

海面浪高與水下環境噪音相關性之實驗研究

劉冠汶^{1*} 黃清哲^{1,2} 林演斌² 林彥岑³ 滕運達³

摘要

水下環境噪音 (underwater ambient noise) 為水中聲學相關領域中重要的背景參數，也是影響聲納系統偵測效能相當重要的參數，傳統上主要是藉由布放於海底的水聽器及電纜蒐集水下環境噪音，但其造價昂貴，且置放於深水中不易維護。本研究主要目的為在資料浮標 (data buoy) 上加掛風速計、波高計及水聽器，發展一套長期 (long-term) 且即時 (real-time) 的風速、波高及水下環境噪音監測系統，並探討海面浪高與水下環境噪音間的相關性。由於水下環境噪音的成因相當複雜，本研究將資料浮標水下環境噪音監測系統所量測到之水下噪音資料，以短時傅立葉轉換法 (short-time Fourier transform, STFT) 轉換為頻譜，並比較在不同的海面浪高下，其水下環境噪音頻譜之差異。研究結果顯示當有颱風經過時，聲壓位準較風平浪靜時大約 10 - 60 分貝 (dB)，證實浪高增加會使環境噪音提高。

ABSTRACT

Sonar systems operating in different waters have different detection performance. Underwater ambient noise is one of the most important parameters that affect the detection performance of the sonar system. To obtain long-term underwater ambient noises, one of the conventional ways is to deploy hydrophones and cables on the seabed. This technique is very expensive and difficult to operate especially in the deep waters. The aim of this research is to develop a new technique for obtaining long-term and real-time underwater ambient noises by installing a hydrophone on a data buoy. The techniques for detecting underwater sounds and transmitting real-time data on a data buoy station are developed. Based on the analysis of the monitoring data of water waves and ambient noise, the relationship between waves and underwater noise are established. After the data buoy has been deployed, a typhoon passed through the data buoy, the spectrum of the detected sound pressure during the typhoon period is about 10 - 60 dB higher than that obtained under usual weather. This result confirms that underwater noises are louder as the wave height increases.

一、前言

水下環境噪音 (underwater ambient noise) 為影響聲納偵測效能相當重要的參數 (Buckingham et al., 1996)，若能準確預估水下環境噪音，即可大幅提升聲納系統量測資料之可信度。水下環境噪音是由許多複雜的因素所造成，海洋中常見的聲源如生物、風浪、船舶等。水下環境噪音為自然界中隨機 (random) 產生的結果，因此須由統計方法分析長時間觀察所得的資料。事實上，海洋中的環境噪音的現象已有許多學者研究。Minnaert (1933) 提出兩滴降落水面產生的水中噪音主要是由於氣泡振動所致，並推導出氣泡之共振頻率。Knudsen et al. (1948) 提出海洋中噪音來源廣泛，包括海中生物、風浪、

潮流、降落物 (如降雨、雪等) 以及船隻航行產生的噪音。Franz (1959) 探討物體從空氣撞入水中，並歸納出噪音產生之機制主要是：(一) 物體撞擊水面，(二) 物體之共振，(三) 水中氣泡。Ma and Nystuen (2004) 提出不同噪音源所發出之聲音頻率不同，其中海洋環境噪音頻率域最廣為風浪所產生之噪音，且不同形式的波浪場所激起的水花 (splashes) 及捲入的空氣會產生氣泡，當氣泡振動會輻射 (radiate) 出聲音訊號，即為噪音。

台灣附近海域水下環境噪音可能來源包括：海洋亂流 (ocean turbulence)、航行船隻、風浪、降雨、海洋生物等。海洋亂流所產生的噪音主要為低頻噪音，頻率在 1-10 Hz；航行船隻的噪音主要在 10-50 Hz，在非常忙碌的區域其高頻噪音頻率可能達到 500

¹ 國立成功大學水利及海洋工程學系

² 國立成功大學近海水文中心

³ 海軍大氣海洋局

Hz；降雨噪音的產生主要是雨滴撞擊海面時的聲音，加上雨滴撞擊海面過程產生氣泡所發出的聲音，最大的聲音強度主要在 100-3,000 Hz；風浪所產生的噪音頻率在 50-50,000 Hz (Hodges, 2010)。由上所述可知在沒有降雨的情況下，風浪所造成之水下噪音頻率範圍最廣，為水下環境噪音的主要來源。

為了解風浪所造成之水下噪音，Sadowski et al. (1984) 經由實驗所得不同海況 (sea state) 下，不同頻率的噪音強度表 (wave noise level)，但此表中的結果是否適用於台灣附近海域，目前並無實測資料可供比對。因此，本研究目的為建立一水下噪音監測系統，並探討不同浪高下之水下環境噪音強度。然而在海上建立水下噪音監測系統，設備電源的提供、資料傳輸及儲存等皆是瓶頸限制。如何解決此困境，是本研究首要面臨之挑戰。

二、研究方法

2.1 資料取得與處理

本研究首要工作為建立一水下噪音監測系統，並先在國立成功大學近海水文中心的試驗水槽，完成浮標加掛水中噪音監測系統之測試，之後再進行海上實地測試約 2 個月，並於 104 年 10 月初取回聲音資料、風速紀錄、海面波高等資料。以上資料皆為自然界中隨機產生的結果，在探討各項參數的物理意義時，須以統計方法來描述此類數據資料的趨勢及變動性。

一般聲音訊號處理時，較常使用傅立葉轉換法 (Fourier transform)，將訊號資料由時間域轉換至頻率域，但此方法無法看出聲音頻率在時間上之變化，並不適合用來分析一個頻率會隨著時間而改變的訊號。因此，本研究在浮標上之分析模組，採用相較其他時頻分析方法，如：小波轉換 (Wavelet Transform) 等，運算上較省時的短時傅立葉轉換法 (Short Time Fourier Transform, STFT) 對於取樣訊號進行頻譜分析，以節省浮標上電力之耗損，並獲得水中噪音頻譜 (spectrum)。待陸地端取回聲音資料後，再以 MATLAB 軟體進一步分析，包含透過 MATLAB 內建的函數，將聲音資料轉換成可分析的資料格式，或是透過程式撰寫取得特定頻段的聲音訊號、進行時頻分析等。透過觀察時域的聲壓能量

變動，及頻域的聲壓位準變化，建立波高及水下噪音之關係。

2.2 水下聲音量測基本理論

水下聲波的能量量化方式與空氣中的能量量化方式相似，計算聲壓位準 (sound pressure level, SPL) 時，以式(1)表示，

$$SPL = 10 \log \frac{P_{rms}^2}{P_{ref}^2} \quad (1)$$

SPL 的單位以分貝 (decibel, dB) 表示， P_{rms} 為量測到之聲壓， P_{ref} 為水中聲壓參考值，一般而言為 10^{-6} Pa (= 1 μ Pa)，與在空氣噪音的慣用參考值 20 μ Pa 相差約 26 dB。

每一種水下麥克風使用的感測元件之靈敏度 (sensitivity) 不同，因此每一支水下麥克風對頻率響應 (frequency response) 及空間方向性 (directivity) 皆有差異，須經過校正後才能獲得準確的聲壓位準。再者，進行水下噪音量測時，需先調查水下環境噪音 (underwater ambient noise)，不僅可了解不同量測環境的差異性，更要在後續分析時作為一基準值，以便比較所測得之水下環境噪音資料。

三、研究成果

3.1 水下噪音監測系統建立

傳統上主要是藉由布放於海底的水下麥克風 (hydrophone) 及電纜蒐集水中噪音，但台灣時常遭受颱風侵襲，造成纜線受損，且其造價昂貴、無法即時維修、於深水中不易操作。再者，水下環境噪音為相當寬頻之訊號，依據取樣原理 (Nyquist sampling theorem)，聲音訊號資料量相當龐大，造成資料傳輸困難及佔據龐大儲存空間。以上所述狀況皆增添海洋中長期觀測水中噪音之困難性。

台灣現有的資料浮標 (data buoy) 觀測系統在電源供應、資料傳輸及波高、波向的觀測技術已相當成熟，且在海洋觀測中具有不受水深限制、可擴充觀測項目、自給自足的能源供應及資料即時 (real-time) 傳輸等優點 (徐月娟等人, 2006)。綜合以上考量，本研究以資料浮標作為載具，並在資料浮標上加掛水下噪音監測系統，包含水下麥克風、擷取模組、傳輸模組等，發展長期 (long-term) 且即時

的水下噪音監測系統。透過此系統取得現場實測的波高與水中噪音資料後，進行聲音訊號分析，探討在不同浪高下的水下環境噪音分布。

本研究首要工作為完成整合資料浮標 (圖 1)、水下聲音量測、與資料即時傳輸之功能，方可進行後續不同浪高下之水下環境噪音分布研究。規劃監測系統架構如圖 2，其中水中噪音監測系統，包含水下麥克風一套、擷取模組一套、分析模組一套、3G 傳輸模組兩只。



圖 1 海洋環境資料浮標

憶體容量少且運算速度不快。186 處理器中包含類比 - 數位轉換器 (analog-to-digital converter, ADC or A/D) 以擷取外部類比訊號，本研究透過韌體的撰寫來控制 186 處理器，擷取訊號並將訊號數位化後儲存在分析模組中，進行分析。



圖 3 水下麥克風 (型號：HTI-94-SSQ)



圖 4 水下麥克風及套管



圖 2 監測系統架構示意圖

水下麥克風型號為 HTI-94-SSQ (圖 3)。考量水下麥克風長期置放於水中，訊號線之安全問題，在訊號線外套裝保護管，並使水下麥克風外漏以不影響訊號接收，見圖 4。擷取模組採用 186 處理器 (圖 5、圖 6)，其優點為擷取訊號相當穩定，缺點為記

本研究將水下噪音監測系統設為自動化作業，包含資料擷取、分析、儲存及傳輸等功能皆於海上執行完成。故本研究在水下噪音監測系統中，加入即時分析及即時回傳功能。依照需求計算得到每小時原始資料量高達 7MB，資料量過大不利於即時傳輸。如果能在海上即時分析再回傳頻譜可減少傳輸量，對於資料回傳有相當大的益處，並且提高自動化作業之可行性。因此，增加分析模組 (圖 7)，相較 186 處理器而言，其執行速度較快且記憶體容量較不受限制，恰可與 186 處理器互補。方法為擷取模組於觀測完成後，將原始資料傳送至分析模組進行分析，再利用 3G 網卡將頻譜回傳至陸地端主機。

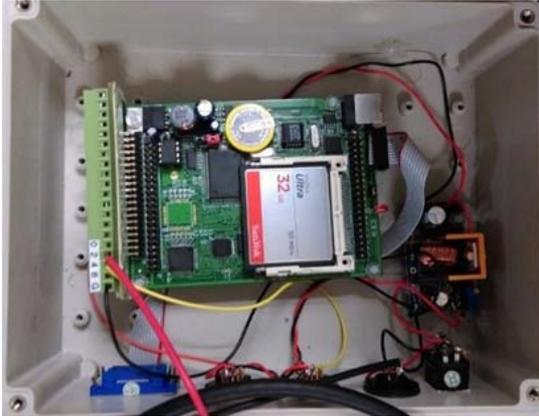


圖 5 擷取模組俯視圖



圖 6 擷取模組側視圖



圖 7 分析模組

規劃系統觀測流程時，考量到一般海域波浪週期約為 5 - 10 秒，為了解波浪作用下噪音的特性，設定水中噪音的取樣頻率為 20 kHz，並以兩種方案進行。方案一為每小時第 48 分開機，隨即暖機 2 分鐘，接著連續 3 分鐘做訊號擷取、儲存並於擷取完成後，將資料傳輸至分析模組做頻譜分析，並回傳頻譜，當上述步驟完成後即自動關機；方案二為每小時第 48 分開機，隨即暖機 2 分鐘，接著連續 3 分鐘做訊號擷取、儲存並於擷取完成後，將 3 分鐘原始資料中的第 11 秒至 40 秒資料回傳。

3.2 韌體開發與測試結果

本研究之擷取模組韌體開發，採二階段開發測試。第一階段為自記式，即將觀測資料儲存於記憶卡中，本階段主要開發功能為訊號擷取、儲存及傳輸功能；第二階段則朝自動作業化方向開發，因此需要開發分析功能，完善韌體系統，使系統能自動化作業。

第一階段開發之功能包含訊號擷取、儲存及傳輸功能。本階段開發完成後，於實驗室測試方法為使用擷取模組擷取訊號產生器所產出之正弦波，並於觀測工作完成後進行資料下載，再將之與示波器之圖形比較、以及用驗算波形週期等方式驗證資料，證實資料收錄器擷取的資料正確無誤（下頁圖 8、圖 9）。

此外，第一階段開發亦包含實驗水槽測試，其目的為測試本研究所使用之水下麥克風 (HTI-94-SSQ) 的音頻特性與實驗室等級水下麥克風 (B&K8104) 之音頻特性一致。本實驗以空氣壓縮機製造一寬頻噪音，並使用以上兩只水下麥克風同步收音。實驗結果確認兩者之音頻特性一致。

第二階段之自動化作業是指確保資料擷取、分析、儲存及傳輸等功能皆能於海上執行完成。故第二階段的開發加入即時分析及即時回傳功能，並進行燒機測試。此外，第二階段同時進行擷取模組韌體升級，即從原來僅能擷取單頻道聲音訊號，升級為能擷取雙頻道聲音訊號，並經模擬訊號檢驗完成。然而，因資料儲存容量固定，所能記錄資料的時間會縮短一半。

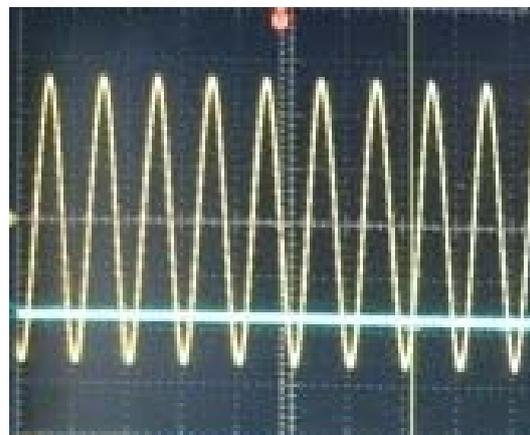


圖 8 示波器之波形

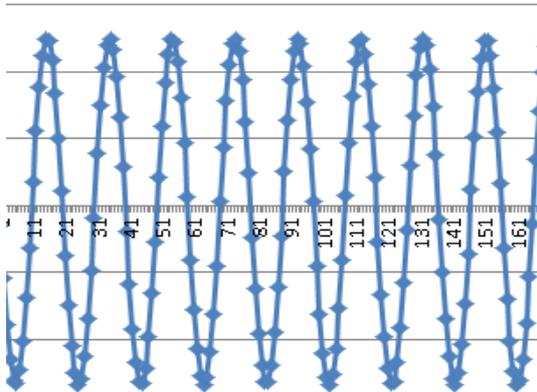


圖 9 擷取模組之波形

3.3 現地訊號資料及分析結果

研究結果顯示，當有颱風經過時，颱風影響甚大。圖 10 中可見，水下麥克風收錄到之電壓換算為聲音壓力位準 (sound pressure level, SPL) 後，相較於水下環境噪音之聲音壓力位準，略高 10 - 60 分貝 (dB)，證實當風速變大、浪高增加時，水下環境噪音會隨著提高。

2 - 20 Hz 的噪音稱為次音 (infrasonic) 頻噪音，10 Hz 以下的噪音主要來自於地殼運動，或是波與波交會作用後產生之噪音經過海域底床散射，由地震儀或是接近海床的水聽器所收錄到之結果。Wenz (1962) 曾歸類在 10 - 1000 Hz 為船隻噪音的主要頻段，而在 100 Hz 以上會迅速減弱，其中 10 - 100 Hz 為遠洋船隻噪音的主要頻段，而船隻的影響顯然與船隻多寡及遠近有關，假如在水中麥克風附近有船隻，其產生之噪音可能掩蓋遠船噪音；考量浮標位置周圍海域為洋流交會之處，形成漁業資源豐富的區域，船隻噪音也很有可能影響訊號收錄結果。500 - 50,000 Hz 為中等頻段的噪音，此頻段噪音主要來自風對海面所產生的作用，包括碎波、亂流引起的壓力震盪、氣泡的形成及破碎等，這些機制皆在海表面附近發生，且因頻率較高無法遠傳。

綜合以上所述之水中聲學特性，及本研究主要探討聲音頻段為風浪機制所產生之中等頻段噪音等需求，本研究所使用之資料浮標水中噪音監測系統之優勢在於，可清楚收錄到中等頻段噪音，不會受中等頻段噪音無法遠傳等特性影響。

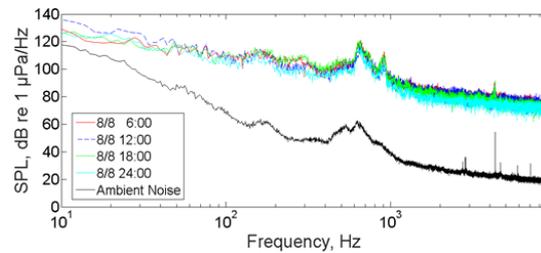


圖 10 104 年 8 月 8 日水下環境噪音頻譜圖

結論及建議

本研究已成功開發資料浮標加掛水下噪音監測系統，並可進行長期量測及即時回傳，取得資料浮標單點的浪高、水中噪音等資料。研究結果顯示當有颱風經過時，相較於風平浪靜時之水下環境噪音聲音壓力位準，略高 10 - 60 分貝 (dB)，證實當浪高增加會造成水下環境噪音提高的現象。

未來若能建立單點甚至海域面之水下環境噪音與波高、風速之關係，將更能了解不同海況下之水下環境噪音分布特性。期許此結果可更了解因海洋環境改變而造成的聲納偵測效能變化，進而提供資訊作為各項科技、科學發展之應用。

謝誌

本論文資料之取得，承蒙國立成功大學近海水文中心協助建立資料浮標水下噪音監測系統，謹致感謝之意。

參考文獻

- 1.徐月娟、高家俊、林燕璋、呂理弘、饒國清、林演斌 (2006)。環島資料浮標觀測網成果概述。天氣分析與預報研討會，中央氣象局，台北。
- 2.Buckingham, M.J., Potter, J.R., and Epifanio, C.L. (1996). "Seeing underwater with background noise," *Scientific American*, Feb., pp. 86-90.
- 3.Franz, G.J. (1959). "Splash as source of sound in liquids", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 1, pp. 1080-1096.
- 4.Hodges, R.P. (2010). *Underwater Acoustics, Analysis, Design and Performance of Sonar*, John Wiley & Sons., Ltd, Chichester, UK.

5. Knudsen, V.O., Alford, R.S., and Emiling, J.W. (1948). "Underwater ambient noise," *J. Marine Res.*, Vol. 7, pp. 410-429.
6. Ma, B.B. and Nystuen, J.A. (2004). "Passive acoustic detection and measurement of rainfall at sea," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 22, pp. 1225-1248.
7. Minnaert, M. (1933). "On musical air bubbles and the sounds of running water", *Phil. Mag.*, Vol. 16, pp. 235-248.
8. Sadowski, V., Katz, R., and McFadden, K. (1984). Ambient noise standards for acoustic modeling and analysis, Naval Underwater Systems Center, TD 7265.
9. Urlick, R.J. (1986). Ambient noise in the sea, Los Altos Hills, CA: Peninsula Publishing.
10. Wenz, G.M. (1962). "Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources", *Journal of the Acoustical Society of America.*, Vol. 34, pp. 1936-1956.