

水下遙測系統之研發與應用 Development and Application of Underwater Telemetry System

涂季平¹

周志豪²

陳建宏³

摘要

近年來在水下通訊領域中有線通訊應用於水下遙測技術已十分成熟，但在無線通訊方面則反之。本文主要目的為應用水下無線通訊建立一套水下遙測系統，提供水下資訊量測平台，並利用此平台與工作母船建立相互溝通之軟硬體。硬體架構包含水密箱、水下聲波數據機 (UWM2000)、電力電源系統、水下陣列麥克風。軟體介面以 LabVIEW 程式撰寫，其可分為水面監控分析介面與水下資料擷取介面。水下遙測系統為利用浮於水面之水下數據機 (surface modem) 設定水下載體之參數與水下背景噪音擷取時間，此時佈放於水中之水下數據機 (bottom modem) 接收指令執行擷取與儲存之步驟並即時將資料上傳。本研究以實際高雄港港區水深 7 公尺進行水下遙測系統性能測試，證實此系統可透過水下無線通訊達到資訊傳遞正確性與即時性。這樣一個水下遙測系統，即可成為水下資訊交換中心，有助於未來將此系統應用於水下量測與聲源定位之研究。

關鍵字：水下無線通訊、水下遙測系統、水下聲波數據機

Abstract

In recent years, the wired communication applied to the underwater telemetry system has been widely developed in underwater communication however the wireless communication has not yet. The purpose of this paper is to construct an underwater telemetry system with wireless communication technology. This system provides an underwater measurement platform as well as an underwater communication platform between surface ships or underwater vehicles. The system hardware architecture includes: cylindrical pressure vessel, underwater acoustic modems (UWM2000), electric power system, and array hydrophones and its program is written by LabVIEW that can be divided into monitor and analysis interface and data acquisition interface. The function of underwater telemetry system utilizes surface modem floating on the surface of water that set up the parameter of the underwater vehicles and acquisition time of underwater background noise. After the bottom modem deployed underwater receives the command, it will the execute data acquisition and store, and upload the data to surface modem in the same time. In this research, we proceed the systematic function test of underwater telemetry system in the 7 meters depth of water in Kaohsiung Harbor, and has been confirmed the accuracy and reliability of the information transmission in underwater wireless communication. Furthermore, underwater telemetry system becomes a center of information exchanger in ocean which is contribute to the research of measurement and source localization analysis in the future.

Key: underwater wireless communication、underwater telemetry system、underwater acoustic modem

¹ 作者一，國立成功大學系統與船舶機電工程系教授

² 作者二，國立成功大學系統與船舶機電工程系博士班研究生

³ 作者三，國立成功大學系統與船舶機電工程系碩士班研究生

壹、前言

台灣身為海島型國家，擁有豐富海洋資源與空間，若能善加開發勢必對人類有莫大的幫助。過去數十年來，國內從事近海研究、深海調查等水下作業相關技術之需求日益增加，應用無人水下載具 (Remotely Operated Vehicle, ROV) 輔助作業已是趨勢，相關水下技術國外已達成熟商用階段，而國內成功大學與中山大學校際合作亦有自行研發 ROV 進行研究[1-2]。惟 ROV 受限於纜線限制，以較廣的應用層面來說，要在深海或寬廣的海域作業並不適用，如何應用不同無線通訊技術達到水下遙測目的，是近年來相競研發之目標。海洋是一個極複雜的環境，現今成熟的電磁波用於水下時，傳輸能量會因頻率增加衰減十分之快，而聲波在海洋環境之下雖然有能量損耗與干擾，但都是在可控制範圍，且在傳遞過程中需克服都卜勒效應與多重路徑等問題，因此造成傳輸通道之限制。在水下遙測技術文獻上，有 Ryerson[3]，以訊號頻率調變方式為基礎，實際應用於海洋地震資料收集。Jones[4]和 Stojanovic 等人[5]，分別以差動相位鍵移 (Differential Phase Shift Keying, DPSK)、直序展頻 (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) 與跳頻展頻 (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS) 之調變技術達到可靠性與正確性遙測之目的，且用於廣域之海洋資料收集。余平等[6]，以水下聲波數據機 (UWM4000) 為基礎建立聲速剖面遙測系統，可提高深海聲速剖面量測的工作效率。

本文目的為應用水下無線通訊建立一套水下遙測系統，提供水下資訊量測平台，並利用此平台與工作母船建立相互溝通之軟硬體。水下遙測系統為利用浮於水面之水下數據機 (surface modem) 下達指令於水下載體，此時佈放於水中之水下數據機 (bottom modem) 接收指令執行資料擷取與資料儲存之動作並且透過數據機即時將資料上傳。

貳、基礎理論

水下遙測系統為一個組裝式整合系統，開始建構遙測系統初期，首先會遇到防水與載具機構設計問題，接著就是各子系統之間的溝通介面整合與電力系統的製作，應用的理論涵蓋各層面，因此本文將基礎理論分成四部分，介紹如下：

2.1 水密箱設計基礎理論

水密箱主要構成為圓筒型壓力殼與圓端板蓋，如圖 1 之(a)所示，相關設計主要參考林忠宏[7]所提供的計算理論且以實驗來證明圓筒型壓力殼之壓潰估算。圓筒壓力殼在水下所產生的破壞為挫曲破壞與降伏破壞，而圓端板蓋則會產生撓度變形與應力集中於板蓋之邊緣，以下將分為三點來說明。

2.1.1 圓筒型壓力殼之挫曲破壞

一般而言，挫曲破壞可分為整體挫曲 (General Buckling) 及局部挫曲 (Local Buckling) 兩種形式，如圖 1 之(b)、(c)所示。本系統之圓筒型壓力殼為無肋骨構造，故其發生挫曲現象屬於整體挫曲。

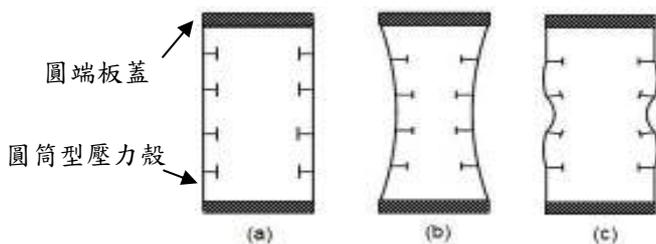


圖 1 (a)水密箱 (b)整體挫曲 (c)局部挫曲

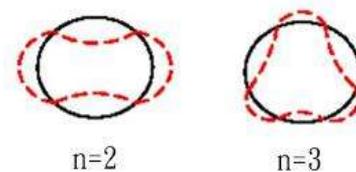


圖 2 n 之個數示意圖

本文採用 Kendrick[8]所提出之半經驗數學公式，作為圓筒型壓力殼是否發生整體挫曲破壞的參考依據：

$$P_k = [n^2 - 1 + 0.5\alpha]^{-1} \left\{ \frac{Et}{R} \left[\frac{n^2}{\alpha^2} + 1 \right]^{-2} + \frac{D}{R^3} (n^2 - 1 + \alpha^2)^2 \right\} \quad (1)$$

公式(1)中 n 為殼體失穩時沿圓周方向所形成之全波數，失穩全波數大都在兩個以上，如圖 2 所示。由此式可計算出在不同失穩全波數下，壓力殼最低可承受之整體挫曲壓力 P_k 。

2.1.2 圓筒型壓力殼之降伏破壞

理論上殼體之降伏破壞最容易發生地方為兩肋骨間中間點，如圖 3 所示。本文採用 Von Mises 所提出殼體應力公式(2)，作為圓筒型壓力殼是否發生降伏破壞的參考依據：

$$\sigma_p = (\sigma_t^2 + \sigma_F^2 - \sigma_t \sigma_F)^{1/2} \quad (2)$$

此處之環向應力 σ_t 和軸向應力 σ_F 採用 Von Sonden 及 Gunther[9]公式。若經由公式計算所求得殼體所受應力為 σ_p 值小於圓筒材料之降伏強度時，圓筒型壓力殼即不會產生降伏破壞。

2.1.3 上、下圓板蓋之變形破壞

上、下圓板蓋受到水深壓力產生撓度變形與應力集中於板蓋邊緣，因此在設計上需考量其最大撓度變形量要在彈性範圍內與產生之應力集中要小於材料之機械性質。本文採用板殼力學[10]之公式(3)、(4)，假設受均佈負荷之圓盤來計算，如圖 4 所示，作為上、下圓板蓋是否發生破壞為參考依據：

$$\text{最大撓度：} w_{\max} = \frac{p_0 a^4}{64D} \quad (3)$$

$$\text{最大應力集中：} \sigma_{r,\max} = \frac{3 p_0 a^2}{4 t^2} \quad (4)$$

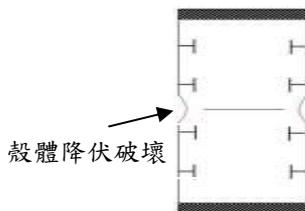


圖 3 兩肋骨間中間點之殼體降伏

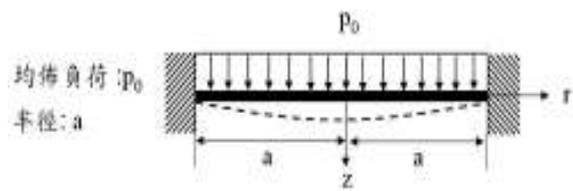


圖 4 均佈負荷之圓盤受力圖

2.2 水下聲波數據機基礎理論

水下聲波數據機採用美國 Link Quest 公司所生產的 UWM2000 聲學調變解調器，具有低錯誤率小於 10^{-7} 與傳送資料為 17.8k(bits/s)之功能。UWM2000 所採用調變技術為寬頻展頻技術 (Broadband Acoustic Spread Spectrum Technology) [11]。展頻在通訊領域中內是一種重要的調變技術，主要概念是將資料訊號擴展成較寬的頻譜使得信號不易被干擾，而在資料傳輸方面關於通道容量 (Channel Capacity) 之沈農容量定理 [12] 為

$$C = B \log_2(SNR) \quad (5)$$

C 為容量通道 (單位: bits/s)、 B 是通道頻寬 (單位: Hz)、 SNR (Signal to Noise) 為訊雜比。由公式(5)知，訊雜比是關鍵的參數，其可以設定可實現的資料速率之上限。如果給定一個特定雜訊位準時，很顯然的增加訊號強度或頻寬可提升資料傳送的速度。

2.3 RS232 基礎理論

RS232 (Recommended Standard-232) 是由電子工業協會 (Electronic Industries Association, EIA) 在 1969 年所制定的傳輸標準界面，其可分為同步與非同步之資料傳輸。完整的非同步傳輸資料格式包含開始位元、資料位元、檢查位元與停止位元。在本遙測系統中，個人電腦 (PC) 連接水下數據機 (UWM2000) 之通訊介面為 RS232 連接器 (DB-9)，如圖 5 所示，電腦連接埠設定為常見的格式 8-N-1，依序代表為 8-bits 資料位元、無檢查位元、1 停止位元，在資料傳送速率 (Baud) 設定為 9600 bits/s。

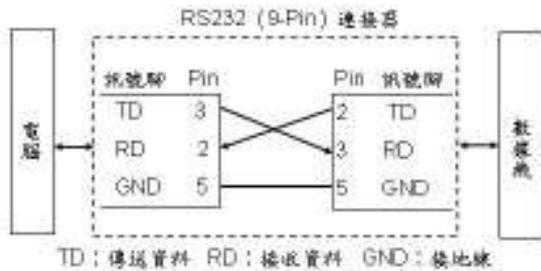


圖 5 RS232 連接器示意圖

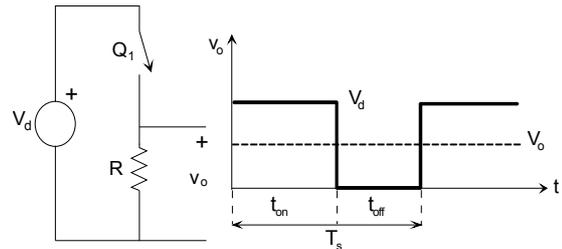


圖 6 電源轉換器切換模式

2.4 電力系統基礎理論

電力系統之電路設計為利用 DC/DC 轉換器原理，其作用是在輸入電壓與輸出負載變動的情況下，能調整輸出電壓為所設定的位準。由圖 6 來說明電壓準位轉換器切換之原理，其中輸出電壓 V_o 之平均值大小 (V_0) 與開關導通時間 (t_{on}) 及截止時間 (t_{off}) 有關。在 V_o 大小之調整中，採用最典型的脈波寬度調變法 (Pulse Width Modulation, PWM)，將切換週期 $T_s (= t_{on} + t_{off})$ 固定，藉由調整 t_{on} 之大小來改變 V_o 之大小[13]。

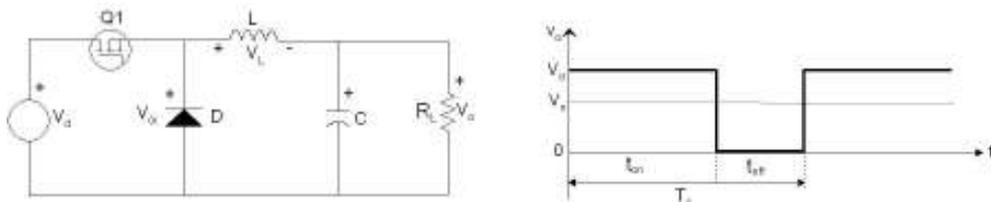


圖 7 純電阻性負載之降壓式轉換器

本系統之電源轉換器切換模式屬於降壓式 (buck)，如圖 7 所示，由波形圖可知，輸出電壓 V_o 是由開關位置決定，數學式如 (6) 所示。

$$\begin{aligned}
 V_0 &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} V_0(t) dt \\
 &= \frac{t_{on}}{T_s} V_d = D V_d \\
 \Rightarrow \frac{V_0}{V_d} &= \frac{t_{on}}{T_s} = P_w \quad (6)
 \end{aligned}$$

P_w 為功率開關的工作週期 (Duty Ratio)，所以 V_o 可藉由調整責任週期 $\frac{t_{on}}{T_s}$ 來控制，達到預期設計之直流電壓規格。

參、實驗架構與結果

3.1 水下遙測系統實驗架構流程與組成配置說明

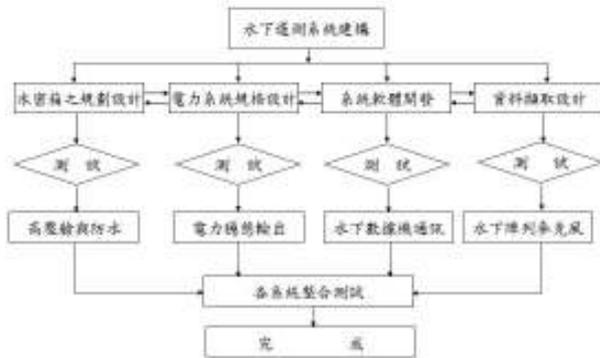


圖 8 實驗架構流程圖

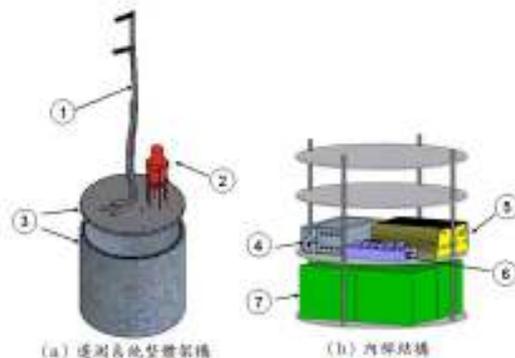


圖 9 各單元組裝對應示意圖

由圖 8 可知，水下遙測系統實驗架構流程分為水密箱設計、電力系統規格設計、系統軟體開發與資料擷取設計四個部分。在系統組成配置方面，如圖 9 所示，包含水下麥克風陣列 B&k 8104（編號 1）、水下聲波數據機（編號 2）、水密箱（編號 3）、放大器 B&k 2692（編號 4）、單板電腦（編號 5）、抗雜訊式接線盒（編號 6）、電力系統(DC/DC)（編號 7）、資料擷取卡(DAQ Card-6062E)。

3.1.1 水密箱設計規格與防水測試說明

水密箱外表設計為一圓形筒，尺寸為外徑 607 mm、高度 580 mm、厚度 27mm、上、下端板厚度 20 mm，整體重量(未含儀器) 309 kg，材料為低碳鋼 (S15C) 所製，其中降伏強度為 250MPa。經由理論公式（以水深 100 公尺）計算：圓桶型壓力殼降伏破壞應力為 18.55MPa，小於材料之降伏強度不會產生破壞，其可承受挫曲破壞應力為 307.35 MPa，表示壓力殼在此深度下不會產生挫曲破壞，上、下板蓋之最大撓曲變形量為 0.06mm，尚在彈性變形範圍內，最大集中應力為 172.71MPa，沒有大於材料之降伏強度，因此不會產生破壞。經加工製作完畢後，由深海高壓模擬艙實際測試，實驗流程圖，如圖 10 所示，一開始先將水密箱置入高壓艙內並蓋上高壓艙蓋鎖緊，接著將高壓艙進水與抽真空。之後，吾人操作控制面板，設定壓力為 10 大氣壓力，經加壓時間分別為 1.5 與 6.5 小時，實驗結果為無漏水情況。由理論與實驗比較說明水密箱可在水深 100 公尺下不會產生破壞並且有防水之效果。



圖 10 深海高壓模擬艙實驗流程圖

3.1.2 電力系統規格設計說明

水下遙測系統選用鉛酸電池為電力之來源，各子系統電力需求規格圖，如圖 11 所示，經由電源規格確定後，即可選擇容量合適的電池。首先必須確定電池的能量密度，設定載具工作時間，可得各能量消耗元件之總瓦特數，即可算出所需電池容量及數量，本系統選用 6 顆 12 伏特 50 安時(AH)鉛酸蓄電池，將其分成兩組各別串聯再經由 DC/DC 電源轉換器成為各子系統所需之直流電壓規格，電力測試組裝圖，如圖 12 所示。

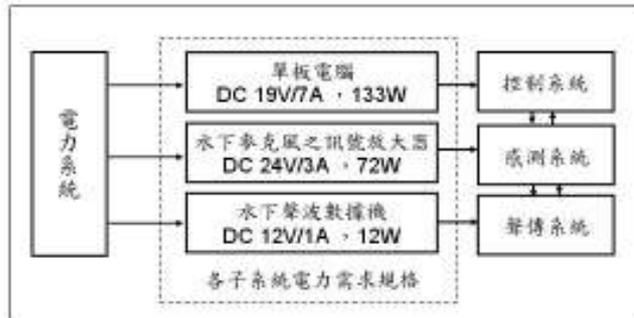


圖 11 各子系統電力需求規格圖



圖 12 單板電腦電力測試組裝圖

3.1.3 遙測系統介面分析說明

水下遙測系統採用 LabVIEW 圖控程式軟體撰寫，系統可分為水面監控分析介面與水下資料擷取介面，如圖 12、13 所示。水面監控分析介面功能為水下聲波數據機 (surface modem) 組態設定、水下音響訊號擷取時間參數設定、水下音響訊號讀取圖形顯示與指令執行狀況顯示。水下資料擷取介面功能為透過水下聲波數據機 (bottom modem) 接收指令完成相對應之執行步驟。



圖 12 水面監控分析介面



圖 13 水下資料擷取介面

3.2 高雄旗津外海實驗與結果

實驗地點於高雄港港區，水深7公尺，位置為東經120度16.405分；北緯22度36.606分，佈放示意圖與實測圖，如圖14、15所示。本實驗分為水下聲波數據機通訊測試與水下背景噪音量測兩個實驗。在訊號擷取方面相關設定，說明如下：取樣頻率40KHz、兩組水下麥克風 B&k 8104 放大器增益分別為10mv/pa、100μ/pa。

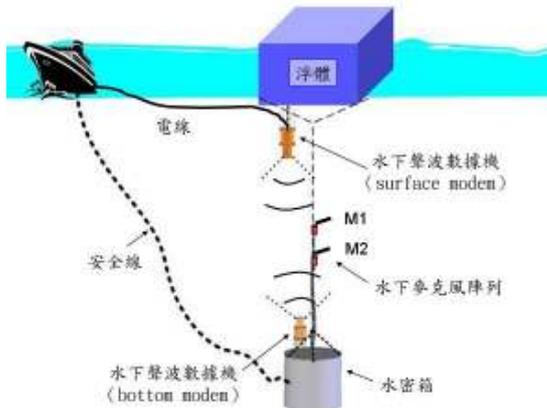


圖 14 佈放示意圖



圖 15 高雄港外海實測圖

3.2.1 水下聲波數據機通訊實驗

預先設計一組特殊波形儲存於單板電腦，如圖16之(a)所示，此圖前半部以頻率為10K、11K、12K正弦波組合，後半部為30K~40K寬頻訊號，此時經由母船執行讀取指令，透過水下聲波數據機將預設之特殊波形傳輸上來，結果如圖16之(b)所示，可知所設計之特殊波型在傳輸與接收資料比較後並無錯誤，實驗結果證實遙測系統能可靠地運作並經由水下無線通訊將資料確實傳送至母船。

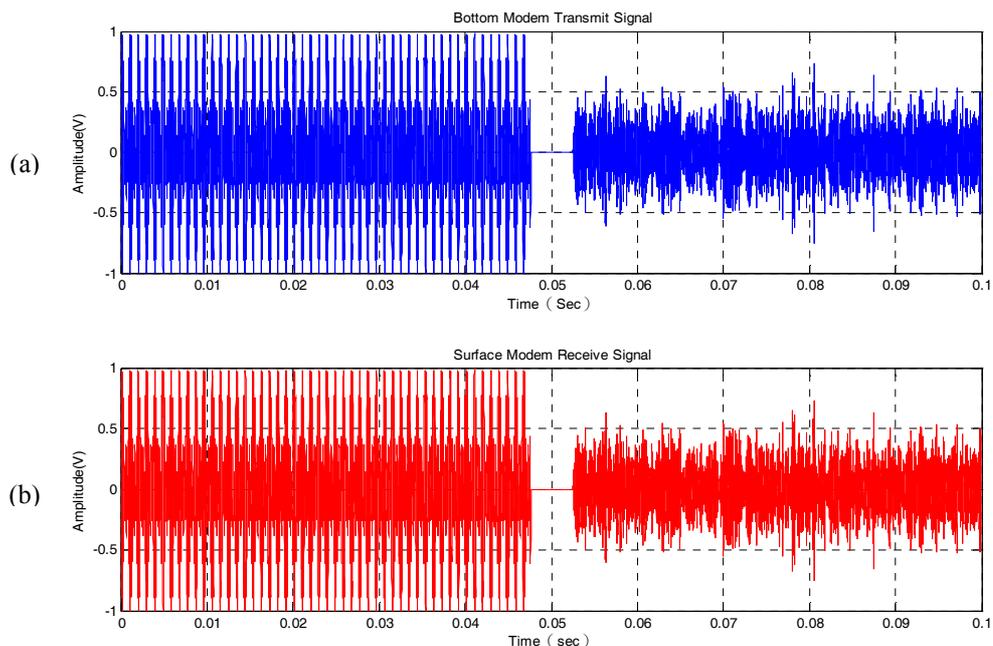
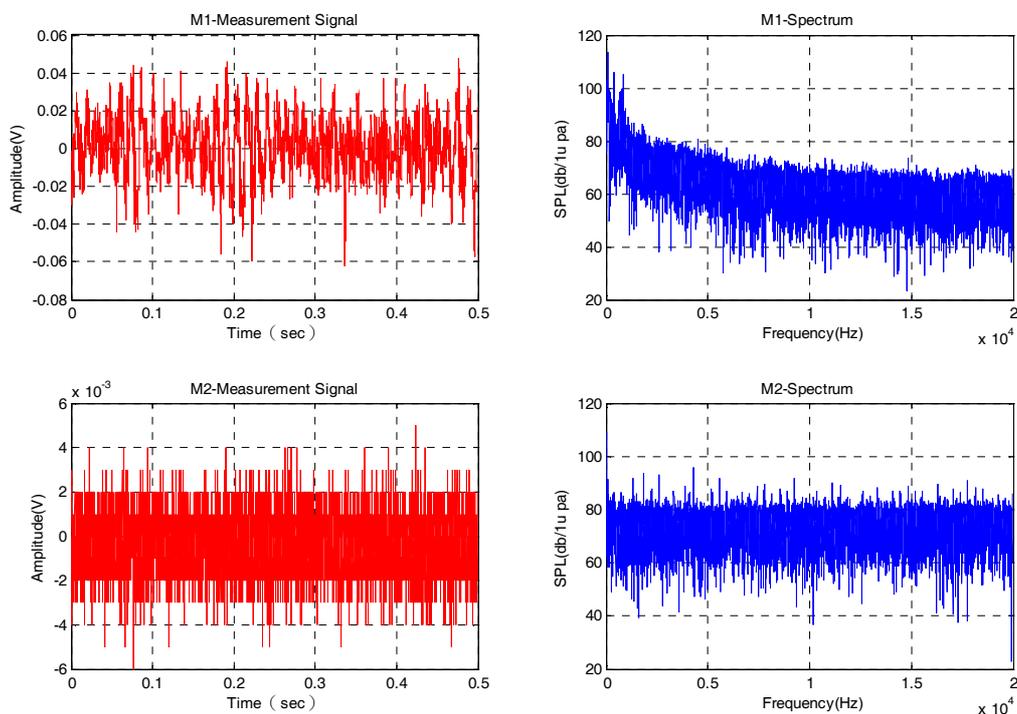


圖 16 傳送與接收訊號圖

3.2.2 水下背景噪音量測實驗分析

運用水面監控軟體介面設定水下麥克風陣列 M1 和 M2 之背景噪音擷取時間為 0.5 秒並將所擷取資料儲存於單板電腦，經由母船下達讀取指令，將所擷取之水下聲音訊號透過數據機傳輸至母船。藉由訊號處理，如圖 17 所示，M1 水下麥克風所量測到之水下背景噪音研判為船上馬達發電機噪音與港區船舶噪音所造成，而 M2 水下麥克風所擷取之訊號圖有扭曲失真之情況，原因為訊號放大器增益設定太小所造成。遙測系統在量測水下背景時，因無法事先得知海底背景噪音狀況，增益放大器之設定往往過大或過小而造成所量測之訊號扭曲失真，此時必須要將系統拉至岸邊拆裝重新設定，費時又費人力，往後改進方式為利用水下聲波數據機來控制增益放大器調整至所需增益。由實驗可知 M1 與 M2 水下麥克風所擷取之水下背景噪音經由水下聲波數據機將資料正確的傳遞至母船，並且證明此遙測系統可達到水下量測之功能。



由圖 17 水下陣列麥克風量測訊號圖與頻譜圖

肆、結論與未來工作

水下遙測系統經由高雄港港區實際功能測試，確實可達到遙測之目的，惟遙測系統過於笨重，在搬運與系統佈放上造成很多困擾與危險性，而後勢必要以縮小化改進並且往更深海域進行實驗。由實驗證明遙測系統可透過水下無線通訊達到資訊傳遞正確性與即時性，其可成為水下資訊交換中心，有助於未來將此系統應用於水下量測與聲源定位之相關研究。

伍、誌謝

本研究承蒙國科會經費補助，計畫編號：NSC 95-2221-E-006-496，僅此致謝。

陸、參考文獻

1. 方銘川,“抗流型水下遙控載具(ROV)關鍵性技術開發暨系統整合”,第十九屆中國造船暨輪機工程研討會論文集,236-239頁,96年3月。
2. 謝旻甫,陳政宏,“抗流型水下遙控載具高性能推進系統之研發”,第十九屆中國造船暨輪機工程研討會論文集,244-248頁,96年3月。
3. David E. Ryerson, “A Higt Data Rate Underwater Acoustic Telemetry System”, Int Forum on Ocean Eng in the '80s, p 259-262, Sep 1980.
4. J. C. Jones, A. Di. Meglio, L. S. Wung, R. F. W. Coutes, A. Tedeschi, R. J. Stoner, “The Design And Testing Of a DSP, Half-Duplex, Vertical, DPSK Communication Link”, Oceans Conference Record, Vol.1, p 259-266, 1997.
5. M. Stojanovic, J. G. Proakis, J. A. Rice, M. D. Green, “Spread Spectrum Underwater Acoustic Telemetry”, Oceans Conference Record (IEEE), Vol.2, p 650-654, 1998.
6. 徐平, 廖开训, 陶军, 肖波, “基于声学调制解调的声速剖面遥测技术”, 海洋技术, 第25卷, 第3期, 2006年9月。
7. 林忠宏, 許哲穎, 張平儒, “深海環境下圓筒型壓力殼之壓潰行為探討”, 中國機械工程學會第二十二屆全國學術研討會論文集, 2665~2670頁, 2004年1月。
8. S. Kendrick, “The Buckling Under External Pressure of Ring stiffende Circular Cylinder”, R.I.N.A, 1965.
9. K. Von Sonden and K. Gunther, “The Strength of Cylindrical Shells, Stiffened by Frames and Bulkheads, under Uniform External Pressure on all Sides”, translated by E. N. Labouvie, annotated by E. Weak and W. A. Nash, TMB, Report T-38, 1952.
10. T. K. Kevin, “Stresses In Platens And Shells”, McGraw-Hill, Inc, U.S.A, p112~113, 1981.
11. Link Quest Inc. 2005. Underwater Acoustic Modem User's Guide.
12. C E Shannon, “A Mathematical Theory of Communication”, The Bell System Technical Journal, Vol.27, p379~423, p623~656, 1948.
13. 江炫樟, “電力電子學”, 全華科技圖書股份有限公司, 1997年。