

# 運用資料浮標長期即時觀測水中環境噪音

劉冠汶<sup>1</sup>、林演斌<sup>1</sup>、黃清哲<sup>1,2</sup>

## 摘要

臺灣四周環海且海域環境複雜，加上頻繁的海上活動，水中環境噪音多變。水中環境噪音是影響聲納偵蒐效能的重要指標，現今臺灣地理戰略位置越顯重要，水中環境噪音之蒐集勢在必行。雖然可以在海底布放水中麥克風和電纜等方式進行水中環境噪音之蒐集，然而所費不貲，且儀器不易維護。因此，近海水文中心開發具競爭力且能夠長期作業的水中聲音監測系統(USMS)，並將 USMS 整合於資料浮標上，研發出水聲浮標，即時回傳所量得的水中環境噪音頻譜，來進行水下聲景觀察。透過現場觀測成果，分析波高與水中環境噪音，建立水中環境噪音聲壓級(SPL)與波高之關係，並證實水聲浮標之實用性與所觀測水中噪音資料的合理性。

## 一、前言

聲波在水中的傳播距離，比起光波而言能夠傳遞得更遠，甚至在某些情況下，可達數千公里。此傳播特性使聲波成為研究海洋中物理、化學和生物等問題的利器。海洋中的聲速亦隨著溫度、鹽度和壓力(深度)而變化，使得聲速在海洋的垂直剖面上分布不均勻，即聲波在海洋中之傳遞速率有快慢之分。而聲波在分層海水中聲速不一致的情況，在海洋中形成聲波傳遞的陰影區(shadow zone)，陰影區中的聲源難以將聲波向外傳遞，因此，陰影區往往是生物或是艦艇良好的藏身處。

為了探測廣大的海洋，水中麥克風(hydrophone，或稱水聽器)被廣泛使用來聆聽海洋中的聲音，進行海洋聲學相關研究。在探究海洋環境之前，必須要先了解海洋中的環境噪音是由許多複雜的因素所造成，比如海洋中常見的聲源如生物、風浪、船舶等。海洋環境噪音資料特性多樣，分成日、夜、月份、季節等，有不同變化。

以臺灣附近海域而言，海洋環境噪音的可能來源包括：海洋亂流(ocean turbulence)、航行船隻、風浪、降雨、海洋生物等。臺灣周遭海域航運交通繁忙，許多船隻日夜航行，進行漁業捕撈、島嶼運補、貿易等海上活動，形成嘈雜的水中環境噪音；多樣的海洋生態圈，為水中環境噪音增添不同頻段的聲音；

自然界的降雨、風浪、波浪、海流等自然現象，也大幅影響水中環境噪音(Hodges, 2010)。近年來，除了探討單點的水中環境噪音外，水中環境噪音在時間與空間上之分布亦是熱門的議題，稱為水下聲景(Pijanowski et al., 2011)。為了瞭解水中環境噪音在時間與空間上的頻率特徵，進行實海域長期觀測相當重要。

常見的水中噪音觀測方式主要有以船艦布放的水中聲學設備，例如在支架上掛載被動的自記式水中麥克風和具有自動化資料擷取、儲存與電源供應的水密艙，自記式設備適合記錄短期間資料，並於設備回收後進行分析研究，不具即時傳輸功能；以水面艦拖曳的主動及被動式聲納陣列，通常較為大型，其收錄到的水中聲訊透過電纜回傳至船艦上後，進行音頻分析；以海底電纜附掛水中聲學設備，其優點在於電纜可即時傳輸資料，以及輸送電力進行長期觀測，然而海底電纜布設與維護的經費龐大、建置施工期長，且位於深水處不易維護；而投放聲標的水中環境噪音監測方式，在早期大部分為戰爭用途，具有即時傳輸訊號功能，聲標將訊號傳輸至飛機或艦艇上的監控台，進行訊號分析與辨識，然而因電力與無法錨碇等問題，僅適合短期觀測。近期國內外各研究單位所發展的水中噪音浮標也大都為短期觀測功能，觀測期間約為數週至數月，例如：Woods Hole Oceanographic Institution的水聲浮標(acoustic buoy)、RTSYS之RUBHY等，以年為觀測期間的設計較為少見。

1 國立成功大學 近海水文中心

2 國立成功大學 水利及海洋工程學系

水中背景噪音與海氣象一樣也會隨時空不同而變化，因此需要長期觀測始能獲得具代表性資料。國立成功大學近海水文中心基於二十多年的本土技術研發與操作經驗，資料浮標已為成熟的海上載台，不僅能以太陽能板供給充足電力，維持長期觀測之能量，有健全的通訊系統來即時回傳資料，更能與其他海氣象觀測儀器相搭配、整合，全面掌握海洋環境資訊 (Kao et al., 1999; 高等人, 2003; Doong et al., 2007; Lin et al., 2017; 吳等人, 2021)。因此，近海水文中心開發長期作業的水中聲音監測系統(USMS)，並將 USMS 整合於資料浮標上，研發出水聲浮標，即時回傳所量得的水中環境噪音頻譜，來進行水下聲景觀察。

## 二、觀測系統建置

近海水文中心所研發海氣象資料浮標以及所提供之維護與資料品管服務承蒙各界採用，2023 年 3 月有 31 站運作中，海氣象資料之平均觀測成功率以及颱風警報期間的觀測成功率均相當高，可見自主的研發與操作技術均已具備良好基礎，足以開發成即時水中噪音量測設備 (underwater sound monitoring system, USMS)。由於水下環境噪音的成因相當複雜，近海水文中心將 USMS 所量測到之原始資料，以快速傅立葉轉換法 (fast Fourier transform, FFT) 轉換為頻譜，並回傳頻譜至陸地端電腦，進行即時監測與現場狀態掌握，以利後續應用討論。圖 1 為即時水聲浮標觀測示意圖，說明如下：

### (一) 載台：

可以根據布放水深、預計觀測期間與儀器系統耗電等因素，選擇適合的浮標體作為 USMS 的載台，例如：2.5 公尺、1.8 公尺 (如圖 2)、1.2 公尺直徑的浮標體。浮標體之材質可由鋁合金或發泡材質製成，亦可依據前述因素設計錨繫與錨碇。此外，短期觀測之情況下，浮標體可不需配置太陽能板，僅透過艙內的電池組供電。

### (二) 儀器：

水中麥克風是用來量測水中聲波傳遞的重要感測器。聲波的動力過程是一種機械振動的波動現象，聲波的發射與接收主要是藉由電聲換能材料的特性

將電能轉換成機械能，或是將機械能轉換成電能。利用電聲換能材料所設計的電聲換能機制稱為電聲換能器。水中麥克風即為電聲換能器的一種，將聲能轉換成電能而將聲音記錄下來。水中麥克風的探頭 (probe) 是由壓電材料所製成，在無受力形變的情況下，壓電材料之結晶格 (crystalline lattice) 是呈現中性的帶電狀態。但是當某部分結晶格面受力作用產生形變時，因格線位移而產生電荷轉移，導致結晶格面產生多餘電荷，進而使壓電材料產生電場，此為透過壓電效應來感測聲音訊號。由於水中麥克風所量到的聲音訊號，屬於非常微弱的電壓級數，為了避免微弱的電壓訊號因傳輸衰減而更加微弱，導致訊號誤判，故水中麥克風的輸出端，必須與電荷放大器連結，量測到的水中聲音訊號先傳遞至電荷放大器，將訊號放大後再經由類比－數位轉換器 (analog-to-digital converter, ADC) 將訊號擷取至電腦中，以便進行後續的分析處理 (Urlick, 1983)。

USMS 以至少 16-bit 的類比－數位轉換器擷取水中麥克風訊號，即時分析水中噪音頻譜，並記錄水中麥克風所量到的電壓值原始資料 (raw data) 與水中噪音頻譜，且能透過衛星與 4G 即時傳輸水中噪音頻譜，在 4G 網路訊號涵蓋範圍內能即時傳輸原始資料，未來也極可能透過低軌衛星的寬頻傳輸服務，而獲得 4G 網路訊號涵蓋範圍以外即時的原始資料。此外，前述記錄的水中麥克風原始資料，於回收後亦可下載以供後續詳細分析使用。

水中噪音亦受風、浪、海流與降雨等因素影響，因此除圖 1 中示意繪出的 ADCP 與水中麥克風兩種感測器之外，尚有預留掛載其他海氣象感測器的空間，以便進行全面的資料分析，供給多元領域專家學者運籌帷幄使用。

### (三) 通訊：

由於衛星與 4G 均能雙向傳輸，即時水聲浮標不僅能傳輸觀測資料至陸上監控中心，亦能接收來自於陸上監控中心的控制指令，以變更工作模式，進行任務性質的短期密集觀測。例如：平時每小時固定時刻進行一次觀測，收集水中背景噪音資料，當有任務時，切換為每小時進行多次觀測，能獲得即時、密集的水

中噪音資料，唯資料密集程度受所選用的資料擷取系統性能影響。

#### (四) 觀測模式：

近海水文中心在自行研發 USMS 過程中，自行開發擷取模組韌體。以二階段進行開發測試，確保系統穩定性。第一階段為自記式，將觀測資料儲存於記憶卡中，開發訊號擷取、儲存及下載功能；第二階段則朝自動作業化方向開發，開發分析與傳輸功能，完善韌體系統。

USMS 以自動化作業方式進行開發，包含資料擷取、分析、儲存及傳輸等功能皆為自動化作業。其中，水中麥克風可收錄涵蓋到數 Hz 至數萬 Hz 的聲音頻段。擷取模組之擷取流程包含關機休眠以節省電力、暖機時間、量測時間。聲音擷取的流程皆可依需求調整，比如每小時僅取樣 3 分鐘，以最精省電力，維持在海上運作最長時間，或是設定每 10 分鐘收錄 1 分鐘，作為事件模式使用等，皆可透過韌體之撰寫與遠端遙控設定 USMS 之啟停。聲音取樣頻率可以達到 50 kHz。分析模組獨立在擷取模組之外，作為聲音系統收錄所需訊號後，在資料浮標上直接進行頻譜分析使用，解算後所得到的頻譜將透過傳輸模組回傳至陸地端電腦，供給使用者即時觀看，了解即時實海域聲景資訊。

#### (五) 電力：

為了維持資料浮標在海上長期觀測的效能，資料浮標電力系統設計與資料取樣次數的規劃相當重要。資料浮標的電力系統使用太陽能板在有日照時將電瓶進行充電，而在無日照時，則是以電瓶內儲存的電力供電給觀測儀器。資料取樣次數的設定影響的是電力充耗比是否能達到至少平衡或充耗比大於 1，意即以太陽能板所能充電之電量大於或等於觀測儀器之總耗電量。若資料取樣的次數設定過於頻繁，造成高耗電量且充耗比小於 1 的情況，代表充電量不足以供給觀測儀器使用，會造成觀測中斷的情況發生。因此在系統設計時，須透過精準的電力計算，規劃適合的取樣次數與取樣頻率、時間等。

#### (六) 錨繫與布放：

一般而言，資料浮標的錨繫設計著重於錨繫本身之強韌度，以維持在海上之長期觀測。然而在以資料浮標作為水下噪音觀測儀器的載台時，必須注意資料浮標的錨繫系統對於水下噪音資料蒐集之影響。因此，為了避免水流流經水中麥克風電纜所致的噪音 (flow-induced noise)，在電纜上包覆導流或整流材料，例如：cable fairing，可使水流所造成的噪音減弱。圖 1 中 fairing 作用係為降低海流引起的噪音，以避免所量測之水中噪音受海流影響。此外，為了維持錨繫的強度，所使用的錨繫材料為鐵鍊或是鋼索。然而鐵鍊之間為環與環相接，當波浪將鐵鍊拉伸時，將因碰撞而產生類似敲擊的噪音。因此，在錨繫設計中使用抗旋鋼索(圖 3)，該鋼索經抗拉測試與鍍鋅抗蝕。鋼索之錨眼為水泥灌漿鑄造，非普通橡膠的壓鑄，增強抗拉力。

由前述配備所製的資料浮標與 USMS 能最大限度的量測不受海流與其他機械噪音影響的水下環境噪音。再者，因資料浮標錨繫所用之鋼索與水中麥克風電纜同捆，如此特殊的錨繫設計，在資料浮標布放時，不能如同以往透過重力牽引的方式布放，意即直接將錨碇塊與錨繫直接拋入海中，而是需要用工作船吊掛著錨碇塊及鋼索，漸進式地讓錨碇塊與錨繫沒入水中，並緩慢放鬆鋼索，讓錨碇塊下沉的速度極慢，以避免與鋼索同捆的水中麥克風電纜因大力撞擊水面而受損。資料浮標布放時的海況應維持在浪高 1 米以下，以避免水下儀器受不穩定的海況而受損。

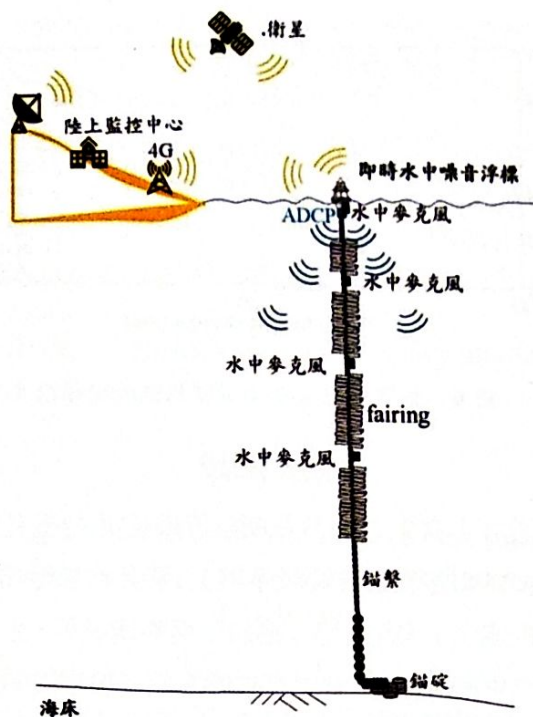


圖 1：即時水聲浮標觀測示意圖

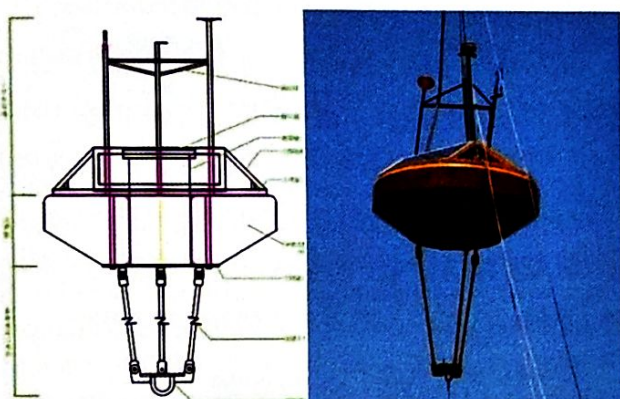


圖 2：1.8 公尺直徑的發泡材質浮標體



圖 3：抗旋鋼索

### 三、資料分析方法

觀測水下環境噪音所用的訊號擷取模組由近海水文中心研究團隊開發，並依據取樣定理 (Nyquist theorem)，設定取樣頻率 (sampling rate) 為 50 kHz，最高可分析至 25 kHz 的頻譜。取樣完成後分析頻譜，並透過通訊模組將頻譜資料回傳至中心。資料分析模

組亦為本案團隊自行開發，其以高運算效率之單板電腦組成，並將自行研發的分析程式寫入韌體，當每小時量測結束後，將抓取硬碟中的原始資料 (raw data) 進行頻譜分析。

在資料浮標上之分析模組，採快速傅立葉轉換法 (FFT) 對於取樣訊號進行頻譜分析，將時域訊號轉換為頻率域，以獲得水中噪音頻譜 (spectrum)。待取回資料浮標上的原始資料後，再以 MATLAB 軟體進一步進行訊號處理及分析，比如以短時傅立葉轉換 (short-time Fourier transform, STFT) 進行時頻分析，並透過觀察時域的聲壓能量變動、頻域的聲壓位準 (SPL) 變化、及觀察時頻譜等進行後續探討。

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

$$SPL = 20 \log_{10} \frac{P_{rms}}{P_{ref}} \quad (1)$$

聲壓位準 SPL 的單位以分貝 (decibel, dB) 表示， $P_{rms}$  為量測到聲壓的均方根值， $P_{ref}$  為水中聲壓參考值，一般而言為  $10^{-6}$  Pa (= 1  $\mu$ Pa)。

### 四、觀測成果

本中心將自行研發的 USMS 整合至臺灣澎湖七美與屏東南灣兩座資料浮標，透過已經長期作業化的資料浮標作為載具，USMS 之量測時間亦受到保障，透過電力計算與韌體調控觀測流程，至少可在海上作業化量測與即時回傳資料長達數個月甚至超過一年之久。

近海水文中心第一座掛載 USMS 的資料浮標，於 2015 年 7 月 16 日布放於澎湖七美，並能即時收到當地的水下環境噪音頻譜 (圖 4)。當年 8 月 8 日，蘇迪勒颱風行經 USMS 所在區域，頻譜比沒有降雨或地震時的環境噪聲頻譜聲壓位準高出許多，證實本中心所開發之 USMS 不僅能存活於海氣象情況嚴峻之期間，並成功收錄到其環境噪音。

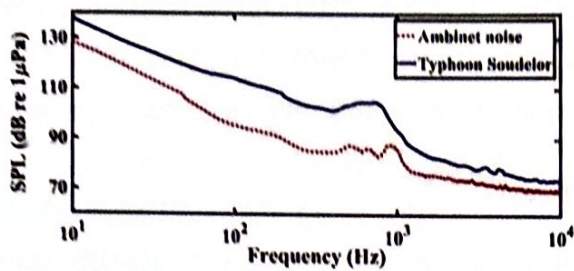


圖 4：蘇迪勒颱風行經七美浮標頻譜圖

臺灣現運作中的 31 座資料浮標上，大多有配備波浪儀，卻很少裝設水中麥克風。因此，透過分析水中環境噪音的聲壓資料與資料浮標上原有的波浪儀所量測到的波高資料，則可得到該海域波高與水中環境噪音聲壓級(SPL)之關係。近海水文中心整合波浪儀及 USMS 至屏東南灣浮標上，並收錄自 2015 年 11 月 4 日至 2016 年 7 月 31 日之資料。透過將波高分類(21-40、41-60、61-80、81-100、101-120 公分)，得到五個波高段之水中環境噪音頻譜(圖 5)，說明在 200 Hz 以內的水中環境噪音聲壓值隨著波高越高而增強。

為了瞭解特定頻率下的水中環境噪音聲壓值隨著波高的變化程度，圖 6 中呈現在不同頻率下的聲壓變化值與波高變化值。從圖 6 中可知，在特定的頻率下，只要知道波高變化，便能推算出該海域的聲壓值變化。使用者只要先透過長期觀測得到該海域在某一波高下的水中環境噪音，爾後當波高有所變化時，再將對應的聲壓變化值疊加，便能得到該海域在波高變化後的水中環境噪音聲壓值。

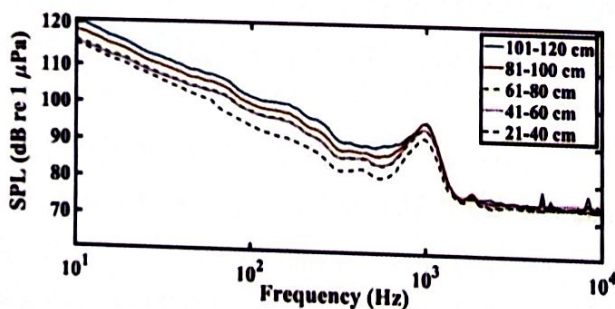


圖 5：不同波高時之水中環境噪音頻譜圖

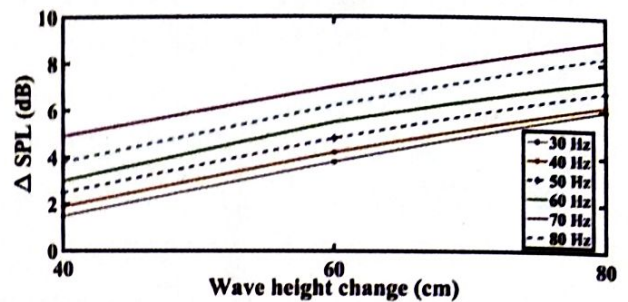


圖 6：聲壓變化值與波高變化值之關係圖

## 五、結論

近海水文中心開發長期且即時的水中聲音監測系統(USMS)並整合於資料浮標上，研發出水聲浮標，用於監測水中環境噪音。透過現場觀測成果，分析波高與水中環境噪音，建立水中環境噪音聲壓級與波高之關係。並可證實水聲浮標之實用性與所觀測水中噪音資料的合理性。

即時水聲浮標不僅能用以收集水中環境噪音，未來亦能針對任務需要而獲得即時且密集的水中噪音資料。未來透過整合聲源定位程式，即時水聲浮標亦可開發作為水中聲源定位用途。此外，根據布放水深、預計觀測期間等因素，規劃適合的浮標體、錨繫、錨碇以及儀器之組合，提高布放與回收的機動性。

## 六、參考文獻

- (1) 吳立中、董東璟、滕春慈、吳益裕，2021，臺灣海域作業化海氣象資料浮標監測網，海洋及水下科技季刊，第三十一卷，第三期，9-14。
- (2) 高家俊、錢樺、邱銘達、莊士賢，2003，碟形浮標觀測方向波譜誤差分析及修正，海洋工程期刊，21 卷，1 期，24-33。
- (3) Doong, D.J., Chen, S.H., Kao, C.C., and Lee, B.C. (2007) Data quality check procedures of an operational coastal ocean monitoring network, *Ocean Engineering*, 34, 234-246.
- (4) Hodges, R.P. (2010) *Underwater Acoustics*. Wiley.
- (5) Kao, C.C., Chuang, L.Z., Lin, Y.P., and Lee, B.C. (1999) An introduction to the operational data buoy system in Taiwan, *Proceedings of the International MEDCOAST Conference on Wind and Wave Climate of the Mediterranean & the Black Sea*, Antalya, Turkey, 33-39.
- (6) Lin, Y.P., Huang, C.J., Chen, S.H., Doong, D.J., and Kao, C.C. (2017) Development of a GNSS buoy for

monitoring water surface elevations in estuaries and coastal areas, *Sensors*, 17, 172, doi:10.3390/s17010172.

- (7) Pijanowski, B.C., Farina, A., Gage, S.H., Dumyahn, S. L., and Krause, B. L. (2011) What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape Ecol.* 26, 1213–1232.
- (8) Urick, R.J. (1983) *Principles of Underwater Sound*. 3rd Edition, McGraw-Hill, New York.

### 英文摘要

#### Long-term and real-time underwater sound monitoring using hydrophones installed on the data buoy

Kuan-Wen Liu<sup>1</sup>、Yen-Pin Lin<sup>1</sup>、Ching-Jer Haung<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Coastal and Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University

<sup>2</sup> Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

#### Abstract

Taiwan is located in a crucial strategic area surrounded by the quick-changing ocean, and the neighboring underwater acoustic environment remains elusive. It is common to place hydrophones and cables at the seabed to detect sound signals, but the cost is enormous, and the instruments are not easy to maintain. COMC aims to develop a cost-effective underwater sound monitoring system (USMS) to obtain long-term and real-time underwater ambient noises and their spectra. The USMS is implemented by installing the hydrophones to a buoy that is usually used to obtain long-term and real-time oceanic and meteorological data. A relation between wave height and underwater sound pressure level (SPL) is obtained in the waters near the southwestern coast of Taiwan. Based on this relation, once the wave height in specific waters is known, the corresponding underwater ambient noises in terms of SPL can be derived.

### 作者簡介



劉冠汶(Kuan-Wen Liu)，國立成功大學水利及海洋工程研究所博士，現任成功大學近海水文中心博士級研究員，專長為水中聲學、訊號處理與分析、以時間反轉法及聲線法進行水中聲源定位。



林演斌(Yen-Pin Lin)，國立成功大學水利及海洋工程研究所博士，現任成功大學近海水文中心研發組長，專長為資料浮標系統設計規劃、海氣象觀測系統開發。



黃清哲(Ching-Jer Haung)，美國愛荷華大學機械工程博士，現任國立成功大學水利及海洋工程學系名譽教授兼近海水文中心顧問。專長為三維數值造波水槽之發展及其應用、碎波模擬及碎波產生氣泡之研究、土石流地聲監測、光纖感測器之研發、顆粒流。