

以波束形成法進行海洋聲學定位

國立成功大學水利及海洋工程學系 廖偕原、何永順、曾冠鈞、李元勝

指導教授：劉冠汶 助理教授

摘要

本研究旨在探討分散式聲學感測 (Distributed Acoustic Sensing, DAS) 應用於船舶聲學定位與到達方向 (Difference of Arrival, DOA) 推估，利用海底光纖量測資料分析船舶聲源的入射方向。研究以小琉球海域北纜 (North Cable) 所量測資料作為實驗對象，通道範圍 0–3002，時間採樣率設定為 400 Hz，標距長度 (Gauge Length) 為 12 m，通道間距 (Channel Spacing) 為 6 m。首先透過瀑布圖及頻率能量分布辨識船舶訊號，經帶通濾波與通道範圍限縮後，利用互相關分析 (Cross-correlation) 建立時延矩陣 (Time-Lag Matrix)，分析聲源訊號於不同通道間的時間延遲。再使用 Delay-and-Sum Beamforming 進行 -90° 至 90° 的方位掃描，並以峰值延遲 (Peak Lag) 方法輔助估測。結果顯示，經前處理後可觀察到明顯的空間－時間傳播特徵。波束掃描結果之最大波束功率出現在 -56° ，推估船舶聲源方位約為 -56° ；Peak Lag 方法則得到約 -62° 。後續將結合 AIS 船舶資料進行比對，以驗證方位估測結果並進一步提升船舶定位能力。

研究目的

分散式聲學感測技術 (Distributed Acoustic Sensing, DAS)，會從光纖一端打入雷射脈衝，光在光纖中傳播時，會因為玻璃纖維微小不均勻性產生瑞利散射 (Rayleigh Scattering)。當聲波讓光纖產生微小拉伸或壓縮時，回傳光的相位會改變。DAS 系統就是利用這個相位變化，反推出光纖沿線不同位置、不同時間的應變訊號。在分析的方法上，本研究利用都卜勒頻移 (Doppler Shift) 判斷船舶接近或遠離光纖，並估算船速；同時將 DAS 光纖視為水下聲學陣列，使用波束形成 (Beamforming) 估測聲源方位。若結合船舶自動識別系統 (Automatic Identification System, AIS) 資料，則可驗證船舶的位置、速度與航跡，提升船舶定位與軌跡重建的可信度。

研究方法



圖1. 船舶方位推估法流程圖

►波束形成法 (Beamforming)

波束形成法是一種利用多個感測元件協同運作，利用感測器陣列之空間位置差異與訊號到達時間差，讓對不同假設入射方向進行延遲補償並疊加。它能將訊號集中在特定目標上，同時降低其他方向的雜訊干擾。以下是理論時間延遲的公式：

$$\tau_m(\theta) = \frac{(x_m - x_{ref}) \sin \theta}{c}$$

x_m : 第 m 個 DAS 通道的位置
 x_{ref} : 參考通道位置
 θ : 假設聲源入射角度
 c : 水中聲速 (假設為 1500 m/s)
 $\tau_m(\theta)$: 第 m 個通道相對於參考通道的理論時間延遲

►資料說明

本研究以小琉球海域海底光纖分散式聲學感測系統所量測之資料為研究對象。研究區段選取北纜 (North Cable) 通道編號 0–3002 之資料進行船舶訊號分析與方位估測，時間採樣率設定為 400 Hz，標距長度 (Gauge Length) 為 12 m，通道間距 (Channel Spacing) 為 6 m。

►資料前處理

本研究首先針對 DAS 原始量測資料進行時間與空間域檢視，以建立後續船舶聲學訊號分析之基礎。為了掌握整體資料中船舶訊號可能出現的空間範圍，首先將完整分析區間內的所有通道繪製為瀑布圖 (Waterfall Plot)。此圖能同時呈現訊號強度隨時間與通道位置的變化，因此可用於初步辨識船舶通過時所造成的局部能量增強區域 (如圖2)。在瀑布圖的基礎上，進一步觀察不同頻率成分於通道方向上的能量分布。由於船舶通過時通常會在特定低頻形成相對連續且局部增強的亮帶，因此本研究以 25–50 Hz 之間的能量分布作為初步判斷依據，藉由該頻帶中亮帶的位置鎖定船舶訊號較為明顯的通道範圍 (如圖3)。

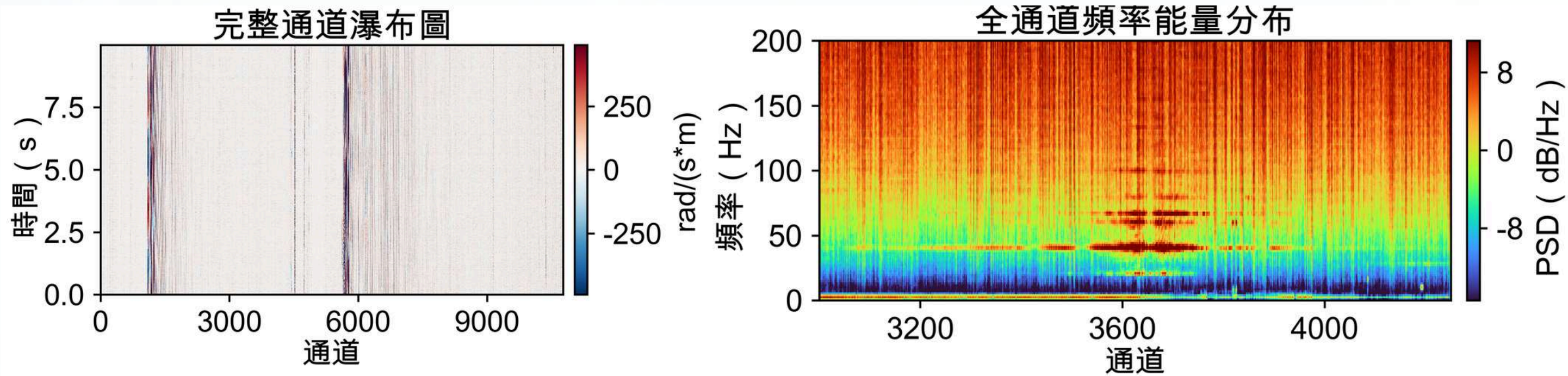


圖2. 瀑布圖

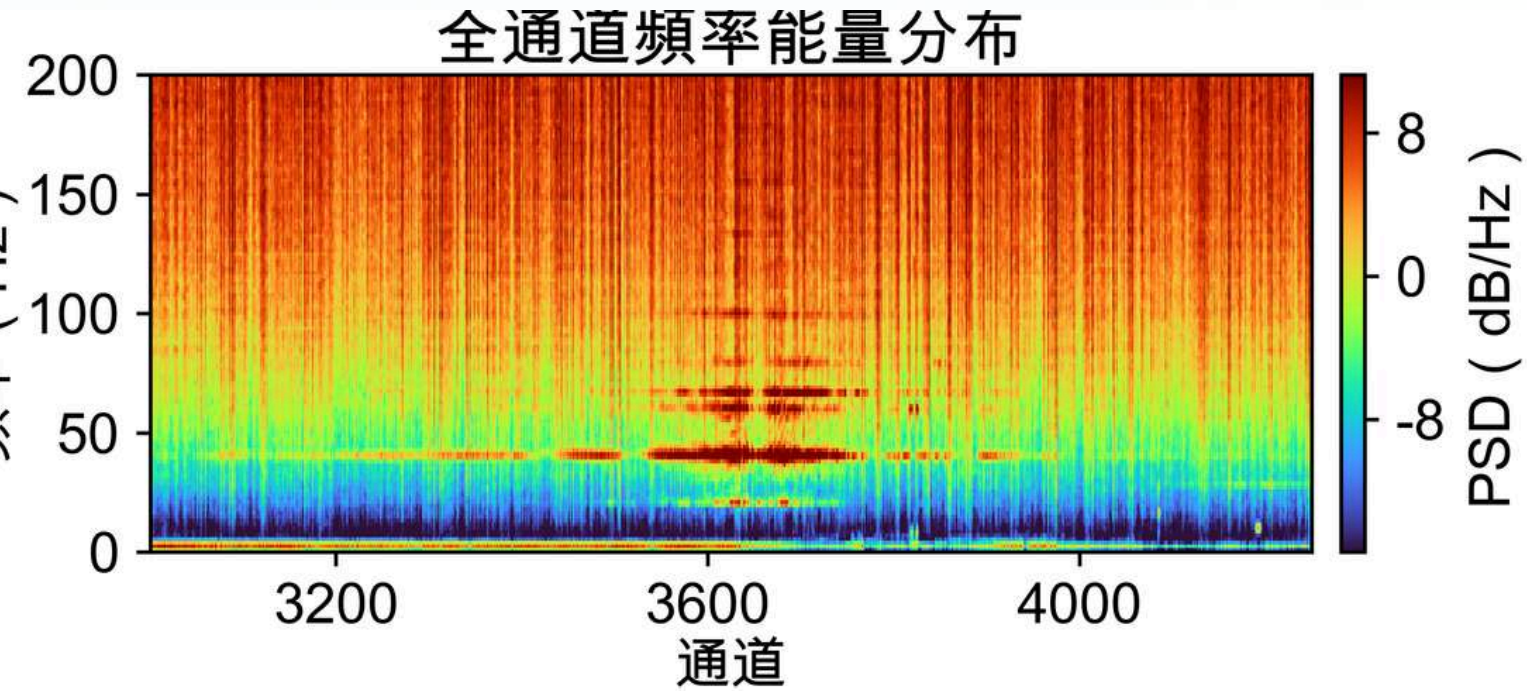


圖3. 全通道頻率能量分布圖

資料進一步進行帶通濾波 (Bandpass filter) 與限縮所觀察的通道範圍。帶通濾波用以保留與船舶聲學事件相關性較高的頻率成分，同時抑制低頻漂移、高頻雜訊以及與目標事件無關的背景訊號。接著，根據瀑布圖與頻譜能量分布所指示的位置，將分析通道縮小至船舶訊號較明顯的區間。

►時延互相關圖之建構

為了量化應變到達對應的通道間之到達時間差 (Time difference of arrival, TDOA)，本研究進一步建立延遲 (Lag) 圖。延遲圖的核心概念是選定一個參考通道，並將其他通道的時間序列與參考通道進行互相關分析 (Cross-correlation)，即為計算其餘通道與參考通道在不同延時下之相關係數。

►船舶方位推估方法 (Difference of Arrival Estimation)

在方位推估的方面，本研究主要採用 Delay-and-Sum Beamforming 方法進行波束掃描，設聲波在水中傳播速度為 1500 m/s，方位從 -90° 至 90° ，每 0.5° 為間隔進行掃描。於每一掃描角度，根據線性陣列理論計算各通道之理論傳播延遲，並於時延矩陣 (Time-Lag Matrix) 中擷取對應延遲位置之相關值，再將各通道之相關值進行累加，以計算該角度之波束輸出功率。本研究也使用了峰值延遲 (Peak Lag) 方法進行方位推估，此方法是先找時延矩陣裡面每個通道最大相關值的位置，分析峰值延遲隨空間位置的變化，並進行線性擬合，從延遲隨空間的變化斜率估算聲源方向。

研究成果

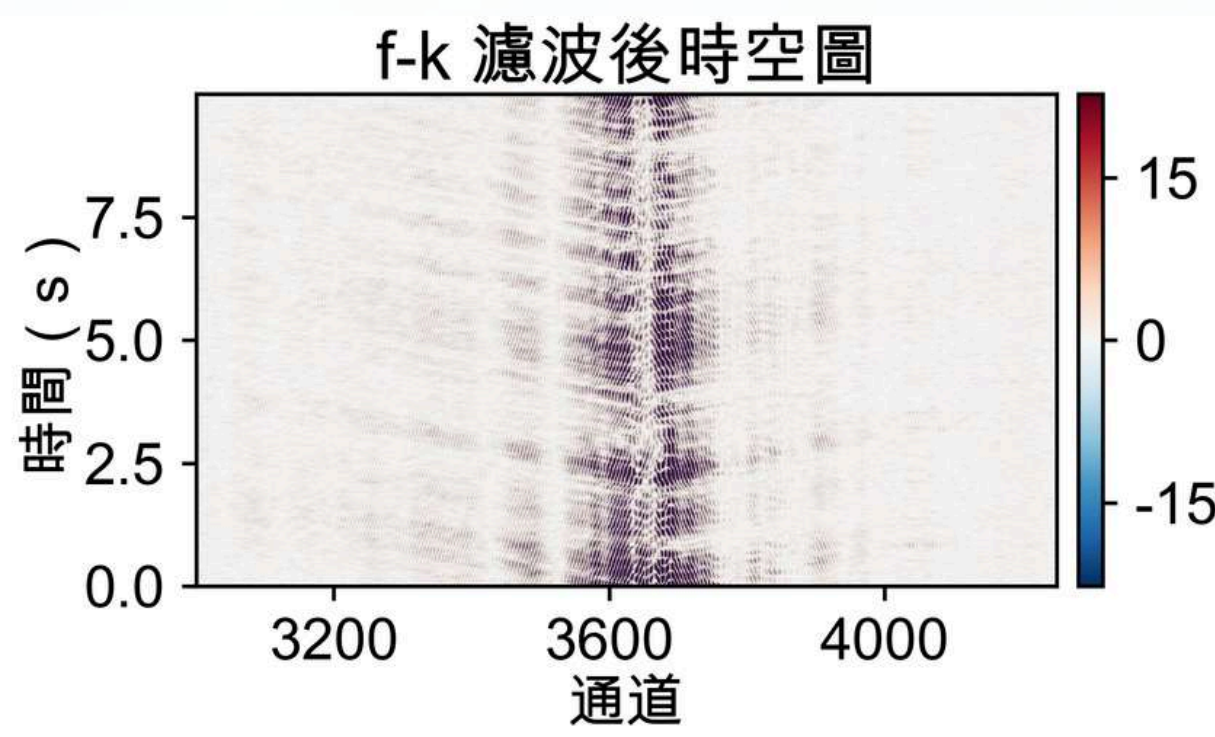


圖4. 目標通道訊號時空分布圖

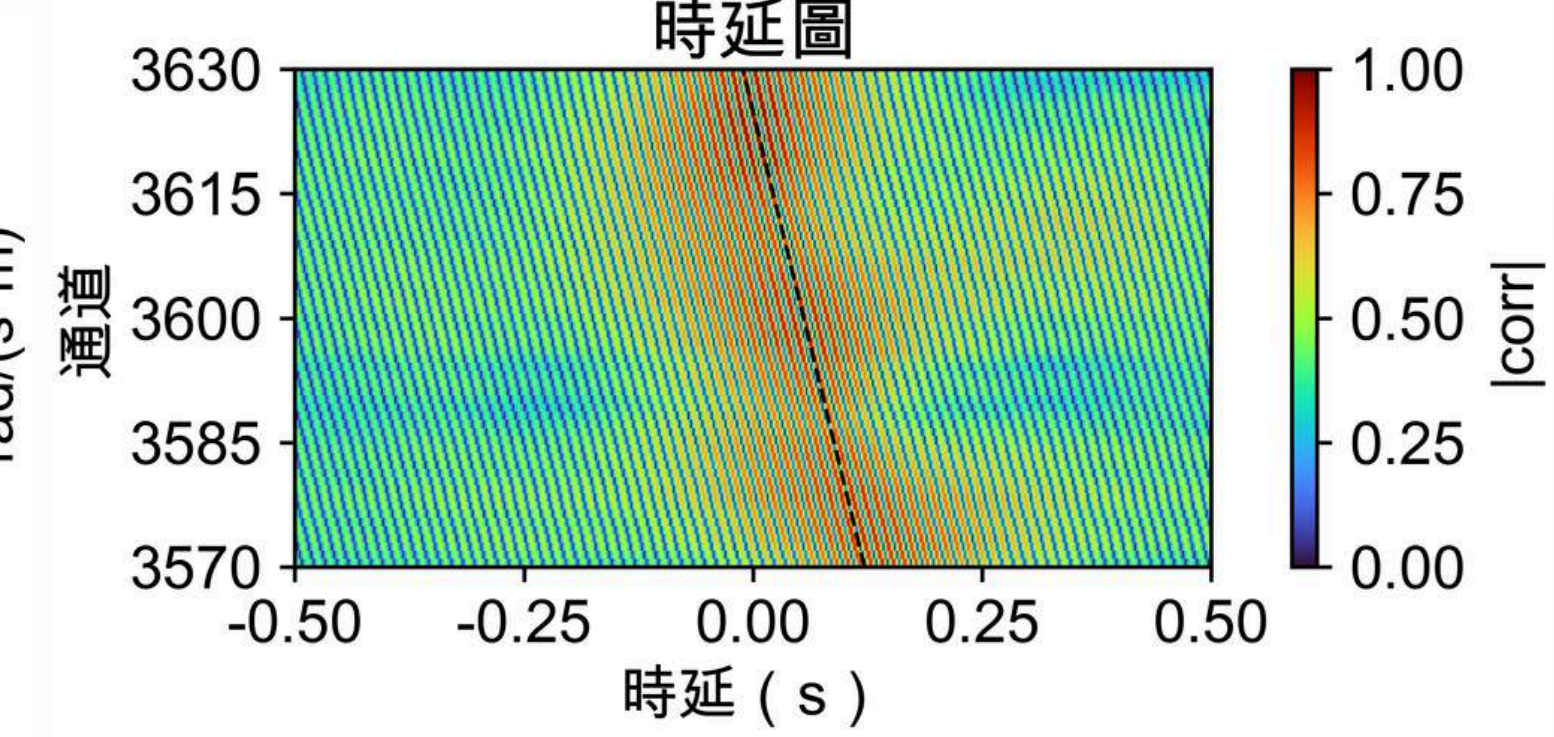


圖5. 時延矩陣之空間分布圖

經過濾波與通道裁切後，原先在全域資料中較不易辨識的時空結構會變得更加清楚，特別是在時間通道 (Time-channel) 圖上可觀察到呈 V 型或斜向展開的波紋結構。說明該區段不只是能量較強，訊號也在相鄰通道間呈現連續的空間－時間傳播特徵 (如圖4)。從 DAS 資料前處理的結果，我們以參考通道 3625 為基準，以 Channel 3570-3630 建立時延矩陣。可以看見在 0 秒附近呈現高度相關，並且具有明顯的斜向分布特徵，顯示船舶聲波傳遞至各通道時具有一致且連續的時間延遲變化特性 (如圖5)。

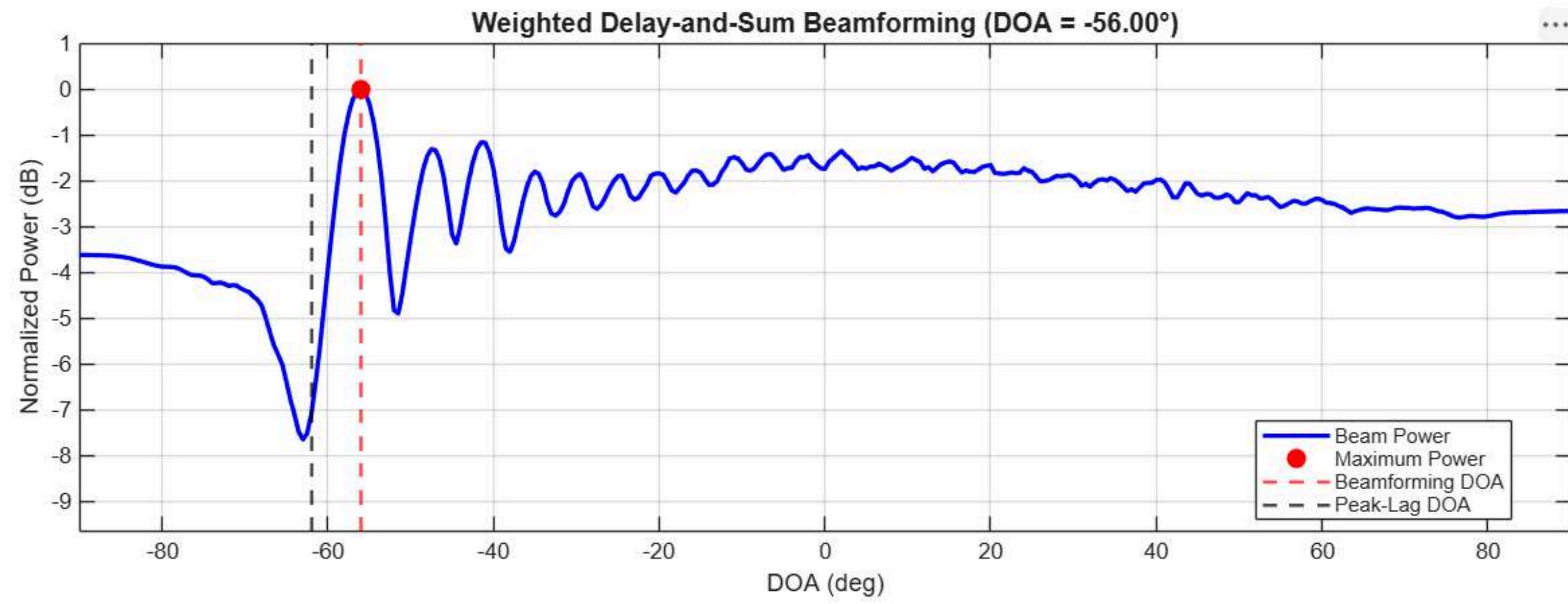


圖6. 波束掃描功率譜及訊號到達方位(DOA)推估結果

利用 Delay-and-Sum Beamforming 方法計算出的波束功率頻譜，在其中可觀察到最大波束功率出現於 -56° 。於最後的波束功率頻譜中，可以觀察到 -56° 的能量峰值高於其他角度的能量功率，因此，本研究將 -56° 作為船舶聲源的推估方位 (如圖6)。本研究也根據峰值延遲進行輔助驗證，其推算出的入射角度為 -62° 。兩種方法所得到的推估方位不同的原因，兩者對噪音與峰值延遲誤差以及非理想傳播的敏感度不同，而產生的估測結果差異。

結論與未來展望

- 我們專題研究目的為利用分散式聲學感測 DAS 推估船舶航行軌跡，並提升船舶定位的準確度。研究首先針對不同時段所量測的 DAS 資料進行前處理，取得船舶通過光纖附近時所形成的 V 形目標通道訊號分布，再透過到達方向估測分析聲學訊號的傳遞方向，以判斷船舶相對於光纖的移動狀態。
- 目前已成功取得 DOA 推估結果，其中可觀察到 -56° 方向具有最大波束功率，因此推估船舶聲源方位約為 -56° 。後續將進一步結合 AIS 資料，將 DAS 聲學定位結果與實際船舶位置及航行軌跡進行比對與校正，以驗證定位結果並提升 DAS 船舶定位的準確度。
- 本研究最終目標是使系統由傳統的聲學系統，進一步發展為具備即時船舶訊號偵測、位置估測、航行方向判斷與軌跡追蹤能力的海洋監測系統。透過波束形成法、方向估測、都卜勒頻移、DAS 與 AIS 資訊整合，建立更完整且精確的船舶聲學定位與追蹤方法，提升 DAS 技術應用於海洋船舶監測的可行性與實用性。

致謝

感謝台灣大學海洋研究所黃千芬教授提供實驗資料。感謝台灣師範大學陳佩瑩教授提供資料分析的建議。感謝國立成功大學水利及海洋工程學系劉冠汶助理教授於專題研究與海報製作上的指導。

參考資料

- Huang, W., Wang, K., Liu, P., Xing, W., & Gan, W. (2024). Experimental study on optoelectronic submarine cable used for ship radiation noise detection. IEEE Access, 12, 192731–192742.
- Landro, M., Bouffaut, L., Kriesell, H. J., Potter, J. R., Rørstadbotnen, R. A., Taweessintananon, K., Johansen, S. E., Brenne, J. K., Haukanes, A., Schjelderup, O., & Storvik, F. (2022). Sensing whales, storms, ships and earthquakes using an Arctic fibre optic cable. Scientific Reports, 12, 19226.
- Paap, B., Vandeweyer, V., van Wees, J.-D., & Kraaijpoel, D. (2025). Leveraging distributed acoustic sensing for monitoring vessels using submarine fiber-optic cables. Applied Ocean Research, 154, 104422.
- Thiriet, P., Lecoulant, J., Labat, V., Boudraa, A. O., & Astolfi, J.-A. (2025). Distributed acoustic sensing for ship detection and identification. In Proceedings of OCEANS 2025 Brest (pp. 1–6). Brest, France.
- Bouffaut, L., Taweessintananon, K., Kriesell, H. J., Rørstadbotnen, R. A., Potter, J. R., Landro, M., Johansen, S. E., Brenne, J. K., Haukanes, A., Schjelderup, O., & Storvik, F. (2022). Eavesdropping at the speed of light: Distributed acoustic sensing of baleen whales in the Arctic. Frontiers in Marine Science, 9, 901348.
- van den Ende, M. P. A., & Ampuero, J.-P. (2021). Evaluating seismic beamforming capabilities of distributed acoustic sensing arrays. Solid Earth, 12(4), 915–934.
- Knapp, C. H., & Carter, G. C. (1976). The generalized correlation method for estimation of time delay. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 24(4), 320–327.
- Huang, W., Chen, S., Wu, Y., Li, R., Li, T., Huang, Y., Cao, X., & Li, Z. (2025). DASHip: A large-scale annotated dataset for ship detection using distributed acoustic sensing technique. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 18, 4093–4107.
- Anhaus, P., Bueno Rodriguez, A., Schmidt, J., Stephan, M., & Peters, E. (2025). Towards DAS ship detection using signal-based features. In Proceedings of SPIE Emerging Technologies and Materials for Security and Defence 2025 (Vol. 13678, Article 136780P).
- Rivet, D., de Cacqueray, B., Sladen, A., Roques, A., & Calbris, G. (2021). Preliminary assessment of ship detection and trajectory evaluation using distributed acoustic sensing on an optical fiber telecom cable. The Journal of the Acoustical Society of America, 149(4), 2615–2627.