 3.5KHz-10KHz 之範圍，其音傳損耗若使用低頻音傳計算的 PE 模式，所需計算時間太長，不符合海軍實際使用。並且目前國內所擁有的主動聲納音傳模式多為利用聲線在水平方向無變化的海洋環境下傳遞而作的計算，台灣四周海域水深變化，原有程式不敷使用，因此發展一適用於台灣海域，水平方向急劇變化的環境，高頻主動聲納音傳數值模式的發展有其必要性。

主動聲納效能分析之另一重要參數為混雜迴音，艦艇上主動聲納以最大能量發射聲波，因海域不同，將產生不同強度之混雜迴音，使得訊雜比(Signal to Noise Ratio)或聲納效能指數(Figure of Merit)也因海域不同而有所差異。因而混雜迴音之估測為必需的項目。一般艦艇之主動聲納往往配備量測混雜迴音之能力，但在預測主動聲納偵測距離時，必需事先預估混雜迴音。因此本案將混雜迴音之研究列為計畫目標之一。混雜迴音之理論與經驗公式估算在多項文獻已記載[1-7]，本案計畫在第一、二年收集相關文獻，在第三年對現有理論與經驗公式作綜合整理，並建立混雜迴音預估模式。

四、研究方法

1. 主動聲納效能分析的主要架構

主動聲納效能分析的主要架構為主動聲納方程式

$$SL - 2TL + TS - (NL - DI) = DT$$

或

$$SL - 2TL + TS - RL = DT$$

其中 SL:聲納音源強度(Source Level), dB re 1 μ Pa, @1m。

2TL:聲音由音源至目標來回的傳播損耗(Transmission Loss), TL 為單程損耗, dB re 1m。

TS:目標強度(Target Strength), dB re 1m。

NL:背景噪音強度(Ambient Noise

Level), dB re 1 μ Pa。

RL:混雜迴音強度(Reverberation Level), dB re 1 μ Pa。

DI:陣列增益指數(Directivity Index), dB。

DT:偵測基準(Detection Threshold), dB。

(1)及(2)式亦可寫成下列形式

$$SE = SL + TS - 2TL - (NL - DI)$$

或

$$SE = SL + TS - 2TL - RL$$

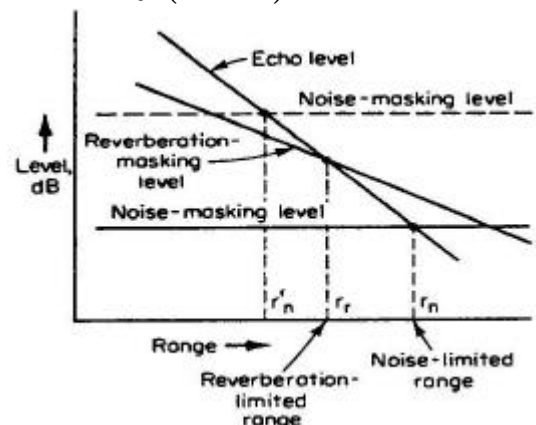
其中

$$\text{Echo Level} = SL + TS - 2TL$$

$$\text{Effective Noise} = NL - DI$$

SE:訊號餘額(Signal Excess)

(3)及(4)式可以圖形來解算主動聲納之偵測距離。(見下圖)



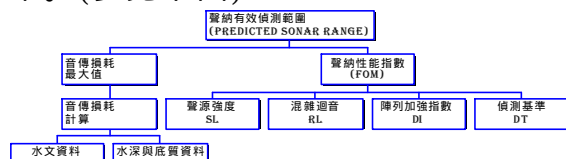
主動聲納偵測距離解算圖

(摘自參考[1], 第 24 頁, 圖 2.2)

由圖中得知當混雜迴音高出背景噪音時，偵測距離為回音限制距離(Reverberation-limited Range);若背景噪音高出混雜迴音時(如圖中之虛線所示)，則偵測距離為噪音限制距離(Noise-limited Range)。(1)

(2) 探討主動聲納之偵測效能亦即精確掌握主動聲納方程式中兩項環境參數 - 音傳損耗及混雜迴音。聲納效能的主要評估項目為其有效偵測範圍(Predicted Sonar Range)，此有效範圍決定於聲納性能指數(Figure of merit)對音傳損耗所設的上限。而聲納性能指數在被動式偵測中等於目

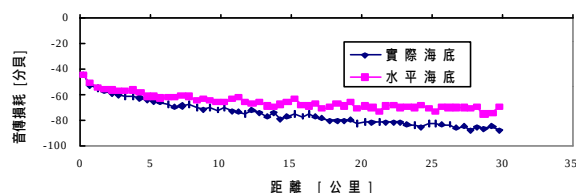
標物之聲源強度加上接收陣列方向指數並扣除背景噪音強度及偵測基準。(參見下圖)



故偵測過程中音傳損耗與混雜迴音為二大必要輸入條件。本計畫先以混雜迴音限制之環境作考量分三年執行。第一、二年著重高頻音傳程式發展，第三年以混雜迴音為主要研究重點。

2. 高頻音傳損耗程式發展

圖一為利用 PE 程式計算 3.5KHz 之音傳損耗(PE 程式無頻率限制，只是其計算所需時間隨頻率增加而增加，圖一之 3.5KHz 的算例在 Pentium 100 的 PC 上耗時 23 小時，因此使用 PE 計算高頻音傳損耗不可行)，以水平海底與實際海底的海洋環境所計算之音傳損耗，差距可達 10dB，若 FOM 為 140dB，即最大容許之音傳損耗為 70dB，則最大偵測距離判斷之誤差幾近 10 公里，誤差可達 100%。本案之目標即為發展一適用於水深多變化的海域之高頻音傳損耗計算程式。



圖一實際海底與水平海底之音傳損耗差異圖

3. 混雜迴音的研究

文獻中對混雜迴音有相當詳細報告。本案計算在第一、二年時逐漸蒐集相關文獻，在第三年時將文獻中的混雜迴音理論及經驗公式作綜合整理，目的希望建立一估算混雜迴音之模式。

五、

本計畫迄今已完成：1. NTURAY 聲線程式；2. NTURAY、HARPO (Hamiltonian

Ray-Tracing Program for Ocean)與 BELLHOP (由 Acoustic Toolbox of NJIT 取得)等聲線計算程式之評估；3. 高頻音傳理論模式— 高斯射線群法 (Gaussian Beam Ray Tracing Method)之建立；4. 混雜迴音文獻回顧；5. 建立迴音數值預估模式。前三項已納入在第一、二年的成果報告，第 4、5項為本次報告之主要內容。

(一) 文獻回顧

在文獻[7]中，混雜迴音（或作混響 Reverberation）之定義為：“Reverberation is defined as that portion of the sound received at a hydrophone, which is scattered(散射) by the ocean boundaries or by volumetric inhomogeneities.”[7]，即混雜迴音為由海面、海床或水中物質散射之聲音。混雜迴音一般可分為三個來源：[7, 8]

1. 海底混響 (sea-floor reverberation)

(1) 原因

由於海底地形之高低起伏及海底沉積物造成。聲波入射海底時，其反射係數可以經由假設為平面波入射來求得。

(2) 理論

A. 藍伯特定理(Lambert's law)：假設入射之聲壓密度(Intensity)為 I_i ，則入射至面積 dA 上之聲壓密度為 $I_i \sin \theta dA$ ，依照藍伯特定理，在散射角為 φ 處之散射聲壓密度 I_s 為 $I_s = m I_i \sin \varphi \sin \theta dA$ ，其中 μ 為散射常數，約為 0.02。此定理原本用於描述光在粗糙表面之散射，其公式中並沒有和海底高低起伏程度有關的參數，此定理在海底表面粗糙而地形平坦時可以應用於描述海底散射。

B. 馬許散射理論 (Marsh's theory)：本來用於描述因海面高低起伏造成的散射，有時也被用於描述海底因高低起伏造成的散射。但因為海底地形之波數或振幅不像海面有公式可求得，所以在實用上會有困難。

(3) 數值模式 (Numerical Model)

在淺海（水深至少小於 200 公尺）、高頻的環境中，可以用射線理論 (ray theory) 及正態模組 (normal mode theory) 理論。

2. 海面迴響 (sea-surface reverberation)

(1) 原因

為海面高低起伏及近表面氣泡等因素所造成；一般是半經驗公式。

(2) 理論有兩種，簡述如下：

A. Rayleigh 不規則表面理論 (Rayleigh criterion of roughness)：單位面積上，單位聲壓入射時的海面散射係數

$$J_s = \left(\frac{fh \sin q}{K} \right)^2 (1/ft^2), \quad h \text{—海面浪高, 約為 } 0.0026v^{5/2}(\text{ft}), \quad v \text{—風速 (節)}, \quad f \text{—聲波頻率 (kHz)},$$

θ 為聲波入射角, K 、 n 為經驗參數。

B. Beckmenn & Spizzichino：高頻聲波在只考慮表面起伏程度時，單位面積之散射係數為

$$S_s(q_1, q_2) = \frac{F^2 \cos^2 q_1 \cot^2 b_0}{p(\cos q_1 + \cos q_2)^2} \exp \left[-\frac{(\sin q_1 - \sin q_2)^2}{(\cos q_1 + \cos q_2)^2} \cot^2 b_0 \right]$$

，其中

$$F = \frac{1 + \cos q_1 \cos q_2 - \sin q_1 \sin q_2}{\cos q_1 (\cos q_1 + \cos q_2)}$$

$$\tan^2 b_0 \cong 0.006 + 10.24W \times 10^{-3}。$$

式中 θ_1 、 θ_2 分別為入射角及散射角（以垂直為零度計算）， W 為風速 (m/sec)， $\tan^2 \beta_0$ 為海面高低起伏之均方斜率 (Mean-square slope)。

(3) 數值模式

類似於海底迴響，但由結果與海底迴響之聲壓值比較，兩者相差超過 10^{20} 倍，故海面迴響的影響幾乎可以忽略。

3. 體積迴響 (volume reverberation)

(1) 原因

主要由海水本身之非齊次性或海中生物所造成，可視為由海水中的

小散射體造成。

(2) 公式

考慮距離波源 r 的小散射體 dv ，令其反射係數為 S_v ，散射之波場型式 (Beam pattern) 為 $b(\theta, \varphi)$ ，入射聲壓密度 I_i ，則其反射聲壓為 $I_r = S_v I_i \int_v b(q, j) dv$ ，其中 $dv = r^2 d\Omega$ 。
 $c\tau/2$ ， τ 為聲波之激振時間 (Pulse duration)， $d\Omega$ 為固體角 (Solid angle)。海水中的小散射體一般假設是以隨機均勻分佈於海水中，相同的理論推導過程亦使用在處理近表面氣泡散射的問題上。

海底及海面混響之模型可採射線理論及正態模組理論[8]，以下就這二理論之計算背景稍加說明：

A. 模型之環境設定：

淺海環境設定	
海水中聲速 c_0	1508 m/s
海水密度 ρ_0	1033 kg/m ³
海水深度 h	22.6 m
海中鹽度 s	35 0/00
海中溫度 T	15
海底聲速 c_1	1689 m/s
海底密度 ρ_1	2066 kg/m ³
風速	0.3 m/s
波源	
波源所在深度	10 m
線陣列長度	0.1 m
連續波激振時間	0.1 s

B. 基本假設：

(a) 聲波以任何角度入射海面皆

為全反射。

- (b) 假設海底地形平坦。
- (c) 水中聲速為定值。

C. 結論：

- (a) 由於模式數(mode number)會隨聲波頻率增高而快速增加，使計算量過大而不適用，所以 normal mode 所建立之模型適用於中高頻(500~1kHz)、遠距離(如 10000 公尺)。
- (b) 因低頻聲波可傳到較遠距離，但隨距離增加，對 image source 之模型所需之計算時間也會隨之增加，所以可與 normal mode 配合，以虛設波源法計算近距離之混響，而以正態模組理論計算遠距離混響。
- (c) 具有良好指向性之波源(陣列)，可以有效降低混響的影響。
- (d) 混響訊號會隨陣列主波瓣所指方向改變。當海中波速為定值時，最大混響訊號發生的方向約為海水對海底之臨界角方向。
- (e) 混響訊號以海底混響佔絕大部分。

(二) 迴音數值預估模式

前述之兩種理論已有相關研究報告及成果，惟其結果是架構在一不隨距離而變(Range Independent)的環境基礎上，與本計劃所追求真實海洋環境之目標不甚符合，故目前正以非耦合模組(Adiabatic Mode)理論建立迴音數值預估模式，預計四月底完成。以下就所採用之數值預估模式計算方法加以說明。

假設混響之聲壓為 P_r ，則 P_r 可表示為

$$P_r(t) = A_0 P_f(r, h) a(q, j) P_b(r, h) \quad (5)$$

其中 A_0 為只和波源發射能量有關之常數， h 為海水深度， θ 、 φ 分別為聲波對海底之入

射角及反射角， $P_f(r, h)$ 為入射海底散射體之聲壓傳播衰減(TL)， $P_b(r, h)$ 為從海底散射體回到波源之聲壓傳播衰減， $\alpha(\theta, \varphi)$ 為海底之散射函數。為能計算在隨距離 r 改變之環境中的聲場，在上式中的 P_f 及 P_b ，我們將運用非耦合模組(Adiabatic Mode)理論來計算，以下先就理論部份加以說明[9]：

考慮一非齊次(inhomogeneous)、不隨時間改變(time-independent)的波動方程式

$$r(r, z) \nabla \cdot \left[\frac{1}{r(r, z)} \nabla p(r) \right] + k^2(r, z) p(r) = -4p \frac{d(r)}{r} d(q) d(z - z_0) \quad (6)$$

並假設一無方向性單頻點聲源(omni-directional harmonic point source)在 $r_0 = (0, 0, z_0)$ 處，流體密度 $\rho(r, z)$ ，聲速 $c(r, z)$ ，其中波數 $k(r, z) = \omega / c(r, z)$ 。若聲場對 z 軸對稱，則 θ 微分項可消去，再對 θ 從0積分到 2π ，可得

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial p(r, z)}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2 p(r, z)}{\partial z^2} + r(r, z) \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{r(r, z)} \right] \frac{\partial p(r, z)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r(r, z)} \right] \frac{\partial p(r, z)}{\partial r} \right\} + k^2(r, z) p(r, z) = -2 \frac{d(r)}{r} d(z - z_0) \quad (7)$$

以分離變數法表示聲壓 $p(r, z) = \sum_n a_n(z_0) u_n(r, z) R_n(r)$ ， $a_n(z_0)$ 為模組振幅(modal amplitudes)，此處我們假設在距離 r 處，特徵函數 $u_n(r, z)$ 滿足一 Sturm-Liouville 特徵值方程式

$$\frac{1}{r(r, z)} \frac{d^2 u_n(r, z)}{dz^2} + \frac{d}{dz} \left[\frac{1}{r(r, z)} \right] \frac{du_n(r, z)}{dz} + \frac{k_{zn}^2}{r(r, z)} u_n(r, z) = 0 \quad (8)$$

其中 $k_{zn}^2 = k^2(r, z) - k_n^2(r)$ ， k_n 及 k_{zn} 分別為水平及垂直波數。將聲壓表示式代入式(7)，以及 $\sum_n \frac{1}{r(r, z_0)} u_n^*(r, z_0) u_n(r, z) = d(z - z_0)$ ，

並考慮在 r 軸方向上流體緩慢變化之性質(即可忽略 $\frac{\partial u_n(r, z)}{\partial r}$ ， $\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r(r, z)} \right)$)及將式(8)代入，則式(7)成為

$$\sum_n a_n(z_0) u_n(r, z) \left\{ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[r \frac{dR_n(r)}{dr} \right] + k_n^2(r) R_n(r) \right\} = \sum_n \left\{ -2 \frac{d(r)}{r} \frac{1}{r(r, z_0)} u_n^*(0, z_0) u_n(r, z) \right\} \quad (9)$$

由於對任意之 r, z 及 z_0 上式皆須成立，故可得
 $a_n(z_0) = u_n^*(0, z_0) / r(0, z_0)$ 及

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[r \frac{dR_n(r)}{dr} \right] + k_n^2(r) R_n(r) = -2 \frac{d(r)}{r} \quad (10)$$

將 $R_n(r)$ 以 $P_n(r) = \sqrt{r} R_n(r)$ 改寫

$$\frac{1}{\sqrt{r}} \left\{ \frac{d^2 P_n(r)}{dr^2} + k_n^2(r) \left[1 + \frac{1}{4k_n^2(r)r^2} \right] P_n(r) \right\} = -2 \frac{d(r)}{r} \quad (11)$$

當 $k_n(r)r \gg 1$ 時，上式可被近似為

$$\frac{d^2 P_n(r)}{dr^2} + k_n^2(r) P_n(r) \approx 0 \quad (12)$$

由在 r 軸方向上流體緩慢變化之性質，我們可以用WKB近似來解式(12)並轉換回 $R_n(r)$

$$R_n(r) \approx \frac{A}{\sqrt{k_n(r)r}} \exp \left[i \int_{r_i}^r k_n(r) dr \right],$$

$$A = \sqrt{2p} e^{ip/4}, r_i = 0 \quad (13)$$

綜合上述各式，我們得到式(7)完整的非耦合模組/WKB解

$$p(r, z) \approx \frac{\sqrt{2p} e^{ip/4}}{r(0, z_0)} \sum_{n=1}^{\infty} u_n^*(0, z_0) u_n(r, z) \frac{\exp \left[i \int_{z_0}^r k_n(r) dr \right]}{\sqrt{k_n(r)r}} \quad (14)$$

在 P_f 及 P_b 分別由非耦合模組/WKB解得到後，代回混響聲壓之表示式(5)可得

$$P_r(t) = A_0 \times \frac{\sqrt{2p} e^{ip/4}}{r(0, z_0)} \sum_{n=1}^{\infty} u_n^*(0, z_0) u_n(r, h_r) \frac{\exp \left[i \int_{z_0}^r k_n(r) dr \right]}{\sqrt{k_n(r)r}} \quad (15)$$

$$\times a(q, j) \times \frac{\sqrt{2p} e^{ip/4}}{r(0, h_r)} \sum_{n=1}^{\infty} u_n^*(0, h_r) u_n(r, z_0) \frac{\exp \left[i \int_{z_0}^r k_n(r) dr \right]}{\sqrt{k_n(r)r}}$$

其中 z_0 為主動聲納之深度， h_r 為距離 r 處之水深。

六、結論

在台灣東北外海的算例中，我們主要是要討論當聲音在此地形變化劇烈及水文複雜的環境中傳播時，是否有三維效應或者模組耦合效應的發生？首先由聲場的計算得知此環境存在著強烈的三維效應(θ -coupling)。且經由模態的變化與模組振幅的計算得知其模組間能量的轉移亦十分強

烈，亦有強烈的模組耦合效應(modal-coupling)的存在。再經由不同維度對模組振幅所作的計算結果比較，其差異性確實存在，與聲場的計算結果相吻合。且伴隨著主導模組數的提高，其三維效應更為明顯，顯示以高模組數當作初使激發聲場時，將使得三維效應更加明顯。故東北外海的海洋環境同時兼具三維效應與模組耦合效應。

七、計畫成果自評

本計畫目的在建立水聲模組分析，總共執行兩個年度，並已達成計畫目標，並且已台灣東北海域為其中之算例。總括而言，本計畫成果佳，足以為未來反算海洋參數之基礎。

八、參考文獻

- [1] R. J. Urick, Principles of Underwater Sound, 3rd edition, McGraw-Hill Inc, New York, 1983.
- [2] W. S. Burdic, Underwater Acoustic System Analysis, 2nd edition, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1991.
- [3] D. Dellis, "Shallow water reverberation: Normal-mode model predictions compared with bistatic towed-array measurements", IEEE J. of Oceanic Engineering, Vol.18, NO.1, pp.474-482, 1993.
- [4] D. W. Princehouse, "REVGGEN, A real-time reverberation generator", in 1977 IEEE int. Conf. on Acoustics Speech and Signal Processing, 827-835, 1977.
- [5] W. S. Jar, Hordgkiss, "An ocean reverberation model", IEEE J. of Oceanic Engineering, OE-9, 63-72, 1984.
- [6] Jung Yul NA and Sang Kyu HAN "Simulation of Shallow Water Reverberation Signals", Proceeding of '97 International Conference on Shallow-water Acoustics, Beijing, 1997.
- [7] Paul C. Etter, Underwater Acoustic Modeling, 2nd edition, Elsevier science publishers Ltd., London, 1996.
- [8] 楊旭光, "主動式聲納混響消除技術研究", 國科會專題研究計畫 NSC86-2623-D110-004, 1997.

- [9] George V. Frisk, *Ocean and Seabed Acoustics: A theory of wave propagation*, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1994.