

適應性演算法於海洋環境噪音之方向性解析度改善 Improvement of Resolution of Directionality of Ocean Ambient Noise by Adaptive Beamforming

魏瑞昌¹、鄭霓鴻²

摘要

傳統波束形成法是以平面波訊號做為計算基礎，再運用線性累加各角度能量。但海洋中聲波的傳遞受到邊界及能量損耗影響，使陣列接收的訊號在空間相關性上會有所變化，若進行傳統波束形成計算，便無法符合其基本的假設，亦可能造成波束解析度及訊雜比的下降的缺陷。因此本文以噪音空間相關性來探討對波束形成解析度的影響，並使用通訊系統中的適應性演算法來改善波束解析度。由本文的研究結果指出，隨著頻率逐漸增高，則噪音空間相關性就越低，且當噪音空間相關性較低時，的確會使波束解析度變差，在此情況下，本文使用適應性波束形成法來改善波束解析度。從傳統波束形成與適應性波束形成的模擬比較指出，主波瓣的解析度明顯提高，且波束訊雜比也被增加。而在實驗資料的運用中，適應性波束形成法使噪音缺口現象更為顯著，有效改善波束解析度。

關鍵詞：環境噪音、方向性、波束形成、空間相關性、波束解析度、適應性演算法

Abstract

Beamforming can analyze the directionality of noise energy. Conventional beamforming is based on the assumption of plane wave sound field, so the energy from each angle is obtained by linear accumulation of every element. However plane wave assumption may not be satisfied because of the boundary interactions of sound propagation and energy attenuation of water column, therefore conventional beamforming may have poor beam resolution and SNR in applications. This paper is to study of the influence of spatial coherence of ambient noise on beam resolution, and to improve the beam resolution by using the adaptive algorithm from the communication system theory. The results from this paper showed that ambient noise has lower spatial coherence at high frequency, and the beamforming has poor beam resolution because of the lower spatial coherence in noise. Therefore, the adaptive beamforming were performed to improve the beam resolution, and compared with the conventional beamforming. The results showed that beam resolution and SNR was increased by adaptive beamforming, and the application of experiment data showed that the noise notch became more significant. The adaptive beamforming could improved the beam resolution effectively.

Keywords: Ambient Noise, Directionality, Beamforming, Spatial Coherence, Beam Resolution, Adaptive Algorithm

1 國立中山大學海下科技暨應用海洋物理研究所助理教授

2 國立中山大學海下科技暨應用海洋物理研究所研究生

一、前言

在過去的噪音方向性研究中[1-3]，以傳統波束形成法進行海洋環境噪音方向性計算，雖然可以得到主要能量的方向，但是能量的角度卻無法精確的定義，且傳統波束計算是以平面波作假設來進行累加計算。但是在實際海洋環境中，聲波受到密度分層的影響而產生折射，造成噪音的空間相關性有所差異[4-5]，若進行累加計算，則可能產生主瓣寬度過寬及訊雜比低的情況。因此本文將以模擬的方式，探討實驗資料在不同狀態下的波束解析程度。此外，本文將使用適應性演算法[6-7]，改善傳統波束形成法因為噪音空間相關性變動，而產生的主瓣寬度過寬及訊雜比低的缺陷，並引用亞洲國際聲學南海實驗作為範例，利用模擬以及實驗資料，代入適應性演算來提升波束形成的解析能力，提供聲納及水中通訊系統更精確的噪音空間分佈資料。

二、亞洲海域國際聲學實驗

西元 2001 年，美國與台灣等國家共同於台灣鄰近的兩海域舉行亞洲海域國際聲學實驗 (Asian Seas International Acoustic Experiment, ASIAEX) [8]，一處位於東海 (East China Sea, ECS)，主要研究工作為聲波在海床的反應及散射，另一處位於南海 (South China Sea, SCS)，主要研究工作為探討聲波在海中的傳遞特性，實驗時間為四月至八月，如圖 1 所示。

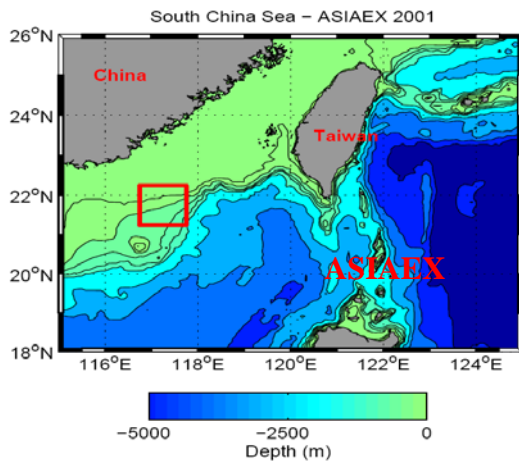


圖 1 ASIAEX 南海實驗區[8]

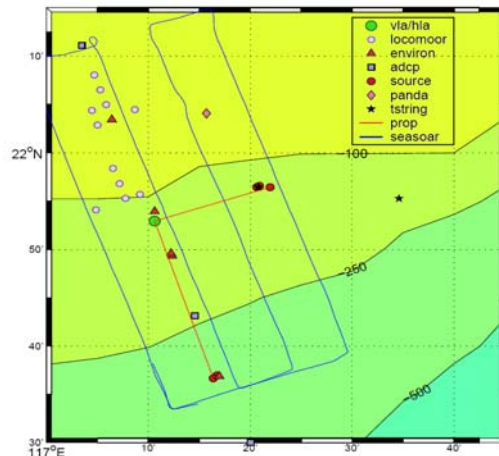


圖 2 相關儀器佈放位置圖[8]

圖 2 為實驗區域所佈放的儀器，其中包括海洋聲學接收陣列與聲源，而海洋聲學接收器包含水平線陣列(Horizontal Line Array, HLA) 和垂直線陣列 (Vertical Line Array, VLA)。VLA 上共有 16 組水下麥克風，HLA 則有 32 組水下麥克風，本文分析之數據來自 VLA。垂直線陣列上的水下麥克風，分成兩個部分，兩個部分的水下麥克風的間距各有不同，上半部 10 個麥克風 (0 號至 9 號) 之間相距 3.75 公尺；下半部的 10 號至 15 號麥克風，每個則相距 7.5 公尺，最接近海床的水下麥克風為編號 15 號，而垂直線陣列上所接收到的環境噪音資料即為本文最主要的數據來源。

三、理論方法

3.1 傳統波束形成法

假設一垂直方向的線性接收陣列，具有 m 個水下麥克風，而各水下麥克風的間距相等，如圖 3 所示。由聲源傳播模式[10]可知，當遠方點聲源能量以球面波方式傳播且距離漸遠時，如不考慮邊界條件或能量損耗的問題，球面波便會逐漸轉成平面波形式入射到垂直線陣列。

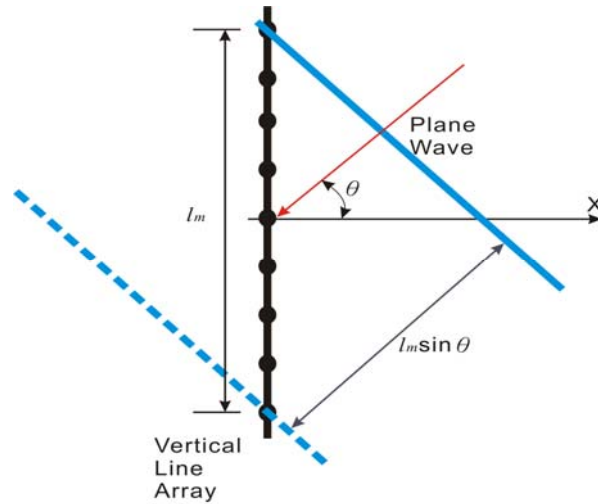


圖 3 平面波入射垂直線陣列示意圖

圖 3 中的平面波由 θ 入射陣列後，波束形成進行 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 的掃描計算，則在第 m 個麥克風的訊號時間延遲 t_m 為：

$$t_m(\theta) = \frac{l_m \sin \theta}{c_m} \quad (1)$$

l_m 為第 1 個到第 m 個麥克風的距離， c_m 為第 m 個水下麥克風所在深度的聲速，則平面波訊號由 θ 入射產生時間延遲 t_m 後，定義第 m 個麥克風的接收電壓為 v_m ， R_m 為第 m 個麥克風的電壓響應，則可知：

$$v_m(t_m(\theta)) = R_m \cos[\omega(t + t_m(\theta))] \quad (2)$$

接著以線性累加的方式，進行角度上陣列電壓值的累加計算。則在角度 θ 的陣列總電壓值可寫為：

$$V_{rms}(\theta) = \sum_{m=0}^{n-1} v_m(t_m(\theta)) \quad (3)$$

而本文的計算分析，便是以式(3)來做垂直方向性能量的計算，再求出每個角度的波束能量，探討噪音能量在垂直剖面上的分佈。

3.2 空間相關性理論

在統計理論[11]的相關性分析中，一般來說可分為兩種，一為自相關 (Auto-correlation) 函數，另一為交互相關 (Cross-correlation) 函數。本文相關性探討是取陣列中不同的水下麥克風訊號來互相比較，因此可由交相關函數計算出二者之間的相關性程度，式(4)即為相關性係數：

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{E[(x(t) - \bar{x})(y(t + \tau) - \bar{y})]}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4)$$

本文將採用交互相關的觀念，以模擬的方式來探討噪音空間相關性對波束解度的影響。此外，為了使傳統波束形成法達到更高的解析程度，將使用適應性演算法代入波束形成中，以權重來進行訊號的加權，提升主要訊號的解析能力，降低因低空間相關性引起的缺陷。

3.3 適應性演算法

傳統波束形成法計算是以線性累加各角度能量的方式，得到噪音在各方向上的分佈

情況，在計算式中並沒有太複雜的演算。而適應性演算法能具有集中波束、抗干擾等如此優越的效果[12]，是因為適應性演算是採用回授累加方式[13]，來調整適應性權重，以降低週遭雜訊能量，並突顯主要訊號的方向。而適應性演算法可依不同的需求及架構分為多種演算法，本文所使用的是最小均方演算法。

3.3.1 最小均方演算法

假設 T 為轉置矩陣， k 為時間， n 為水下麥克風數量，則：
陣列麥克風接收訊號為：

$$X_k = [x_{0k} \ x_{1k} \ x_{2k} \ \dots \ x_{nk}]^T \quad (5)$$

適應性權重向量為：

$$W_k = [w_{0k} \ w_{1k} \ w_{2k} \ \dots \ w_{nk}]^T \quad (6)$$

由式(5)、(6)可得到陣列所輸出的訊號 y_k ，如式(7)所示。而最小平方演算法的運算原則就是使目標訊號 d 與輸出訊號 y_k 的誤差值達到最小化，因此誤差值如式(8)所示：

$$y_k = X_k^T W_k = W_k^T X_k \quad (7)$$

$$e_k = d - y_k = d - X_k^T W_k \quad (8)$$

而一般設定 W_k 均從最小值0開始假設，如此一來不斷的遞迴更新，便可以將 W 收斂至最佳值，如式(9)所示。在這裡步階參數 μ 決定整個最小均方演算法的收斂速度，將式(7)、(8)及(9)整合，便是整個適應性演算法的計算過程。

權重調整更新：

$$W_{k+1} = W_k + \mu e_k X_k \quad (9)$$

3.3.2 適應性波束形成法

實際程式的架構中，因為在通訊中的目標訊號為已知訊號，而在處理海洋環境噪音時，每個角度的環境噪音訊號都是目標訊號，且環境噪音並沒有一定的標準值，因此本文假設環境噪音資料為穩定隨機 (Stationary Random)，亦即資料的呈現是屬於常態分佈。在此假設下可由遍歷定理 (Ergodic Theory) [11]得知，若資料屬於穩定隨機且為常態分佈的訊號，便能尋找一段較能適切解釋整組資料序列特性的資料。而本文的做法是以式(3)所得到的各角度電壓值，進行平均運算後作為目標訊號 d ，來代入適應性方法的演算，因此各角度的目標訊號 d_θ 為：

$$d_\theta = \text{mean} \left(\sum_{m=0}^{n-1} v_m(\theta) (t_m(\theta)) \right) \quad (10)$$

程式最後再將各角度能量矩陣作平均，便可得到適應性計算後的各角度能量，完成適應性波束形成法的演算。圖4即為適應性波束形成法的演算流程。

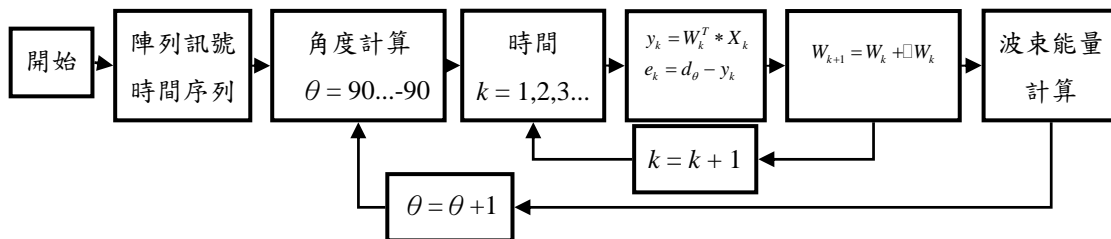


圖4 適應性波束形成法的演算流程

四、波束解析度探討

4.1 噪音空間相關性對解析度的影響

本節將探討聲場的變化是否影響到波束形成的解析度。故以下將模擬垂直線陣列在平面波及非平面波傳播的聲場，並配合實驗資料來觀察噪音空間相關性，及比較波束解析度的差異，討論傳統波束形成法的平面波假設是否可行。

4.1.1 平面波聲場

平面波聲場的訊號頻率為 80 Hz，不加入任何的雜訊，入射角度為 -9° ，設定此角度是為了與後續的實驗資料做比較。參照圖 5 為 80 Hz 平面波之陣列訊號時間序列，橫軸為時間(s)，時間長度僅列出前 0.05 秒，縱軸為各水下麥克風號碼。以此訊號進行相關性分析後，便可得到圖 6 所示的空間相關性係數圖。

空間相關性分析是以兩個水下麥克風的訊號來做相互比較，而本文所有的模擬均以第一個水下麥克風與其他水下麥克風進行相關性計算，進而得到空間相關性係數。從圖 8 中可觀察到空間相關性係數並沒有任何的起伏變化，可稱為全相關的狀態。由於陣列所在聲場為平面波環境，每個水下麥克風接收的訊號均為同一平面波，因此在噪音的空間相關性並不會有任何的變動。

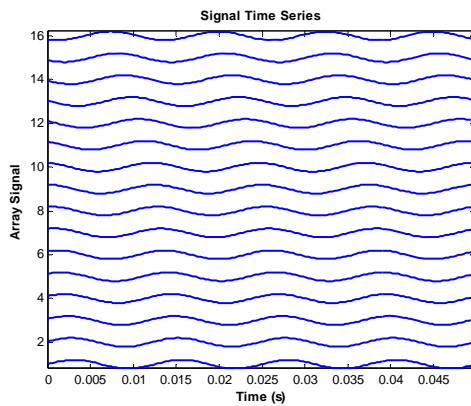


圖 5 80 Hz 平面波陣列訊號時間序列

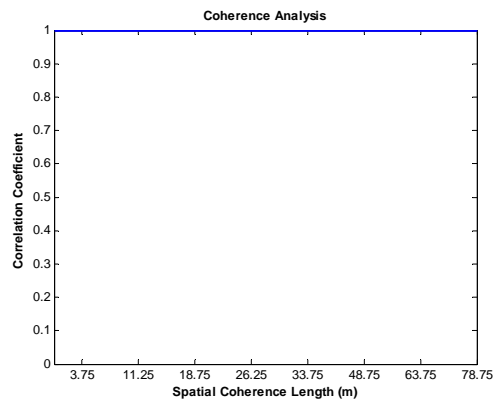


圖 6 80 Hz 平面波之空間相關係數

4.1.2 實驗資料與模擬結果之比較

為了瞭解實際海洋非平面波聲場與平面波聲場的差異，本文以 ASIAEX 實驗資料為例，取 2001 年 05 月 16 日 18 時 36 分的資料進行分析與比較。圖 7 為 18 時 36 分的時頻譜圖，圖中約 18 時 38 分可觀察到明顯的寬頻高能量位準，時間約為 2 秒，再利用傳統波束形成法可得知頻率 80 Hz 的主要能量位於 -9° 。由於訊號入射角及當時的聲速參數都已具有，因此將這些參數代入模擬產生非平面波訊號，並配合平面波訊號來和實驗資料作比較。

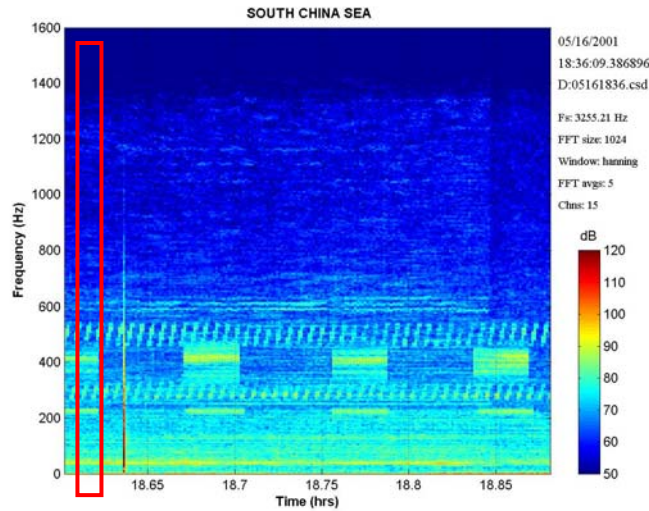


圖 7 ASIAEX 實驗之 05 月 16 日 18 時 36 分時頻譜圖

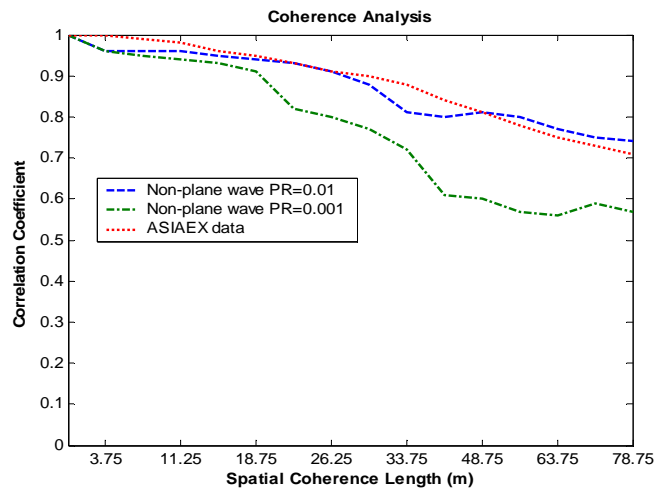


圖 8 80 Hz 非平面波與實驗資料之空間相關性係數

圖 8 中藍線為功率比 0.01 的非平面波訊號，綠線為功率比 0.001 的非平面波訊號，而紅線則為實驗資料的空間相關性係數，訊號頻率均為 80 Hz，而平面波訊號因已知空間相關性係數均為 1，故不再列出比較。首先以相關性係數遞減的速度來看，藍線遞減速度較綠線緩慢，相關性係數遞減至 0.7，而綠線的相關性係數則遞減至 0.5。另外，實驗資料的相關性係數遞減情形與藍線極為相似，一樣遞減至 0.7 左右。由上圖可瞭解到，非平面波訊號的空間相關性分佈與平面波訊號有所差異，於此也可印證本文在第一章所敘述的，聲波在實際海洋環境中並非為平面波模式，使噪音的空間相關性隨距離增加而遞減。

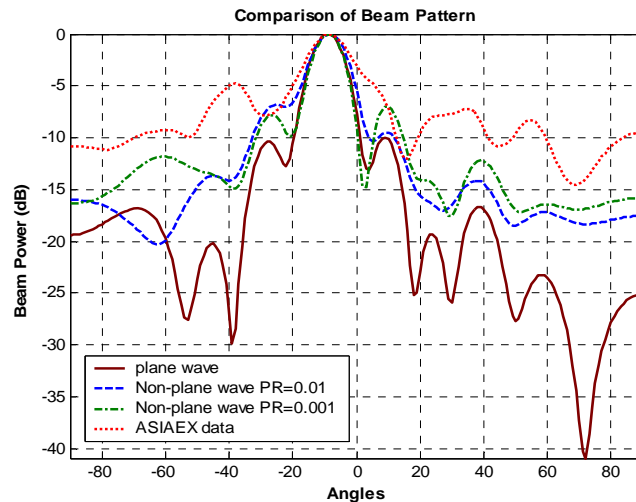


圖 9 80 Hz 平面波及非平面波與 ASIAEX 資料之波束形成比較

將兩組非平面波訊號與實驗資料代入波束形成計算來與平面波訊號作比較，如圖 9 所示。圖中可清楚看到四組訊號的主要波瓣位於 -9° ，且觀察平面波及非平面波訊號與實驗資料的主波瓣寬度差異並不大。再由整體的波束表現，可觀察出主要的差異在於旁瓣的分佈情形，旁瓣能量位準最低為平面波訊號，而非平面波訊號以實驗資料的旁瓣能量為最高，與平面波訊號相差許多。另外在兩組模擬的非平面波訊號中，波束表現並沒有太大的差別，由波束解析數值表的分析，便可清楚瞭解傳統波束形成法在不同聲場的解析情況。

表 1 80 Hz 平面波及非平面波與 ASIAEX 資料之波束解析比較

環境模式	平面波	ASIAEX 資料	非平面波	
			PR=0.01	PR=0.001
主波瓣寬 (度)	12°	16°	13°	11°
波束訊雜比 (dB)	10	5	8	7

表 1 為圖 9 的波束解析數值，各訊號的主波瓣寬度與平面波訊號相比，以 ASIAEX 資料相差最高 4° ，而波束訊雜比則以平面波訊號為最高 10 dB，非平面波訊號中最高有 8 dB 之多，其中實驗資料的波束訊雜比為僅有 5 dB。由此可知，在模擬模式中平面波聲場的空間相關性為最高，波束解析的表現也是最佳的，而非平面波聲場則是因雜訊的增加，使空間相關性遞減越快。在波束解析方面，主波瓣會因旁瓣的增加，使得波束訊雜比降低及不易判斷噪音方向性。故從上述的分析中，確實發現到以傳統波束形成法來計算非平面波聲場時，波束解析程度明顯變得較差。

五、適應性演算法之應用

5.1 傳統波束形成法與適應性波束形成法之模擬比較

在傳統波束形成中，若訊號入射的角度 θ 增加時，陣列在空間中的有效擷取長度 L_e 也會隨著遞減，如此便會造成主波瓣的寬度逐漸擴散。因此本文模擬頻率 80 Hz 的訊號於 60° 方向入射陣列，訊號的功率比為 0.01，以此觀察適應性波束形成法對主波瓣擴散的改善情況。另外，為了可明顯看出波瓣擴散的情形，加入一組由 0° 入射的訊號，觀察主波瓣寬度的差異，如圖 11 所示。

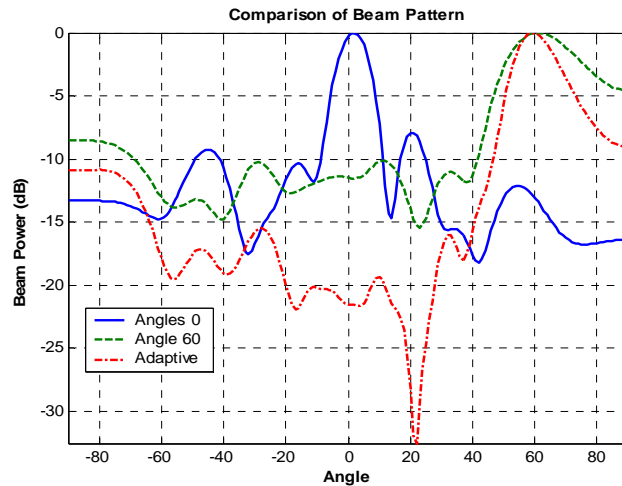


圖 11 高角度訊號之波束解析度差異

圖中藍線為訊號於水平 0° 入射的波束形成表現，仔細觀察在入射角度有些偏移情況，應為雜訊能量造成的影響，使主波瓣的角度偏移 2° 。綠線為訊號於水平 60° 入射的波束形成，主波瓣寬度非常明顯擴大許多，從表 3 可知 60° 的主波瓣寬度比 0° 的主波瓣寬度大 17° 。由此可知較高角度的訊號在傳統波束形成中，主波瓣會因擴散現象而降低解析度，以此可藉由適應性波束形成法來進行改善。圖 11 中的紅線即為適應性波束形成的表現，可明顯的看到主波瓣的解析度提升許多，鄰近旁瓣的能量也較綠線低，從表 3 中可看到適應性波束形成法，對主波瓣寬度的改善程度為 39.3% ，波束訊雜比也增加了 5 dB 。從這裡可瞭解到，運用適應性波束形成法於非平面波聲場解析噪音方向性時，不僅有效抑制波瓣擴散的現象，同時也提升主波瓣的解析度及波束訊雜比。

表 3 高角度訊號之波束解析改善程度

運算方式	主波瓣寬度(度)	波束訊雜比(dB)
傳統波束形成，入射 0°	11°	8
傳統波束形成，入射 60°	28°	11
適應性波束形成，入射 60°	17°	16
改善程度	39.3%	5

5.2 實驗資料的波束解析度改善

從模擬結果中可明顯看到，適應性波束形成法可有效改善低空間相關訊號，所造成的主波瓣過寬及波束訊雜比低的缺陷。接下來本文將以適應性波束形成法來處理 ASIAEX 實驗資料，觀察波束解析度所能得到的改善程度。

5.2.1 噪音缺口分析

在林柏滄[14]論文中得知 ASIAEX 實驗資料中，可觀察到噪音缺口的現象，此現象為當聲速剖面隨深度遞減時，聲波並不會以直線的方式傳播，而是向下折射的方式，因此在波束圖中 $\pm 25^\circ$ 區間會具有兩個峰值，且在 $\pm 10^\circ$ 區域的波束能量會低於兩個峰值而形成缺口的形狀，因此稱為噪音缺口 (Noise Notch)。而從林柏滄的探討結果得知，ASIAEX 的聲速剖面紀錄都是隨深度遞減的，但是噪音缺口發生的次數卻不多，因此本文想藉由適應性波束形成法來提升噪音缺口的判斷能力。而噪音缺口現象在低頻頻段不易產生，

因此本文選擇頻率 180 Hz 來進行探討。資料選用 2001 年 05 月 10 日 02 時 22 分。

圖 12 即為適應性波束形成法進行解析噪音缺口的結果比較，表 4 則為噪音缺口之波束解析的數值。由傳統波束形成的結果中可看到，在±25°區間有兩個波束能量峰值，0°位置的波束能量相對較低，將兩個波束能量峰值以 P_1 與 P_2 做表示，0°位置以 zero 做表示（參考圖 12 中的標示），依照林柏滄對噪音缺口的解析方式為取 P_1 與 P_2 的能量，各別與 zero 的能量相減後，兩者相加並取平均做判斷，如式(11)所示：

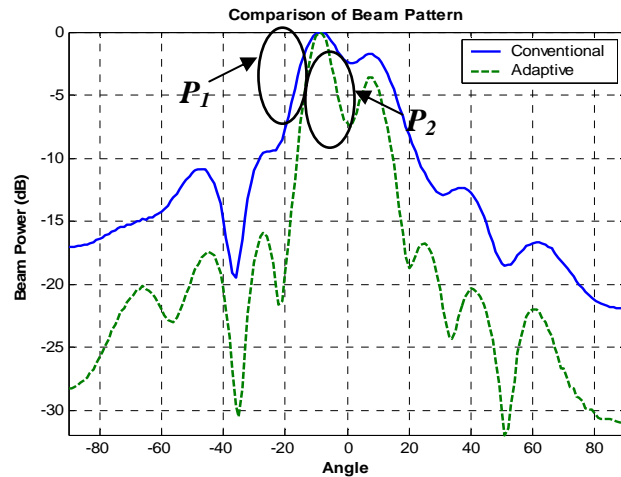


圖 12 噪音缺口之波束解析度差異

波束能量差：

$$\frac{(P_1 - \text{zero}) + (P_2 - \text{zero})}{2} \quad (11)$$

傳統波束形成中的 P_1 與 P_2 與 zero 的能量差平均為 2 dB，在此情況下噪音缺口的現象就較不明顯。而從適應性波束形成的結果，可看到缺口現象非常的明顯， P_1 與 P_2 與 zero 的能量差平均為 6 dB。由於波束解析度的提升，使噪音缺口可以更清楚的辨識，若將適應性波束形成法運用在更長時間的噪音資料分析，必定能夠改善傳統波束形成的缺陷以及提升方向性的解析能力。

表 4 噪音缺口之波束解析改善程度

運算方式		波束能量差(dB)	平均(dB)
傳統波束形成	峰值 P_1	2	2
	峰值 P_2	1	
適應性波束形成	峰值 P_1	7	6
	峰值 P_2	4	

六、結論

從平面波聲場的模擬結果顯示，海洋環境噪音在空間中呈現全相關，且經由傳統波束形成法的運算，波束訊雜比可達到 13 dB。另外，從實驗資料與模擬的比較指出，實驗資料的空間相關性明顯呈現低空間相關，且整體的波束解析度也與平面波聲場相差許多。故綜合以上的結果，可判斷傳統波束形成法以平面波作假設，不適合運用在分析實際噪音資料。

而針對改善波束解析度的方法，本文以適應性演算法中的最小均方演算法，代入波束形成的運算中，來觀察其與傳統波束形成法在解析程度上的差異。從模擬的比較結果

指出，適應性波束形成法的主波瓣寬度可以比傳統波束形成更小，且鄰近旁瓣在適應性波束形成法的加權調整後，旁瓣能量有明顯下降的跡象，使波束訊雜比提高。而再將適應性波束形成法運用在 ASIAEX 實驗資料中，結果同樣也顯示適應性波束形成法，可提升波束形成的解析度以及增加波束訊雜比。從噪音缺口的比較結果中，可看到適應性波束形成法提高了 P_1 與 P_2 的波瓣解析度，且 0° 位置的能量值也被降低，因此整個噪音缺口現象更為明顯，有效改善環境噪音方向性的解析程度。

參考文獻

- [1] [G. R. Fox](#), "Ambient-Noise Directivity Measurements", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 36, Issue 8, pp. 1537-1540, 1964.
- [2] [E. H. Axelrod](#), [B. A. Schoomer](#) and W. A. Von Winkle, "Vertical Directionality of Ambient Noise in the Deep Ocean at a Site near Bermuda", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 37, Issue 1, pp. 77-83, 1965.
- [3] [S. C. Wales](#) and [O. I. Diachok](#), "Ambient Noise Vertical Directionality in the Northwest Atlantic", J. Acoust. Soc. Am. 70(2), 1981.
- [4] E. Yu. Gorodetskaya, A. I. Malekhanov, A. G. Sazontov, and N. K. Vdovicheva, "Deep-Water Acoustic Coherence at Long Ranges : Theoretical Prediction and Effects on Large-Array Signal Processing", IEEE J. of Oceanic Engineering Vol. 24, Np. 2, 1999.
- [5] T.C. Yang, "Measurements of Spatial Coherence, Beamforming Gain and Diversity Gain for Underwater Acoustic Communications", IEEE J. of Oceanic Engineering, Vol. 1, No. 3, 2005.
- [6] E. P. Garabed and R. A. Finkelman, "Measured Vertical Noise Directionality at Five Sites in the Western North Atlantic", IEEE J. of Oceanic Engineering Vol. 30, No. 2, 2005.
- [7] A. Suzuki, C. Sumi, K. Nakayama and M. Mori, "Real-time Adaptive Cancelling of Ambient Noise in Lung Sound Measurement", [Medical and Biological Engineering and Computing](#), Signal Processing, Vol. 33, No. 5, 1995.
- [8] A. Newhall et al., Preliminary Acoustic and Oceanographic Observations from the ASIAEX 2001 South China Sea Experiment, Woods Hole Oceanographic Institution, 2001.
- [9] 劉金源，水中聲學—水聲系統之基本操作原理，國立編譯館，2001。
- [10] David E. Newland, Random Vibrations, spectral and Wavelet analysis, Prentice Hall, 1993.
- [11] 翁萬德，江松茶，通訊系統 第四版，全華科技圖書股份有限公司，2003。
- [12] B. [Widrow](#) and [S. D. Stearns](#), Adaptive Signal Processing, Englewood Cliffs, N.J. Prentice-Hall, 1985.
- [13] 林柏滄，"亞洲海域國際聲學南海實驗之低頻環境噪音垂直方向性分析"，國立中山大學海下技術研究所碩士論文，2004。