

國立臺灣大學工學院工程科學及海洋工程學系

碩士論文

Department of Engineering Science and Ocean Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

淡水河域水下通訊模擬與實驗研究

Underwater Acoustic Communication Study

in Tamshui River



Wei-Shen Yang

指導教授：陳琪芳 博士

Advisor: Chi-Fang Chen, Ph.D.

中華民國 98 年 6 月

June, 2009

## 致謝及感言

兩年的時光匆匆溜走，努力考上這學校真的很值得，良好的環境與資源，遇到更多優秀的人才，每天值得學習的地方真的多，時間得分秒必爭，深怕錯過學習的機會。這兩年的實驗幾乎全程參與，雖然辛苦相對地得到的也越多。

感謝陳琪芳教授這兩年的指導與教誨，很高興加入水中聲學的領域及團隊，不僅在學術的研究與實驗上值得學習，更重要是人與人之間的相處，很多實驗需要專業的技術人員佈置與幫忙，對於經驗少之又少的自己，尊重與請教才能得到的更多。感謝翔智、永盛、元櫻學長學姐不管在課業、研究、程式方面的指導，與同學成鷗、冠宇、宗聖之間的互相鼓勵，以及學弟侑憲、明格、志瑋等實驗上的幫忙，還有行政方面的幫助璧君、斯芳。

特別感謝支持我的家人、親戚及朋友的相伴，當需要鼓勵與支撐時，都給我很大的幫助。使論文能順利完成，在此致上我最深的謝意。

## 中文摘要

就水下通訊而言，淺水環境面臨最大困難，是訊號受通道的多重路徑效應影響下，導致在振幅及相位失真。本論文是將水下通訊實驗進行量化分析，藉由分析結果把淡水河作為主要水下通訊的測試場。使用非線性決策迴授等化器主要目的為消除通道的符間干擾與補償原始訊號。本論文在淡水河作水下通訊實驗，利用線性與非線性等化器處理頻率 8kHz 資料傳輸速率每秒 4K 位元之二位元相位鍵移(BPSK)訊號，分析該訊號經過距離為 50~190 公尺之淺水環境通訊傳播成效，將實驗收到的訊號與高斯波束法模擬淺水環境相比下，了解整個淺水通道環境的影響情況。

關鍵字：多重路徑效應、二位元相位鍵移、決策回授等化器、符間干擾、高斯波束法

## Abstract

On the underwater communication, the major obstacle is multipath effects with the shallow water channel. Acoustic signals that propagate through shallow water channel are effected by amplitude distorsion and phase fluctuation. This paper is to quantify the underwater communication experiment analysis, the results of the analysis by the Tamshui River as a major underwater communication test area. The main objective of using the nonlinear equalizer(Decision Feedback Equalization,DFE) to eliminate Inter Symbol Interference(ISI) and compensated to the original signal. This paper presents an experimental analysis of shallow water channel measurements for transmission distance from 50m to 190m in the Tamshui River. The linear and nonlinear equalizer are used for BPSK signal frequency 8kHz with a bit rates of 4kbits/s , compared to Gaussian Beam Method(GBM) simulation of shallow water environment to understand the environment of shallow water channel.

Key word : Multipath 、 Binary Phase Shift Keying 、 Decision Feedback Equalization 、 Inter Symbol Interference 、 Gaussian Beam Method

# 目錄

致謝及感言.....	II
中文摘要.....	III
Abstract.....	IV
目錄.....	V
圖表目錄.....	VIII
第一章 緒論.....	1
1.1 背景介紹.....	1
1.2 研究動機.....	1
1.3 研究目的.....	2
1.4 文獻回顧.....	2
1.5 主要結果.....	5
第二章 研究方法.....	7
2.1 運用適應性等化器.....	7
2.1.1 最小均方 LMS 演算法.....	8
2.1.2 判別迴授等化 DFE 演算法.....	9
2.2 多重路徑效應之分析.....	10
2.2.1 運用特徵聲線理論.....	10



2.2.2 運用高斯波束法理論 .....	13
2.3 方法架構 .....	14
第三章 淡水河實驗設計與執行 .....	15
3.1 實驗設置 .....	16
3.2 水槽測試 .....	17
3.3 淡水河實驗設計 .....	18
3.3.1 點對點實驗 .....	18
3.3.2 點對移動載台實驗 .....	19
第四章 模擬與實驗數據分析 .....	20
4.1 模擬水下通道及解調 .....	20
4.1.1 隨機脈衝響應模擬-無編碼之訊號 .....	21
4.1.2 隨機脈衝響應模擬-隨機取樣之訊號 .....	24
4.1.3 高斯波束法理論模擬 .....	27
4.1.3.1 靜態水文環境下 .....	29
4.1.3.2 模擬水文環境加高斯雜訊-1 sequence .....	33
4.1.3.3 模擬水文環境加高斯雜訊-30 sequence .....	39
4.2 淡水河實驗-點對點 .....	42
4.2.1 點對點實驗-1 sequence .....	43
4.2.2 點對點實驗-30 sequence .....	46

4.3 實驗與模擬驗證 .....	49
4.3.1 實驗與模擬驗證-1 sequence .....	49
4.3.2 實驗與模擬驗證-30 sequence .....	50
4.4 淡水河實驗-點對移動載台 .....	51
第五章 結論與未來工作 .....	54
參考文獻.....	57



# 圖目錄

圖 1-1：水下通訊的簡化模型 .....	5
圖 2-1：等化器形式、架構、演算法 .....	7
圖 2-2：LMS 演算法.....	9
圖 2-3：DFE 演算法.....	10
圖 2-4：波陣面與聲線圖示 .....	11
圖 2-5：三條聲線路徑，直接接收、表面及底層反射 .....	13
圖 2-6：每條聲線高斯能量分佈 .....	13
圖 2-7：研究方法流程圖 .....	14
圖 3-1：實驗位置圖(等深線圖由台大宋國士教授提供) .....	15
圖 3-2：儀器組成圖 .....	16
圖 3-3：時間 0.22~0.221 秒收到訊號 .....	17
圖 3-4：(a)解調收到訊號(b)運用線性等化解調(c)運用非線性等化解調.....	17
圖 3-5：均方誤差值線性-x，非線性-o .....	18
圖 3-6：實驗點位圖 .....	19
圖 4-1：模擬訊號經過水下通道的過程 .....	20



圖 4-2：(a)通道為 1 個脈衝響應(b)經通道所得到訊號 .....	21
圖 4-3：通道為 1 個脈衝響應之解調狀況 .....	21
圖 4-4：(a)通道為 2 個脈衝響應(b)經通道所得到訊號 .....	22
圖 4-5：通道為 2 個脈衝響應之解調狀況 .....	22
圖 4-6：經過通道後的訊號加入雜訊 .....	23
圖 4-7：通道為二個脈衝響應加上高斯雜訊之解調狀況 .....	23
圖 4-8：(a)通道為 1 個脈衝響應(b)經通道所得到訊號 .....	24
圖 4-9：通道為 1 個脈衝響應之解調狀況 .....	24
圖 4-10：(a)通道為 2 個脈衝響應(b)經通道所得到訊號 .....	25
圖 4-11：通道為 1 個脈衝響應之解調狀況 .....	25
圖 4-12：經過通道後的訊號加入雜訊 .....	26
圖 4-13：通道為二個脈衝響應加上高斯雜訊之解調狀況 .....	26
圖 4-14：(a)GBM 模擬水下聲場(b)模擬環境的各種參數.....	27
圖 4-15：每段距離的脈衝響應(a)50 公尺(b)100 公尺(c)150 公尺 (d)190 公尺 .....	28
圖 4-16：經過通道所得訊號(a)50 公尺(b)100 公尺(c)150 公尺(d)190 公尺.....	28
圖 4-17：距離 50 公尺靜態環境使用不同等化器的解調 .....	29
圖 4-18：距離 50 公尺模擬靜態環境，均方誤差值線性-x 非線性-o	

.....	29
圖 4-19：距離 100 公尺靜態環境使用不同等化器的解調 .....	30
圖 4-20：距離 100 公尺模擬靜態環境，均方誤差值線性-x 非線性-o .....	30
圖 4-21：距離 150 公尺靜態環境使用不同等化器的解調 .....	31
圖 4-22：距離 150 公尺模擬靜態環境，均方誤差值線性-x 非線性-o .....	31
圖 4-23：距離 190 公尺靜態環境使用不同等化器的解調 .....	32
圖 4-24：距離 150 公尺模擬靜態環境，均方誤差值線性-x 非線性-o .....	32
圖 4-25：經通道加高斯雜訊的訊號(a)50 公尺(b)100 公尺(c)150 公尺(d)190 公尺 .....	33
圖 4-26：距離 50 公尺模擬真實環境使用不同等化器解調 .....	34
圖 4-27：距離 50 公尺真實環境，均方誤差值線性-x 非線性-o..	34
圖 4-28：距離 100 公尺模擬真實環境使用不同等化器解調 .....	34
圖 4-29：距離 100 公尺真實環境，均方誤差值線性-x 非線性-o.	35
圖 4-30：距離 150 公尺模擬真實環境使用不同等化器解調 .....	35
圖 4-31：距離 150 公尺真實環境，均方誤差值線性-x 非線性-o.	35
圖 4-32：距離 190 公尺模擬真實環境使用不同等化器解調 .....	36

圖 4-33：距離 190 公尺真實環境，均方誤差值線性-x 非線性-o.	36
圖 4-34：模擬真實環境配合帶通濾波器(a)50 公尺(b)100 公尺(c)150 公尺(d)190 公尺 .....	37
圖 4-35：距離 50 公尺模擬真實環境配合帶通濾波器，使用不同等化器結果.....	37
圖 4-36：距離 100 公尺模擬真實環境配合帶通濾波器，使用不同等化器結果.....	38
圖 4-37：距離 150 公尺模擬真實環境配合帶通濾波器，使用不同等化器結果.....	38
圖 4-38：距離 190 公尺模擬真實環境配合帶通濾波器，使用不同等化器結果.....	38
圖 4-39：模擬真實環境，均方誤差值線性-x 非線性-o (a)50 公尺 (b)100 公尺(c)150 公尺(d)190 公尺 .....	39
圖 4-40：模擬真實環境配合帶通濾波器(a)50 公尺(b)100 公尺(c)150 公尺(d)190 公尺 .....	40
圖 4-41：距離 50 公尺模擬真實環境配合帶通濾波器，使用不同等化器結果.....	41
圖 4-42：距離 100 公尺模擬真實環境配合帶通濾波器，使用不同等化器結果.....	41



圖 4-43：距離 150 公尺模擬真實環境配合帶通濾波器，使用不同等 化器結果.....	41
圖 4-44：距離 190 公尺模擬真實環境配合帶通濾波器，使用不同等 化器結果.....	42
圖 4-45：模擬真實環境，誤碼率線性-x 非線性-o (a)50 公尺(b)100 公尺(c)150 公尺(d)190 公尺.....	42
圖 4-46：實驗點位圖 .....	43
圖 4-47：接收訊號(a)距離聲源 50 公尺(b) 距離聲源 100 公尺(c) 距 離聲源 150 公尺(d) 距離聲源 190 公尺.....	43
圖 4-48：距離 50 公尺解調狀況，使用不同等化器結果 .....	44
圖 4-49：距離 100 公尺解調狀況，使用不同等化器結果 .....	44
圖 4-50：距離 150 公尺解調狀況，使用不同等化器結果 .....	44
圖 4-51：距離 190 公尺解調狀況，使用不同等化器結果 .....	45
圖 4-52：實驗均方誤差值線性-x，非線性-o(a)50 公尺(b)100 公尺 (c)150 公尺(d)190 公尺.....	45
圖 4-53：接收訊號(1)(2)(3)(4)分別表示為傳輸距離 50 公尺、100 公尺、150 公尺、190 公尺(a)原始訊號(b)經帶通濾波器訊號 ...	46
圖 4-54：距離 50 公尺解調狀況，使用不同等化器結果 .....	47
圖 4-55：距離 100 公尺解調狀況，使用不同等化器結果 .....	47

圖 4-56：距離 150 公尺解調狀況，使用不同等化器結果 ..... 47

圖 4-57：距離 190 公尺解調狀況，使用不同等化器結果 ..... 48

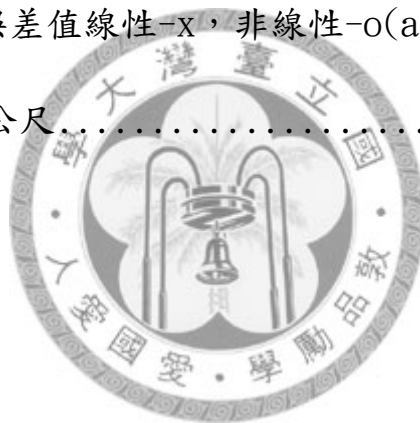
圖 4-58：實驗誤碼率線性-x，非線性-o(a)50 公尺(b)100 公尺(c)150  
公尺(d)190 公尺 ..... 48

圖 4-59：接收訊號(a)距離聲源 50 公尺(b)距離聲源 100 公尺 .. 52

圖 4-60：距離 50 公尺解調狀況，使用不同等化器結果 ..... 52

圖 4-61：距離 100 公尺解調狀況，使用不同等化器結果 ..... 53

圖 4-62：實驗均方誤差值線性-x，非線性-o(a)50 公尺(b)100 公尺  
(c)150 公尺(d)190 公尺 ..... 53



## 表目錄

表 1-1：純同調相位偵測系統 .....	3
表 1-2：差分同調相位偵測系統 .....	3
表 1-3：非同調相位偵測系統 .....	4
表 1-4：已發展的水下通訊系統 .....	4
表 4-1：距離 50 公尺，實驗與模擬錯誤率比對 .....	49
表 4-2：距離 100 公尺，實驗與模擬錯誤率比對 .....	49
表 4-3：距離 150 公尺，實驗與模擬錯誤率比對 .....	50
表 4-4：距離 190 公尺，實驗與模擬錯誤率比對 .....	50
表 4-5：距離 50 公尺，實驗與模擬錯誤率比對 .....	50
表 4-6：距離 100 公尺，實驗與模擬錯誤率比對 .....	51
表 4-7：距離 150 公尺，實驗與模擬錯誤率比對 .....	51
表 4-8：距離 190 公尺，實驗與模擬錯誤率比對 .....	51

# 第一章 緒論

## 1.1 背景介紹

陸上的通訊技術發展快速，對人類的生活型態帶來相當大的變化和幫助，目前空氣中無線通訊技術以達相當成熟的階段。而水下通訊的發展，最初是由於潛艦間需要相互溝通，因此研發水下電話傳遞類比的聲音作為溝通上的工具，用最簡單的類比設計就是將聲音訊號配合類比濾波器作為傳遞的載波訊號(2K~15KHz)，經過傳遞路徑再將訊號作解調還原成類比訊號，有時準確性很差。水下電話也只能點對點之間溝通，且需依靠著人耳及大腦判斷多重干擾的語音訊號來辨別傳遞中的聲音，無法達到良好的通訊品質與效率。至 1960 年代，水下訊號從類比轉至數位訊號開始起步，也初步對訊號及水下傳遞能量的通道有所了解 [1]。然而由於海洋環境複雜，在海洋通道中資料傳輸是仍然非常低，所以提高傳輸率及降低錯誤率仍為水下通訊最主要的問題。數位訊號的發展是以非同調相位作為一開始主要研究方向，因為非同調相位簡單且可靠但面臨最大挑戰是距離愈遠，造成難以克服符間干擾。到 1980 年代，同調相位只運用在深海垂直連結上，一直到 1990 年代早期，很多研究團隊投入同調相位偵測，把同調相位偵測運用在受多重路徑(multipath)[2]影響的通道上，而非同調相位受多重路徑的影響下，頻寬效能有所限制[3]，所以之後通訊研究都選擇同調相位作為偵測系統。為了得到更好的通訊效果，將可調適的等化器應用在受多重路徑[4], [5]影響的訊號上，使得解調結果明確。

## 1.2 研究動機

研究動機為探討淡水河河道水下通訊其成效與可行性，藉由分析結果，將淡水水域作為水下通訊長期測試場所。訊號 BPSK 在淺水海域[6], [7], [8]傳播受通

道多重路徑影響下的符間干擾(Inter-Symbol Interference)[9], [10]與通道快速時變特性，造成訊號相位難以追蹤，為提升水下通訊的品質，將等化技術運用在經過通道所接收的訊號上，使用非線性等化器(DFE)進行補償與追蹤，降低訊號所受到之符間干擾(ISI)，以提高資料傳遞速率及降低錯誤機率[11]。

### 1.3 研究目的

研究目的有三項：一、將河道通道響應函數進行量化分析。二、藉由量化結果，將淡水河定調為主要水下通訊測試場。三、探究水下單一感測器通訊量化之可行性。本研究為研究淺海通道的快速變化與複雜度，先利用 GBM 模擬高頻訊號在地形 Range Dependent 的環境下，靜態的水文環境(Pekeris Waveguide)下傳遞損失的能量，轉換成每一段距離接收訊號的脈衝響應，通道上加入噪音使用通訊上加成性高斯白雜訊 AWGN(Additive white Gaussian noise)輸入訊號與雜訊的比例，即可模擬真實的水下環境，解調之後沒經過等化的星座圖分佈，與不同等化的分佈收斂情況，收斂的好與壞取決字元錯誤率 BER(Bit error rate)，能收斂速度越快越穩定越好。本模擬結果將用來預估及探討實驗結果並作為驗證基礎。淡水河地形深度為 3~14 公尺，潮差 3 公尺、流速 3 節，非常適合淺海環境的通訊實驗與模擬的驗證。由台灣大學工程科學及海洋工程所水下聲學實驗室根據聲線理論發展出高斯波束群法 GBM(Gaussian Beam Model)[12], [13]，利用此程式計算整個聲場環境。

### 1.4 文獻回顧

1960 年代，類比轉為數位化的時間，等化器理論的運用在陸地通訊上，數位訊號的發展將接收系統分為同調相位偵測 (Coherent phase detection) 與非同調相位偵測 (Nocoherent phase detection)，起初一開始是以非同調相位，但面臨傳遞距離的問題，直至 1980 年代，同調訊號偵測用於水下通信，同調相



位分為純同調相位偵測(Pure Coherent phase detection)、差分同調相位偵測(Differentially Coherent detection), 直至 1990 年代, 更多學者投入此研究, 根據 Stojanovic、Kilfoyle、Baggeroer, 將同調偵測系統配合等化器運用可消除受多重路徑的影響(ISI), 不同的等化器所得到的效果不同, 整理專家學者作不一樣的調變方式、資料傳速率、頻寬、傳遞距離、誤碼率等資料(表 1), 也有對差分同調偵測(表 2)及非同調偵測(表 3)所作資料。

主要研究人	調變方式	資料傳速率 (kbps)	頻寬 (kHz)	距離 (km)	誤碼率
Kaya	16QAM	500	125	0.06(深)	$<10^{-7}$
Suzuki	4, 8PSK	20-30	10	3.5(深)	$< 0.0001$
Stojanovic	4, 8PSK、8QAM	0.6-3.0	0.3-1.0	89-203(淺、深)	$<0.01$
Goalic	QPSK	6	3	0.04(淺)	N/A
Labat	QPSK	6	3	4.0(深)	N/A
Tarbit	BPSK	20	20	0.9(淺)	$\sim 0.001$
Jarvis	B, QPSK	1.1-2.2	0.6-2.2	0.5-8.0(淺、深)	$<0.001$
Capellano	BPSK	0.2	0.2	50 (深)	$<0.0001$
Capellano	BPSK	0.2	0.2	50 (深)	$<0.0001$
Jarvis	N/A	0.9-1.8	N/A	4.0(淺)、8.0(深)	$<0.0001$
Freitag	QPSK	1.67, 6.7	2, 10	4.0, 2.0 (淺)	N/A

表 1-1、純同調相位偵測系統(資料來源：Baggeroer[14])

主要研究人	資料傳速率 (bps)	頻寬 (kHz)	頻寬效益	距離 (km)	誤碼率
Mackelburg	4800	8	0.6	4.8(深)	$10^{-6}$
Olsen	2000	2	1.0	6.0(深)	$< 0.001$
Mackelburg	4800	6	0.8	10.0(模擬)	N/A
Howe	1600	10	0.16	0.1(淺)	$< 0.001$
Fischer	625	10	0.06	N/A	N/A
Suzuki	16000	8	2.0	6.5(深)	0.0001
Jones	20000	10	2.0	1.0(深)	0.01

表 1-2、差分同調相位偵測系統(資料來源：Baggeroer[14])

主要研究人	資料傳速率(bps)	頻寬(Hz)	頻寬效益	距離(km)	誤碼率
Morgera	0.5	50	0.01	N/A	N/A
Garrod	40	N/A	N/A	4.0(淺)	< 0.01
Catipovic	1200	5000	0.24	3.0(淺)	<0.01
Jarvis	<2.3	6000	<0.0004	2.0(深)	N/A
Coates	75	1500	0.05	5.0(深)	~0.001
Hill	360	5500	0.07	6.0(深)	N/A
Freitag	2500	20000	0.13	3.7(深)	~0.0001
Freitag	600	5000	0.12	2.9(深)	0.001
Mackelburg	1250	10000	0.13	2.0(深)	N/A
Scussel	2400	5120	0.47	10.0(模擬)	N/A

表 1-3、非同調相位偵測系統(資料來源：Baggeroer[14])

水下通訊訊號應用分為四種，控制、遙測、語音、及影像，這些應用都有其傳輸量與誤碼率的要求或限制，控制要求精準度高，遙測錯誤率低，語音辨識容忍錯誤機率較高，影像傳輸速率及精確度都是要求最高，才能正確傳輸資訊影像 [14]

研發單位	應用	通道	調變方式	ISI補償	頻寬(kHz)	資料傳速率(kbps)
Oki Elec. Ind. Comp.	機器人命令/控制	短距離 (60m) 淺水	16-QAM	LE (LMS)	1000	500
JANSTEC	影像	垂直 (6500m)	4-DPSK	LE (LMS)	20	16
IFREMER/ORCA	影像和資料	垂直 (2000m)	2-DPSK	沒有	53	19.2
ENST-Br. / IFREMER	數位語音	測試水槽	4-DPSK	DFE (LMS)	沒有	6
Micrilor	遙測	中距離 (1km) 淺水	2-DPSK	DS-SS	30/100	0.6
WHOI/Datasonics	遙測	垂直和水平	16*4-FSK	沒有	15	1.2
WHOI	遙測	冰下 淺水	QPSK	DFE (RLS)	15	5

表 1-4、已發展的水下通訊系統(資料來源：Baggeroer[14])

對於編碼有各種形式，二進碼(Binary Code)、十進位之二進碼(Binary Code of Decimal)、格雷碼(Gray Code)、ASCII(American Standard Code for

Information Interchange)等，怎樣的編碼方式在水下通道才能得到傳輸率及錯誤率低，對錯誤控制碼(Error-Control Coding)也有很多編碼形式，線性區塊碼(Linear Block Codes)、迴旋碼(Convolutional Codes)、循環碼(Cyclic Codes)等，錯誤控制碼要考量的因素有二：訊號傳輸功率及通道頻寬，錯誤更正碼是多加冗餘(redundancy)位元在編碼中表示的增加傳輸頻寬，會提高品質降低訊息傳送的速率，要取得兩者之間的平衡，能有效的運用頻寬與功率[15],[16]。

以上水下通訊的每個環節(圖 1-1)都會影響到通訊的品質速率，那如何衡量達到最好的傳輸率及降低錯誤率，有待更多的試驗。關於在淺水海域作水下通訊相關研究，舉例來說，1993 年 8 月 Catipovic 等人在 Woods Hole 港灣所作淺水實驗，發送訊號為同調 BPSK 頻率 15KHz 頻寬 6K~21KHz，傳輸距離 750 公尺水深為 18 公尺，運用非線性等化 DFE 解調[17]。另一例，1999 年 4~5 月 Gi jzen 等人在靠近荷蘭沿岸的北海所作淺海通訊實驗，訊號為同調 BPSK 頻率為 6KHz 頻寬 2K~10KHz，傳輸距離 1~10 公里，運用線性等化 LMS 解調[11]。

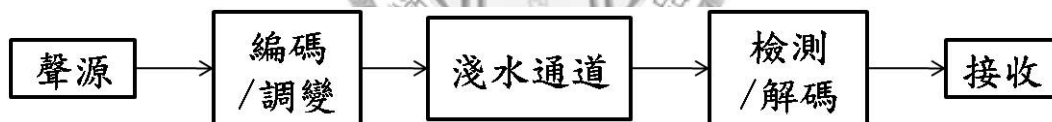


圖 1-1、水下通訊的簡化模型

## 1-5 主要結果

淡水河水下通訊實驗得到量化分析及可行性，把淡水河域作為主要通訊的測試場。使用等化器的最主要目的，消除通道的雜訊及干擾效應，回復到理想的訊號位元。在淡水河作水下通訊實驗，此河域底質為泥底，利用線性與非線性等化器處理頻率 8kHz 資料傳輸速率每秒 4K 位元之二位元相位鍵移(BPSK)訊號，分析該訊號經過短距離(190 公尺)之淺水環境通訊傳播成效，並測試移動式的通訊系統會受噪音及傳遞的距離的影響，再將實驗收到的訊號與電腦模擬淺水環境相

比下，了解整個海洋通道環境的影響情況，以利將等化器作適當的調整，達到收到海洋通訊成效最好及誤碼率降到最低之效果。當等化器搭配著帶通濾波器解調，取 BPSK 主要頻率 8KHz 頻寬 4KHz 的訊號，將帶通濾波器設定在 6KHz~10KHz，運用濾波器會消除夾雜不必要的訊號，使解調收斂明顯及平穩，收斂越平穩在星座圖上收斂的訊號位元會聚集更集中；藉由單一發射接收儀器，發射與接收端皆能正常發射及接收通道的訊號，而不影響訊號的量測及品質。

主要結果得到訊號 BPSK 長度為 30 sequence 時間為 3.84 秒，傳輸率每秒 4K 位元，經過非線性等化解調，錯誤率降至  $2 \times 10^{-4}$  與通訊遙測訊號需求相比，遙測訊號傳輸率需求為每秒 1-10K 位元，錯誤率為  $10^{-3} \sim 10^{-4}$ ，明顯地符合作水下通訊條件，淡水河確實適合作為長期通訊的測試場。在模擬上與實驗相比，長度為 1 sequence 線性錯誤率皆在  $10^{-2}$  之間，非線性錯誤率皆在  $10^{-3}$  之間，模擬與實驗吻合，但當訊號長度為 30 sequence 時，模擬與訊號錯誤率相差很大，針對實驗訊號觀察得知，訊號會受時變性有大小變化，而模擬上不會有此變化，模擬錯誤率遠低於實驗錯誤率，模擬水下通道能有待進一步研究。

## 第二章 研究方法

本章針對水下通訊運用研究方法解決通道上會遇到的問題。就通訊而言，通道造成的嚴重符間干擾，導致影響訊號字元，運用等化器解決符間干擾的問題，所以運用兩種等化器，一為線性 LMS，另一為非線性 DFE；就通道脈衝響應而言，需將通道脈衝響應有所研究，所以運用特徵聲線理論及高斯波束法理論，模擬此通道脈衝響應，預估淡水河通道所面臨通訊問題。

### 2.1 運用適應性等化器

訊號會受通道影響，導致發送字元散佈在星座圖，使用等化器最主要目的是消除通道的 ISI，使接收字元恢復到原先的訊號位元。等化器的性能取決於運用的演算法，不同的演算法各自有所優缺點。等化器[18]分為形式、架構與演算法，形式上分為線性、非線性，架構上分為橫向(Transversal)[19], [20], [21]、格子(Lattice)，演算法有很多種，最常用的有兩種，一種是最小均方演算法(Least-Mean-Square, LMS)，另一種為遞迴最小平方演算法(Recursive Least Square, RLS)(圖 2-1)。

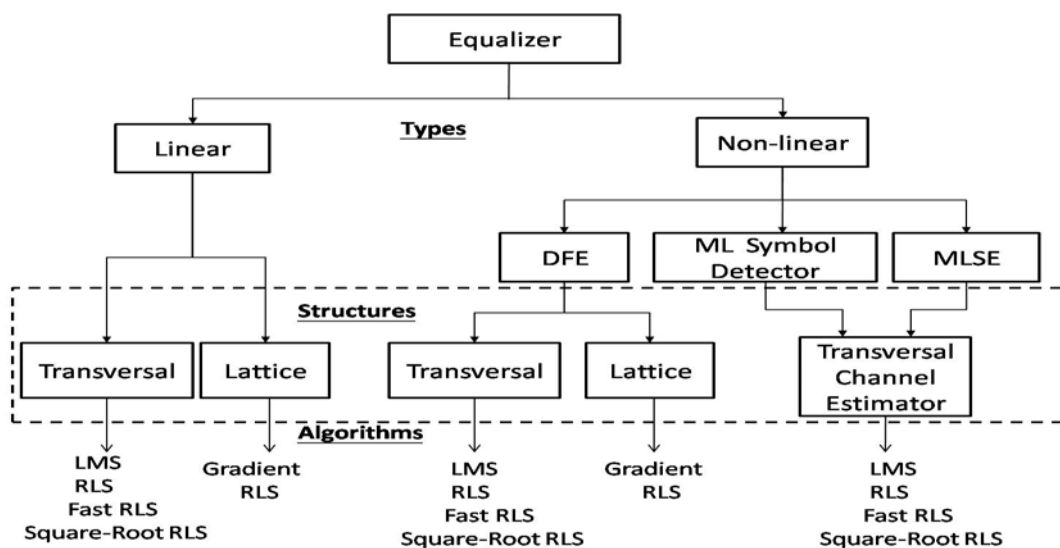


圖 2-1、等化器形式、架構、演算法[17]

等化器最主要分為兩部分，一是訓練模式，另一種是判斷模式。先經過訓練模式在經過判斷模式，調整其訊號位元。等化器使用的效能好與壞需配合均方誤差 MSE 與錯誤率 BER，均方誤差或錯誤率越小代表收斂狀況好，均方誤差 MSE(mean-square-error) [15], [16], [18]分析，水平軸代表運算資料筆數，垂直軸代表收斂的情況；錯誤率 BER (Bit-error-rate) [15], [16], [18]分析，水平軸代表運算資料筆數，垂直軸代表字元錯誤率的大小。有迴授比無迴授的字元錯誤率低，來自於與原始訊號作誤差調整，換句話說，等化器解決受通道符間干擾 ISI 是很重要的環節，所以適當的選擇演算法是必要的。

### 2.1.1 最小均方 LMS 演算法

LMS 演算法是利用梯度下降原理調整等化器權重 $W(n)$ ，並使字元收斂，降低錯誤率 BER(Bit-error-rate)。經由水下通道收到的訊號為 $u(n)$ ，將收到訊號再經由等化器含有的階數作為修正，得到的輸出 $y(n)$ 與原始的訊號位元  $d(n)$ ，此  $d(n)$ 序列稱為訓練序列(Training Sequence)，修正其誤差訊號  $e(n)$ ，將每次所得誤差訊號與下一個訊號 $u(n+1)$ 再做修正，其中  $\mu$  是決定收斂的參數 (convergence factor)，控制收斂速度與穩定(圖 2-2)， $\mu$  為變異數(covariance)的特徵值(eigenvalue)， $\mu$  太大會導致發散，太小使收斂速度降低。

由 2.1 式~2.4 式表示整個 LMS 演算所計算的方式

等化器輸出 $y(n)$ ：

$$y(n) = W^H(n-1)u(n) \quad (2.1)$$

誤差訊號 $e(n)$ ：

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2.2)$$

權重向量 $W(n)$ ：

$$W(n) = W(n-1) + \mu e(n)u^*(n) \quad (2.3)$$

定義均方誤差(MSE)  $\xi(n)$ :

$$\xi(n) \equiv E[e^2(n)] \quad (2.4)$$

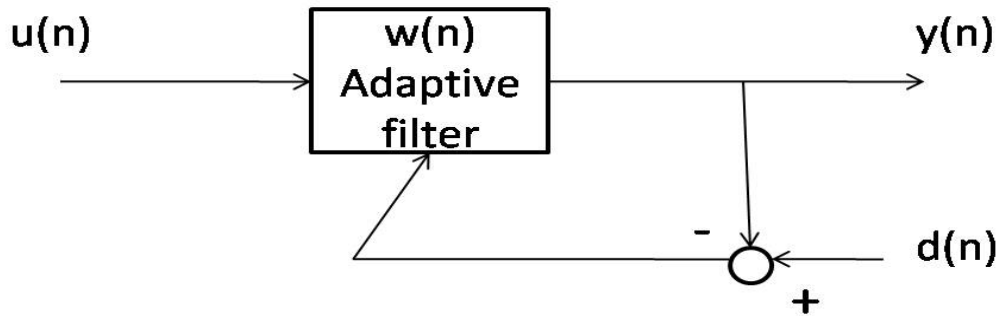


圖 2-2、LMS 演算法

LMS 演算法只能運用在靜態水槽的多重路徑，無法計算嚴重的多重路徑，加上其收斂速度過慢，無法得到好的效能。需使用非線性 DFE 演算法，運用在複雜的淺水通訊通道。

### 2.1.2 判別迴授等化 DFE 演算法

DFE 演算法是將通道解調得到的訊號當成輸入，經過兩部分的調整，一是迴前(feedforward)濾波的部分，另一個是迴授(feedback)濾波的部分，此兩部分濾波方式都是調整其權重值 $W(n)$ ，使訊號位元收斂，補償受通道影響的訊號位元，與線性 LMS 演算法不同之處在於有迴前(feedforward)這部分。

訊號先經由迴前(feedforward)作調整，再經過判別方式(Decision)決定其值，判斷如果無法迴授到原先的-1、+1 的訊號位元，再經由迴授控制器作其調整，使回復到原先的訊號位元(圖 2-3)，迴授的階數越多並不表示收斂會更好，只能收斂到一定的程度，之後取決於系統的要求，是需要計算精準度還是要收斂效果有限但計算時間較快速。非線性的等化迴授雖比線性好，多了一個迴前機制表示，相對地時間與電力上消耗越多，對於發展水下通訊的即時性是一大的阻礙，計算的時間比收到訊號之間的時間還久，而且每次接收訊號又要經過一次的等化器調整其權重值，重新計算其值。

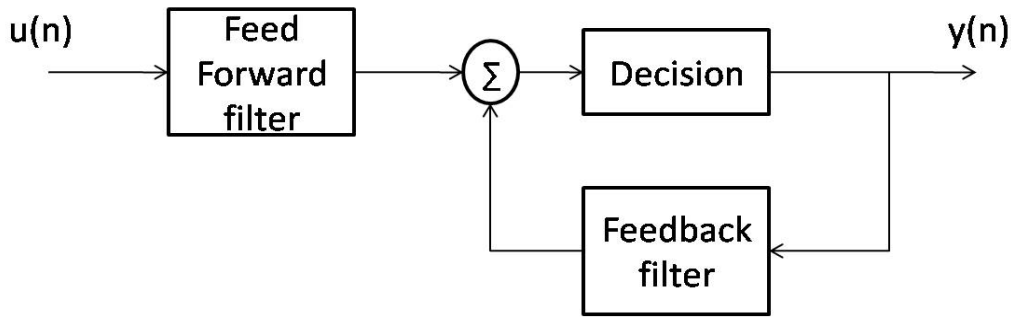


圖 2-3、DFE 演算法

## 2.2 多重路徑效應之分析

通道為通訊最主要面臨的最大問題，在通訊上只討論硬體或訊號編碼等都是無用，對通道不了解肯定無法作通訊，把淡水河作為測試場，要先將通道進行量化，針對通道有所了解，進一步進行水下通訊研究。陸地上要了解水下通訊，更是要對通道有所理解，原因是因為陸地上是利用電磁波(Electromagnetic Wave, EM Wave)通訊，水下是用聲波(Acoustic Wave)藉由介質傳遞能量，介質會受海水的溫度、鹽度、壓力、密度等因素影響其傳遞，針對不同區域的水文環境要有所了解，如深水、淺水環境，才能知道聲能的分佈情況。

### 2.2.1 運用特徵聲線理論

聲能的傳遞受海平面、底床的吸收、散射、繞射等影響下，聲場分佈就有所不同。運用特徵聲線理論模擬水下通訊的通道，了解在不同接收深度會收到的能量大小及形式。聲能的分佈是依據聲波方程式(Wave equation)或赫姆霍茲方程式(Helmholtz equation)推導[22][23]，了解空間上的聲能分佈狀況。

$$\text{Wave Equation: } \nabla^2 P(r, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(r, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (2.5)$$

$$\text{Helmholtz equation: } \nabla^2 P(r, t) - k^2 \frac{\partial^2 p(r, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (2.6)$$

特徵聲線理論是形容聲波傳遞的方式之一，波相位相等所組成的面稱為波陣面(Wavefront)，波陣面的法線向量為空間上聲線(Ray)路徑傳遞的能量分佈。針對



方向性聲源，聲線可以針對不同角度而有傳遞能量的路徑，結合每條路徑所傳遞的能量視為接收端的聲壓值。

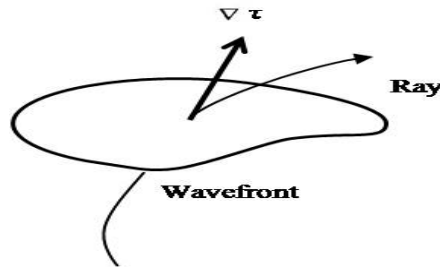


圖 2-4、波陣面與聲線圖示

聲波方程式通解：

$$P(\vec{x}, t) = A(\vec{x})e^{i\omega[t - \tau(\vec{x})]} \quad (2.7)$$

$\vec{x}$  為空間向量， $\omega[t - \tau(\vec{x})]$  為聲波相位，其中  $\omega$  為頻率，根據聲線理論波相位相等所組成的面：

$$t - \tau(\vec{x}) = \text{constant} \quad (2.8)$$

曲面的法線向量：

$$\vec{e}_t = \frac{\nabla \tau}{|\nabla \tau|} \quad (2.9)$$

將(2.7)代入聲波方程式(2.5)，整理成聲波方程式

$$\left( \nabla^2 A - \omega^2 A |\nabla \tau|^2 + \frac{\omega^2}{c^2} A \right) - i(2\omega \nabla A \cdot \nabla \tau + \omega A \nabla^2 \tau) = 0 \quad (2.10)$$

在(2.9)式中，實部與虛部必須為零，方程式使成立

$$\text{實部方程式為：} \quad \frac{\nabla^2 A}{\omega^2} - A |\nabla \tau|^2 + \frac{A}{c^2} = 0 \quad (2.11)$$

$$\text{虛部方程式為：} \quad 2\omega \nabla A \cdot \nabla \tau + \omega A \nabla^2 \tau = 0 \quad (2.12)$$

考慮高頻的情況，(2.10)式簡化成：

$$|\nabla \tau| = \frac{1}{c} \quad (2.13)$$

(2.13)式稱為 eikonal equation。

使用虛部方程式(2.12)推導聲壓的振幅 $A(\vec{x})$

使用 $P(\vec{x})$ 取代 $A(\vec{x})$ ：

$$2\nabla P \cdot \nabla \tau + P\nabla^2 \tau = 0 \quad (2.14)$$

$$\because \nabla P \cdot \nabla \tau = \nabla P \cdot \vec{e}_t |\nabla \tau| = \frac{1}{c} \frac{\partial P}{\partial s} \quad (2.15)$$

將(2.15)代入(2.14)  $\frac{2}{P} \frac{\partial P}{\partial s} + c\nabla^2 \tau = 0$

$$\Rightarrow \frac{\partial}{\partial s} (\ln P^2) + c\nabla^2 \tau = 0 \quad (2.16)$$

聲線管(ray tube)的體積分方程式

$$\because \int_V (\nabla^2 \tau) dV = \int_A (\nabla \tau \cdot \vec{n}) dA \quad (2.17)$$

推導出

$$c\nabla^2 \tau = \frac{\partial}{\partial s} \left( \ln \frac{A}{c} \right) \quad (2.18)$$

將(2.18)代入(2.16)  $\frac{\partial}{\partial s} (\ln P^2) + \frac{\partial}{\partial s} \left( \ln \frac{A}{c} \right) = 0$

$$\Rightarrow \frac{\partial}{\partial s} \left( \ln \frac{P^2 A}{c} \right) = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{P^2 A}{c} = \text{constant}$$

聲音強度(sound intensity)  $I = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho_0 c}$

eikonal equation 表示聲線軌跡方向，隨著空間上聲速大小而有方向變化，隨聲線管流量面積  $A$  與聲速  $C$  可以計算出聲壓振幅  $P$ 。水下通道是快速變化又複雜的通道，以簡單的三條聲線路徑模擬水下通道的脈衝響應，模擬聲源端直接到接收端的最短距離、訊號經過底床及海平面反射所接收的訊號，此三條聲線路徑是以聲源與接收在同一深度位置，聲源直接傳遞與發射聲線角度為 45 度經海表面及底床所收到的訊號(圖 2-5)，因空間上傳遞路徑長短，接收端的訊號能表示時間上延遲所接收聲壓值。

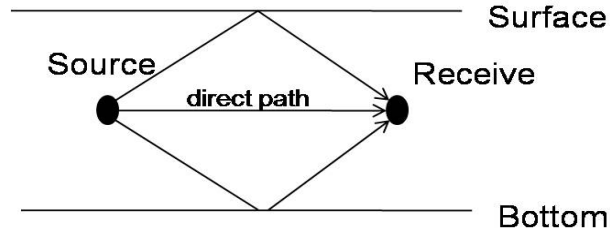


圖 2-5、三條聲線路徑，直接接收、表面及底層反射

## 2.2.2 運用高斯波束法理論

使用高斯波束法主要是利用聲線理論傳遞能量，以高斯分佈形式傳遞能量(圖 2-6)，在實部方程式(2.11)中，仍為高頻簡化為(2.13)式，在虛部方程式能量以高斯波束傳遞，可計算受環境深度距離變化之聲場(Range Dependent)。與特徵聲線理論差別在於可以處理聲線管中的奇異點(singular)，此奇異點區域稱為聲線集結區(caustics)，並能有效計算在聲波陰影區(shadow zone)內的能量損耗[24], [25]。利用 GBM 程式[12]輸入聲源的發射方向角度、頻率、地形資料、水中聲速剖面、密度及底質的聲速剖面、密度、吸收係數等值，得到為頻率上複數形式，用反傅立列轉換(Inverse Fourier transform)成時域上的聲壓值，每個頻率計算整個環境聲場值，將計算的頻率視為頻寬，舉例說明：中心頻率為 9KHz，計算 8KHz~10KHz 的聲場，頻寬為 2 KHz。此環境聲場視為通道的脈衝響應，接收端與聲源水平距離為  $r$  公尺，深度為  $z$  公尺，此接收端的脈衝響應既為  $P(r, z)$ ，與特徵聲線理論只計算幾個簡單的路徑傳遞而言，高斯波束法理論模擬水下通道準確性高。

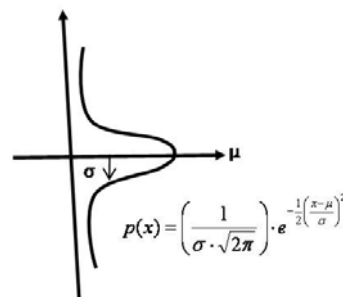


圖 2-6、每條聲線高斯能量分佈

## 2.3 方法架構

聲源訊號為 BPSK 的  $\sin(2\pi fct)$  與  $\sin(2\pi fct + \pi)$ ，共為 512 個字元，-1、1 各為 256 個字元，將編排訊號分為兩種，一為規律性-1、1 交換排列，另一為隨機取樣排列，經過水下通道而接收到的訊號，再把接收訊號經過 I 通道( $\sin(2\pi fct)$ )、Q 通道( $\cos(2\pi fct)$ )的乘積，理論上可正確分佈在星座圖上的 $\pm 1$ 字元上，實際上運用高斯波束法模擬水下通道，經通道所接受的訊號變得很複雜，導致訊號位元會廣泛分佈在-1、1 字元，把夾雜的訊號經過帶通濾波器(bandpass filter)過濾後保留主要訊號，再經由 I 通道(Ph1)、Q 通道(Ph2)成為複數形式，把分散在星座圖上運用等化器處理，使訊號回復到 $\pm 1$ 字元(圖 2-7)，此適應性等化是很重要的環節，否則無法作水下通訊研究。通常 DFE 會與 PLL(phase-locked loop)一起使用，PLL 有快速處理相位偏移的能力。

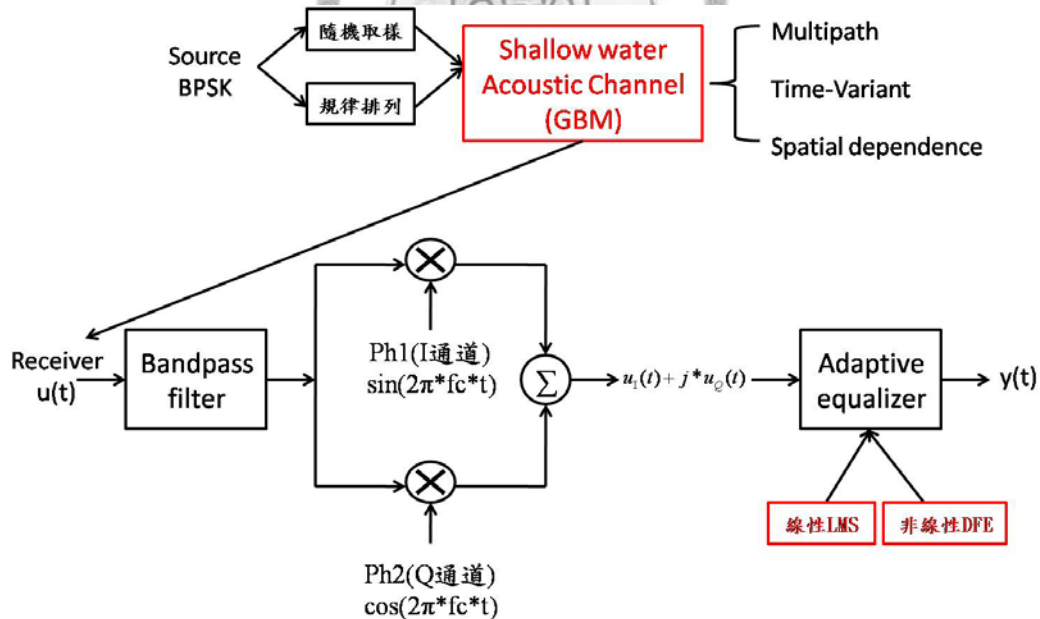


圖 2-7、研究方法流程圖

### 第三章 淡水河實驗設計與執行

選擇淺水海域作實驗的場所主要目的是把淡水河域作為測試場，作為測試場之前得進行水下通訊實驗量化研究及探究其成效與可適性。淡水河域是經由大漢溪、新店溪、基隆河、景美溪等支流所組成的河域，此實驗場所在基隆河與淡水河交界處，地點位於社子島上的台北海洋技術學院設置碼頭，利用該校提供的小艇當作移動載台，此水域水深3~14公尺底層多為泥底(圖3-1)，根據水利處淡水海測站的潮汐觀察結果顯示，淡水河口以半日潮為主，每日會有兩次的高低潮，夏秋之際水位較高、水位差較大；冬春之際水位較低、水位差較小。平均潮位為0.03公尺，平均潮差為1.93公尺，大潮時的潮差為2.89公尺；此地點與淡水河潮差幾乎相同，只延遲半小時[26]。

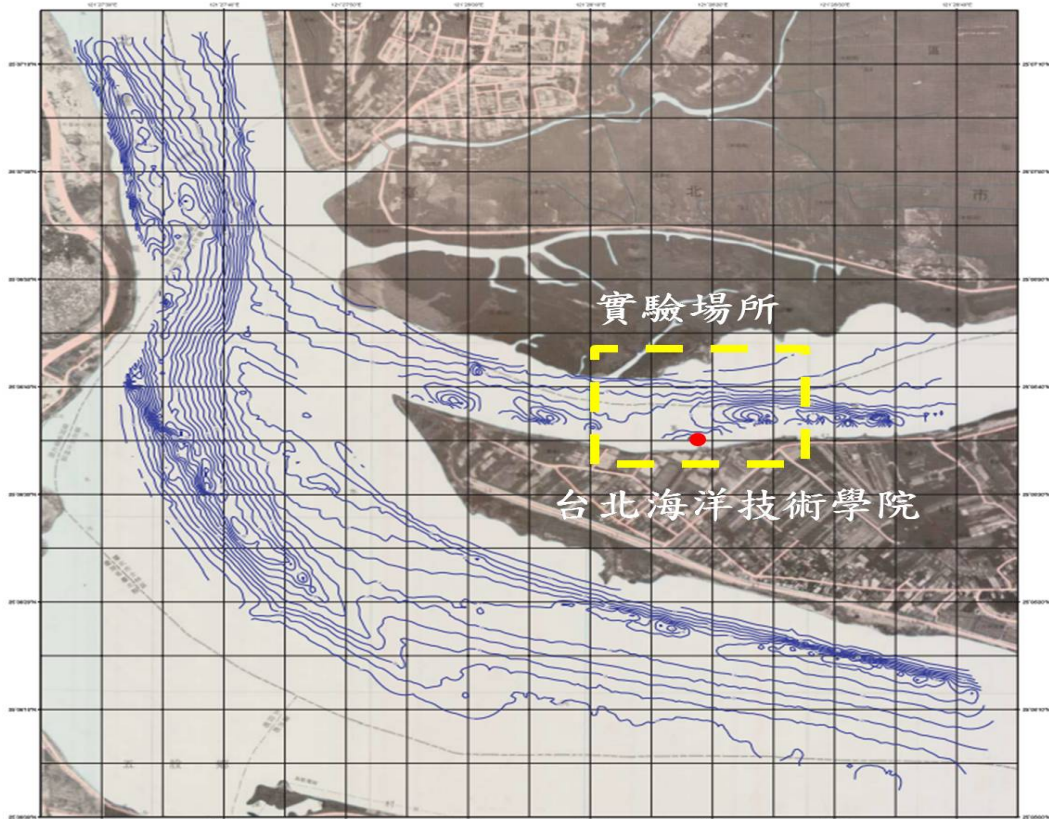


圖 3-1、實驗位置圖(等深線圖由台大宋國士教授提供[26])

### 3.1 實驗設置

此次水下通訊實驗在漲潮時段發射 BPSK 訊號，訊號形式載波頻率為  $f_c = 8k$ 、取樣頻率為  $f_s = 96k$  (配合紀錄儀器 MR-1000 的格式)，兩種不同相位的訊號分別為  $\sin(2\pi f_c t)$  代表位元 1、 $\sin(2\pi f_c t + \pi)$  代表位元 -1，電壓振幅為  $\pm 1V$  所組成，發送隨機取樣的訊號 -1、1，-1、1 各為 256 字元，bit rate 4000 bit/s，分別發送 BPSK 訊號為 1sequence、30sequence，訊號 1sequence 時間為 0.128 秒，訊號 30sequence 時間為 3.84 秒。

實驗儀器分為聲源端與接收端，聲源端為電腦、TECHRON5507 功率放大器、J9，接收端為 B&K-8105 水下麥克風、Charge Amplifier 接收放大器、MR-1000 紀錄器(儲存 WAVE 檔，取樣頻率 48K、96K、192KHz 等格式，選擇 96K)，此接收端完全由電池提供電力，還有一組量測地形的儀器 Humminbird Sonar600。聲源訊號經由 Matlab 程式寫成的 wav 檔，由電腦播放程式發送聲音訊號，將聲源線接 BNC 訊號線至 TECHRON5507 功率放大器放大訊號，再接聲納 J9 把電能轉換成聲能發出訊號，訊號經過水下通道傳遞能量，由接收端 B&K 8105 水下麥克風接收訊號，將聲能轉換成電能再經 Charge Amplifier 2635(放大器)放大電能，在經由 MR-1000 將電能轉換成聲能記錄成 wave 聲音檔(圖 3-2)。

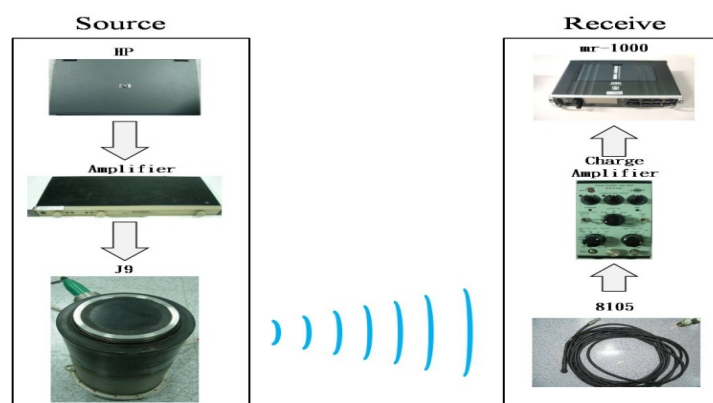


圖 3-2、儀器組成圖(左列為聲源端，分別為電腦、放大器、J9，右列為接收端，分別為 B&K8105、放大器、記錄器)

## 3.2 水槽測試

水槽作測試實驗，水槽長 4 公尺、寬 3 公尺、高 1.88 公尺，將聲源端與接收端固定，相距為 1 公尺接收通訊訊號，經水槽通道配合帶通濾波器明顯可以得到接收訊號(圖 3-3)，水槽有邊界(boundary)效應導致訊號受反射及迴響影響，接收字元也因此受影響，當把接收訊號解調之後，星座圖上已經受環境影響散開成圓形(圖 3-4(a))，經過線性與非線性等化結果，確實明顯在 $\pm 1$  訊號字元作收斂(圖 3-4(b)(c))，在均方誤差值上，線性字元 250~300 個之間增加錯誤率，與非線性相比錯誤率高，非線性有 3 個錯誤字元，線性則有 16 個錯誤字元(圖 3-5 線性-x，非線性-o)。水槽環境會影響通訊品質，複雜淺水環境受到環境影響因素更多，所以運用等化器是通訊解調的重要關鍵之一。

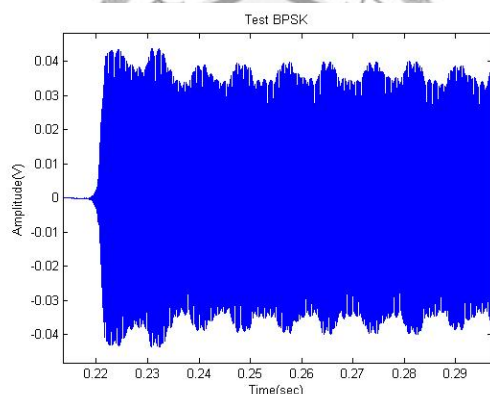


圖 3-3、時間 0.22~0.221 秒收到訊號

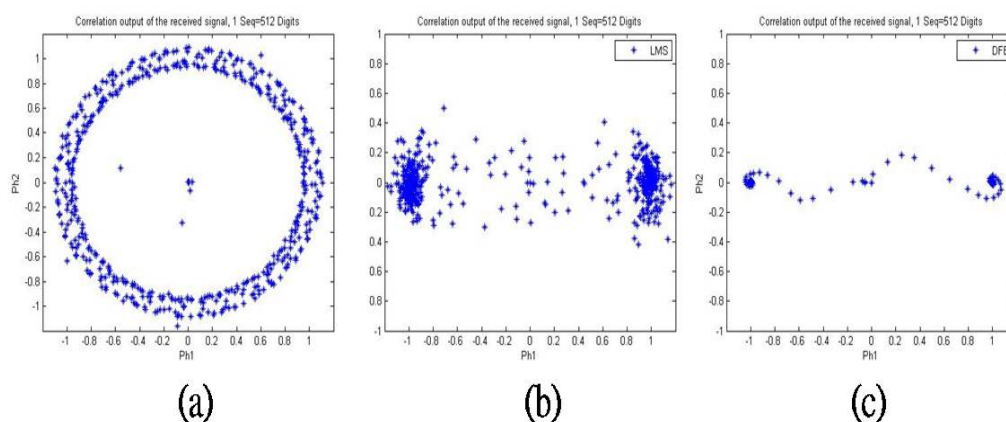


圖 3-4、(a)解調收到訊號(b)運用線性等化解調(c)運用非線性等化解調

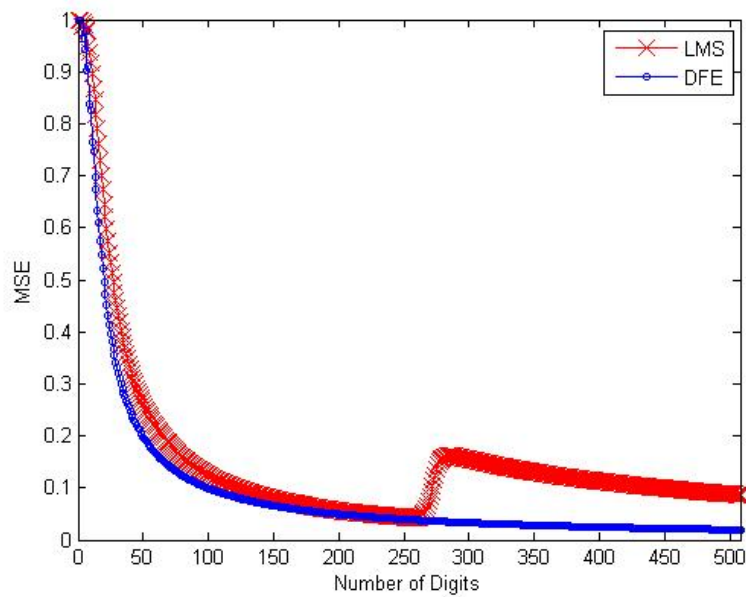


圖 3-5、均方誤差值線性-x，非線性-o

### 3.3 淡水河實驗

在儀器上接收端為電池提供電力，聲源端需要消耗很大能量，接上穩定交流電提供聲源端電壓。基於聲源端需要能源，將聲源固定於碼頭上，接收端電力由電池供電，可作為點對點、點對移動載台的通訊研究；移動載台對移動載台通訊需解決聲源端電力問題，才能進行此項實驗。

#### 3.3.1 點對點實驗

碼頭為聲源佈放位置以 0 點為點位，接收端在移動載台上，作點對點的通訊實驗，分別發送 1 sequence、30 sequence 訊號，1 sequence 為 512 個字元、30 sequence 為 15360 個字元，本實驗時間為漲潮時期，流速有 3 節，作一條測線分別在 50、100、150、190 公尺量測通訊訊號，點位位置為 A1~A4 點（東經  $121^{\circ}28'18.9944''$ ，北緯  $25^{\circ}06'36'' \sim 25^{\circ}06'42.0012''$ ），此點位底層深度為 3~7 公尺(圖 3-6)，由台大宋國士教授量測淡水河環境底層深度，配合 Humminbird Sonar600 儀器，每實驗點位再作一次量測，藉由 Tbits 儀器測得水溫為 19 度，



將聲源與接收麥克風放置水深 2 公尺作發射與接收端點對點的通訊實驗。

### 3.3.2 點對移動載台實驗

研究點對移動載台的通訊實驗，圖 3-6 聲源 0 點為圓心，以距離 50 公尺、100 公尺(圖 3-6，0 點至 A1、A2 點距離)為半徑，作移動載台實驗，載台移動速度為 5 節，接收訊號是否有影響，明顯受移動載台的馬達噪音所影響，仍可正常收到訊號但訊號不明顯。

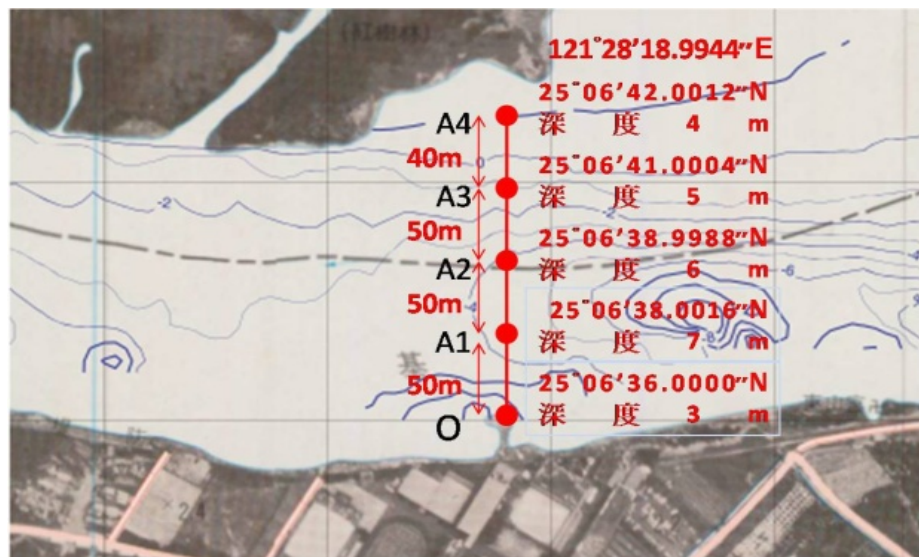


圖 3-6、實驗點位圖 (O 點為聲源點位，A1~A4 為接收點位)

## 第四章 模擬與實驗數據分析

本章總共分四部份，第一部份模擬水下通道及解調，先針對隨機脈衝響應模擬兩種情況訊號，一為無編碼之訊號，另一為隨機取樣之訊號，對兩種訊號作解調的差異比較，之後運用高斯波束法理論模擬水下通道，先對靜態環境下作解調，接著對靜態環境加高斯雜訊作解調，訊號長度分為兩種(1)0.128 秒(1 sequence)之解調，運用均方誤差值看其收斂情形，(2)3.84 秒(30 sequence)之解調狀況，用錯誤率觀察每增加一個 sequence 所出現錯誤情況。第二部份為淡水河點對點實驗分析，針對兩種訊號長度，傳輸距離分別為 50、100、150、190 公尺，將每個距離接收到訊號作解調、均方誤差及錯誤率分析。第三部份將模擬與量化實驗數據作驗證，利用線性等化與非線性等化解調，呈現錯誤率值相比。第四部分是淡水河點對移動載台實驗，仍為資料分析，訊號長度為 1 sequence，傳輸距離為 50、100 公尺，將使用與未使用帶通濾波器作解調比較。

### 4.1 模擬水下通道及解調

聲能的傳播是經由聲線軌跡傳遞能量所得到的通道脈衝響應，而模擬真實水下環境通道，是將發射訊號當成輸入訊號，經過通道脈衝響應(多重路徑效應)加入加成性高斯白雜訊模擬出經通道後的輸出訊號(圖 4-1)[28]。

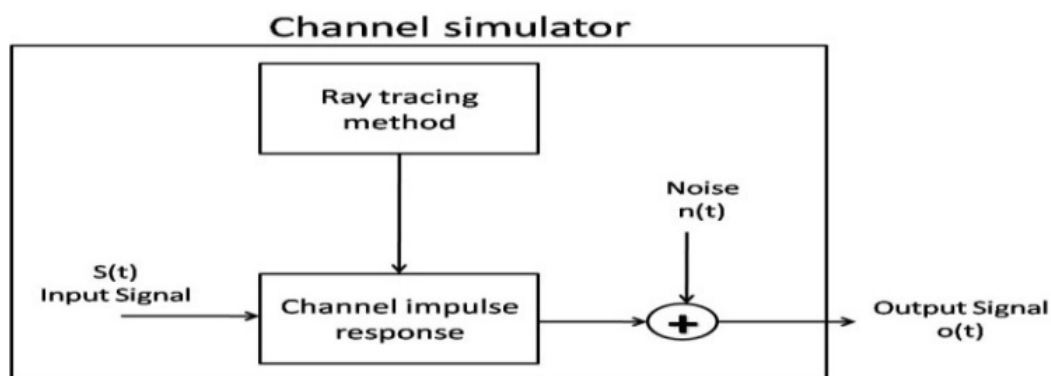


圖 4-1、模擬訊號經過水下通道的過程[28]

### 4.1.1 隨機脈衝響應模擬-無編碼之訊號

訊號以-1、1 規律排列成 512 個字元，模擬聲源與接收的最短距離以一個脈衝響應表示通道(圖 4-2(a))，當訊號經過此通道所受到的變化，明顯沒受到影響仍是原先的訊號(圖 4-2(b))，將此接收訊號經過解調，解調可見到 512 個字元分佈訊號位在 $\pm 1$ 上(圖 4-3)。訊號沒受一個脈衝響應影響，理當解調沒受影響，確實解調在 $\pm 1$ 上。當有一個通道脈衝響應，通道解調狀況良好，不需使用等化器處理。

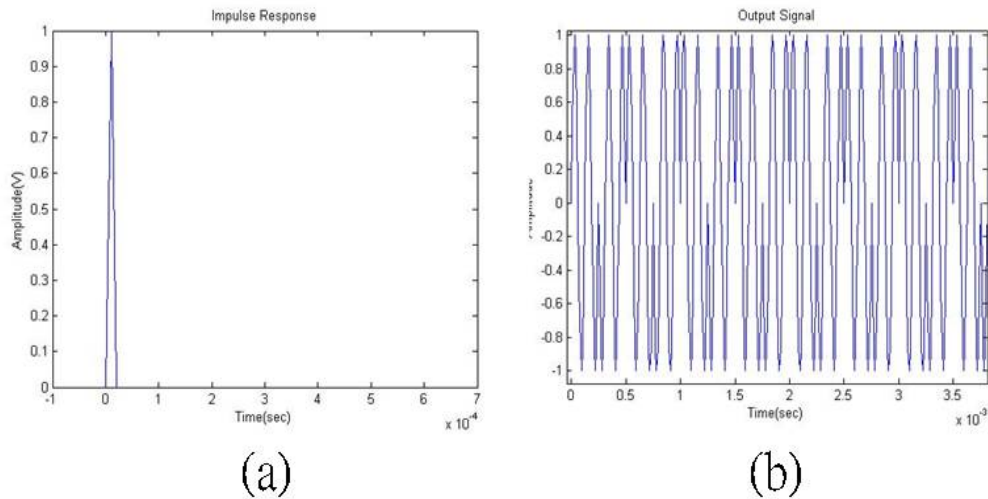


圖 4-2、(a)通道為 1 個脈衝響應(b)經通道所得到訊號

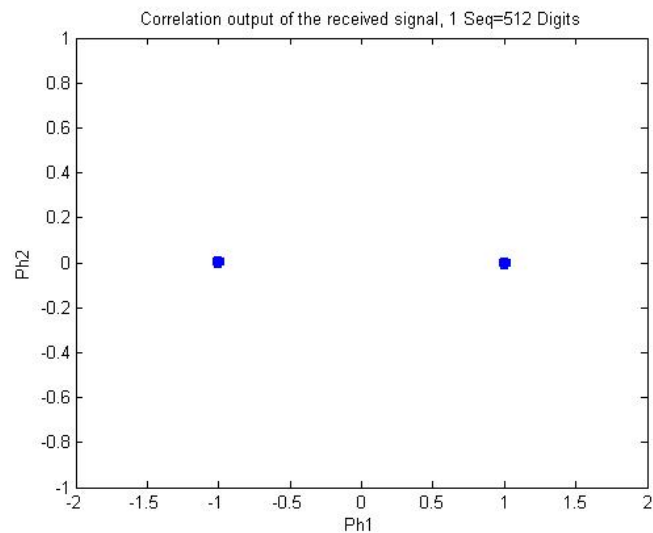


圖 4-3、通道為一個脈衝響應之解調狀況

模擬二個脈衝響應作為通道響應，第一個脈衝響應為接收端第一時間收到的訊號，第二個脈衝響應受環境影響(距離增加及訊號衰減等因素)而收到延遲訊號(圖 4-4(a))，受到兩個脈衝響應影響，原先訊號振幅從 $\pm 1V$ 變成 $\pm 0.6V$ 、 $\pm 1V$ 、 $\pm 1.4V$ (圖 4-4(b))，解調解出 $-1$ 、 $1$ 及 $-0.87$ 、 $\pm 1.22$ 字元上，字元多為 $\pm 1$ ，只有少數字元為 $-0.87$ 、 $\pm 1.22$ (圖 4-5(a))。檢視解調狀況，當解調狀況好不需等化器作處理，解調狀況不好則需運用等化器作運算。通道多一個脈衝響應，得到的訊號就已經有所不同，了解水下通道是重要的環節之一。

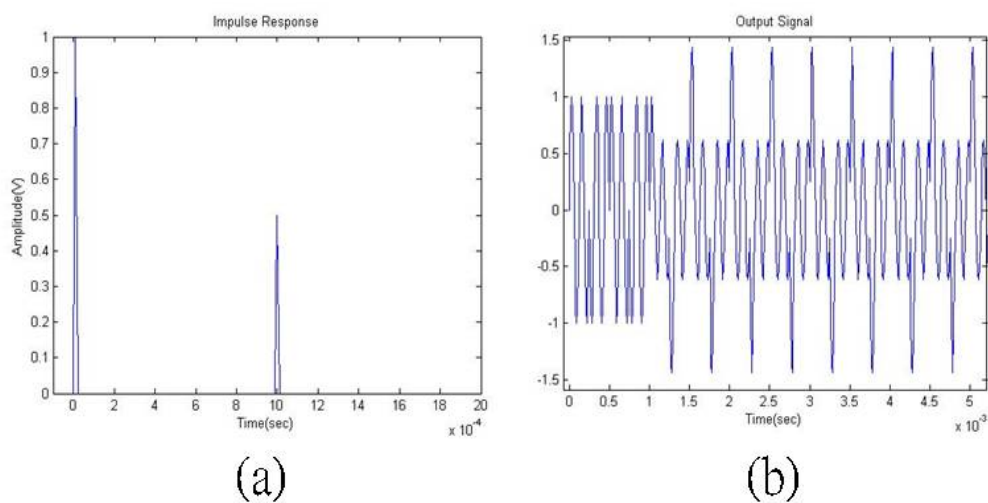


圖 4-4、(a)通道為 2 個脈衝響應(b)經通道所得到訊號

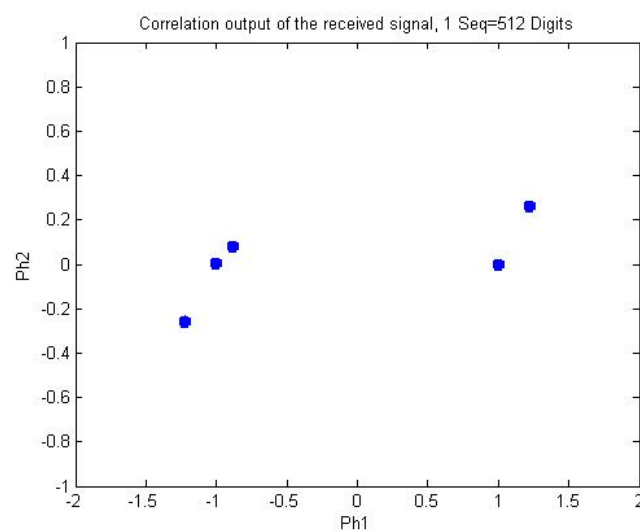


圖 4-5、通道為二個脈衝響應之解調狀況

將無編碼 BPSK 訊號，經過二個脈衝響應加上高斯雜訊，主要訊號與雜訊比為 3，經過通道所得到的訊號(圖 4-6)，無法明顯看出原始的 BPSK 訊號。原先發送的訊號為字元(symbols)  $\pm 1$  的訊號位元，通過通道的訊號作解調(demodulated)，解調呈現擴散的兩團(圖 4-7)，解調狀況為良好 (ph1=0 為判斷軸，沒有介於 ph1=0 之間的訊號位元)，不需要等化器作處理。實際的實驗情況沒那麼理想化，需要運用到等化器

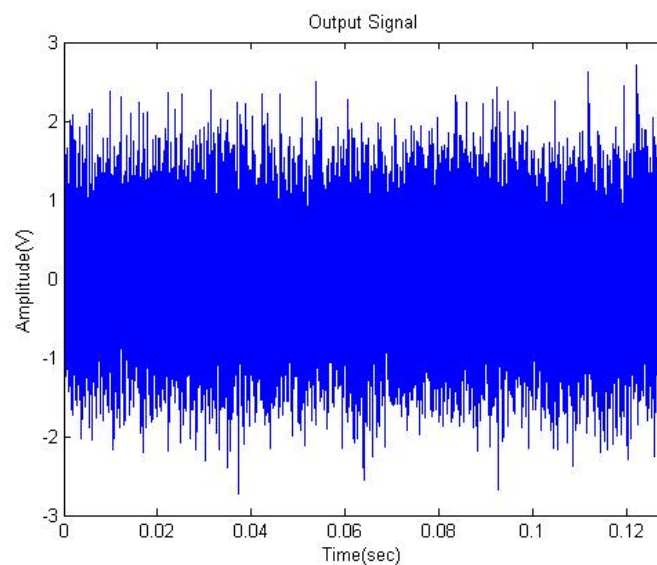


圖 4-6、經過通道後的訊號加入雜訊

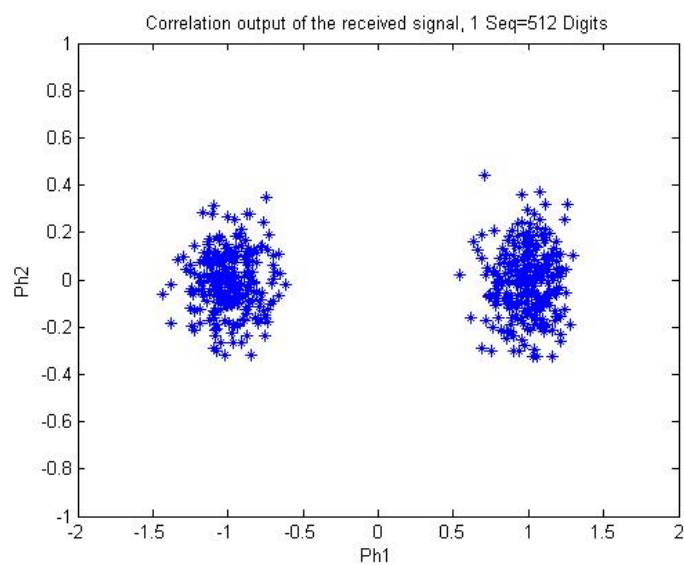


圖 4-7、通道為二個脈衝響應加上高斯雜訊之解調狀況

### 4.1.2 隨機脈衝響應模擬-隨機取樣之訊號

訊號以隨機排列成 512 個字元，-1、1 各為 256 個字元，模擬一個脈衝響應表示通道(圖 4-8(a))，當訊號經過此通道是沒有變化(圖 4-8(b))，將此接收訊號經過解調，無使用等化器的情況下，能完整解出-1、1 兩字元上(圖 4-9)，不需要等化器處理，與無編碼的訊號解調一樣。

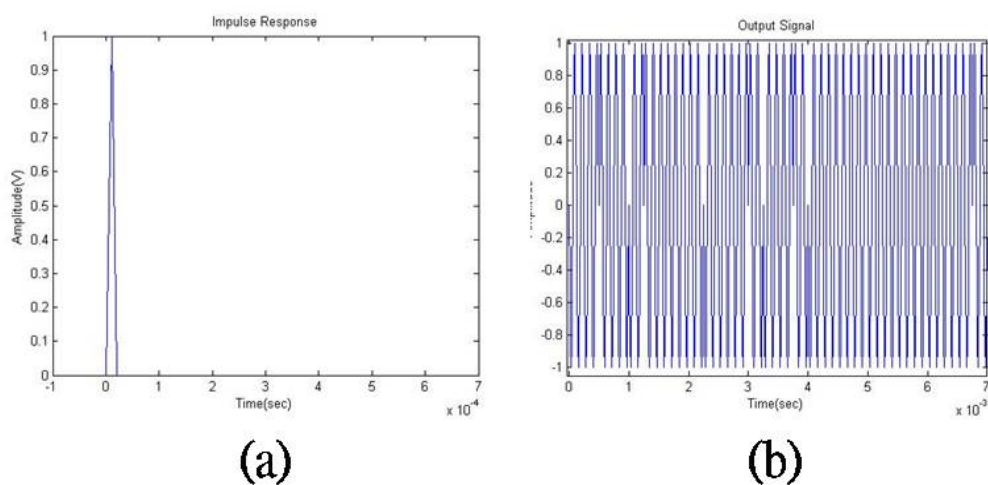


圖 4-8、(a)通道為 1 個脈衝響應(b)經通道所得到訊號

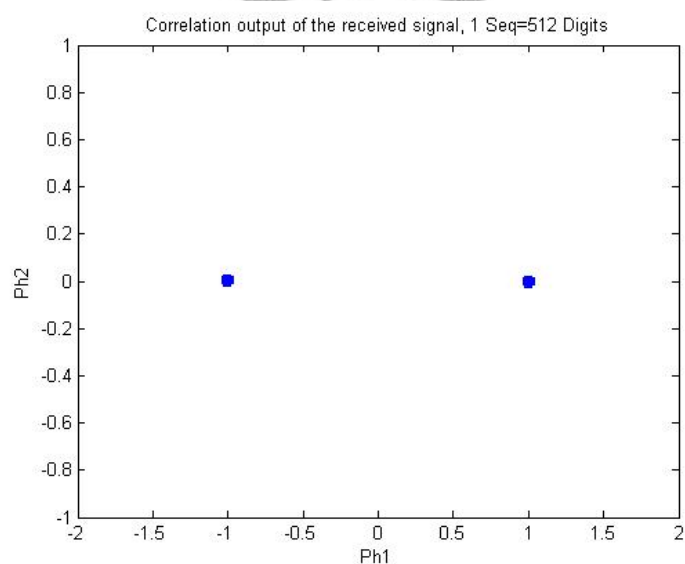


圖 4-9、通道為一個脈衝響應之解調狀況

模擬隨機取樣訊號之二個脈衝響應，將此二個脈衝響應表示成水下通道，一  
 是由直接接收訊號、二是由底床或海表面反射所接收到的訊號(圖 4-10(a))，訊  
 號的振幅從 $\pm 1V$ 變成 $\pm 1V$ 、 $\pm 0.6V$ 、 $\pm 1.4V$ (圖 4-10(b))所得訊號振幅與無編  
 碼一樣，解調訊號位元在 11 點上(圖 4-11)， $ph1$  等於 0 之間沒有需要經過判斷  
 的字元，解調結果為良好，不需要經過等化器處理。與無編碼經過兩個脈衝響應  
 相比，解調多出幾個點，明顯地表示出編碼會因環境造成解調上有所不同。編碼  
 會影響到解調好與壞，至此不先對編碼作研究，而先對水下通道有所了解，再進  
 行其他會影響通訊品質的研究。

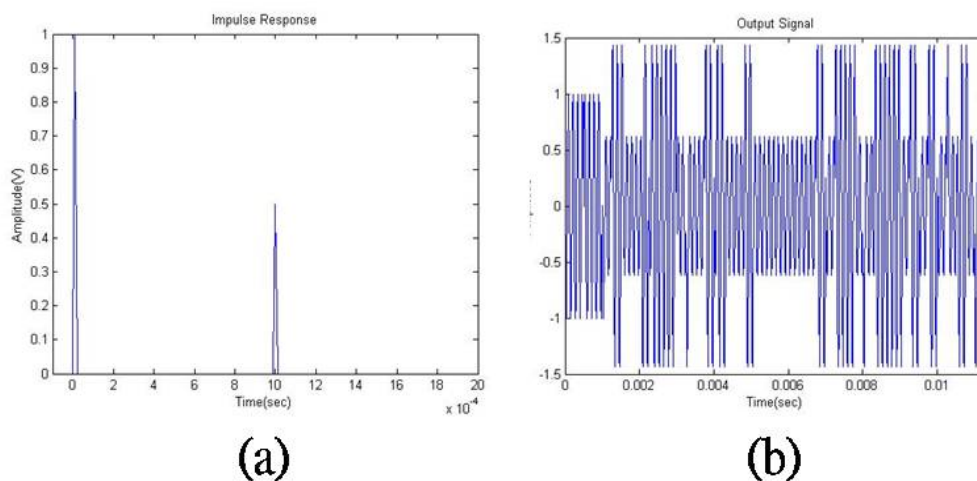


圖 4-10、(a)通道為 2 個脈衝響應(b)經通道所得到訊號

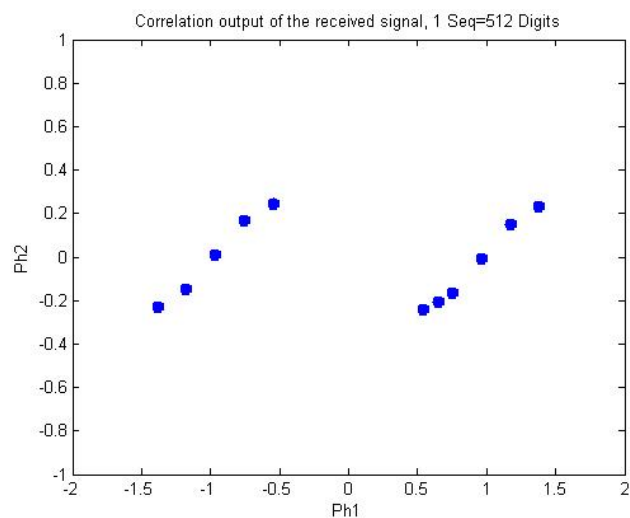


圖 4-11、通道為二個脈衝響應之解調狀況

將隨機取樣之編碼 BPSK 訊號，進入二個脈衝響應加入高斯雜訊，主要訊號與雜訊比為 3，經過通道所得到的訊號(圖 4-12)，無法明顯看出原始的 BPSK 訊號。原先發送的訊號字元(symbols)為-1、1，通過通道訊號加入雜訊作解調(demodulated)，無使用等化器下，解調呈現擴散的兩團(圖 4-13)，將原先訊號位元在 11 點上，明顯地訊號夾雜著雜訊在裡面。與無編碼加入高斯雜訊相比之下，無編碼訊號較為聚集，而隨機取樣之編碼解調較為發散，訊號字元靠近  $\text{ph1}$  等於 0 之間，這樣的情形容易造成錯誤率，目前仍是清楚的兩團，不需要等化器處理。

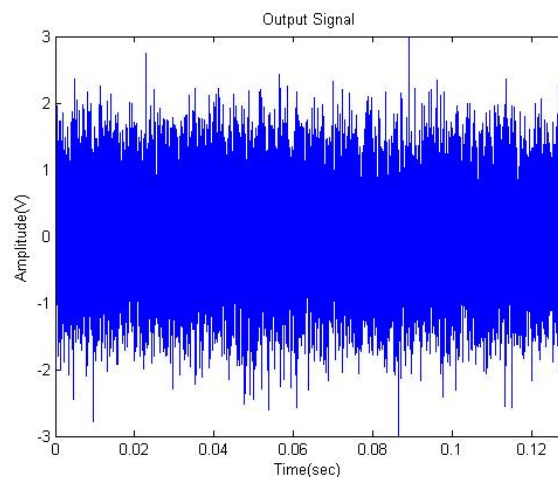


圖 4-12、經過通道後的訊號加入雜訊

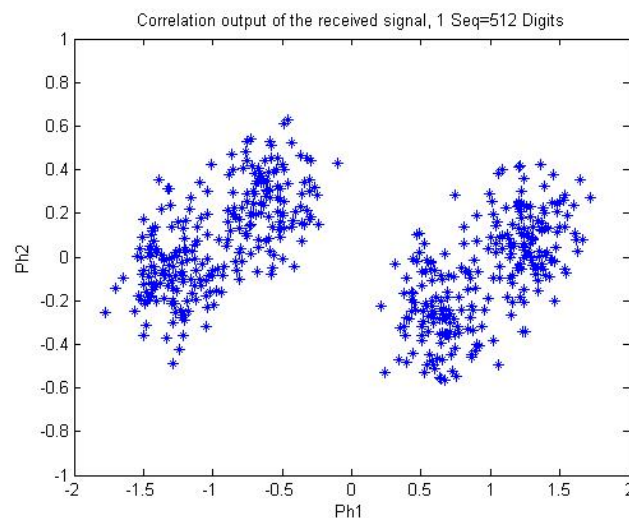


圖 4-13、通道為二個脈衝響應加入高斯雜訊之解調狀況



### 4.1.3 高斯波束法理論模擬

水下通道是依靠聲波傳遞，模擬高頻訊號經由聲線軌跡傳遞，配合高斯波束法 GBM(Gaussian Beam Method)，計算整個聲場的分佈。波相位相等所組成的面稱為波陣面，波陣面的法線向量為聲線傳遞的聲線，GBM 藉由這理論可算出聲壓振幅，利用 GBM 程式經由底床的反射與吸收、海平面的反射，得到環境上的聲場。針對實驗環境所作的模擬，將聲源放置深度 2 公尺，接收深度 2 公尺，接收以 50、100、150、190 公尺的距離作模擬，模擬訊號經水下通道所量測到的脈衝響應，配合實驗上的模擬，環境為 Range-Dependent 靜態的水文環境，水深 3~7 公尺(圖 4-14)，發送頻率為 8kHz 的 BPSK 訊號，頻寬為 4kHz，底層的聲速與密度皆大於通道聲速與密度，設通道聲速為 1500 公尺/秒，密度為 1 克/立方公分，底層聲速為 1650 公尺/秒，密度為 1.8 克/立方公分，衰減率為 0.4 dB/λ(圖 4-14，右表)。

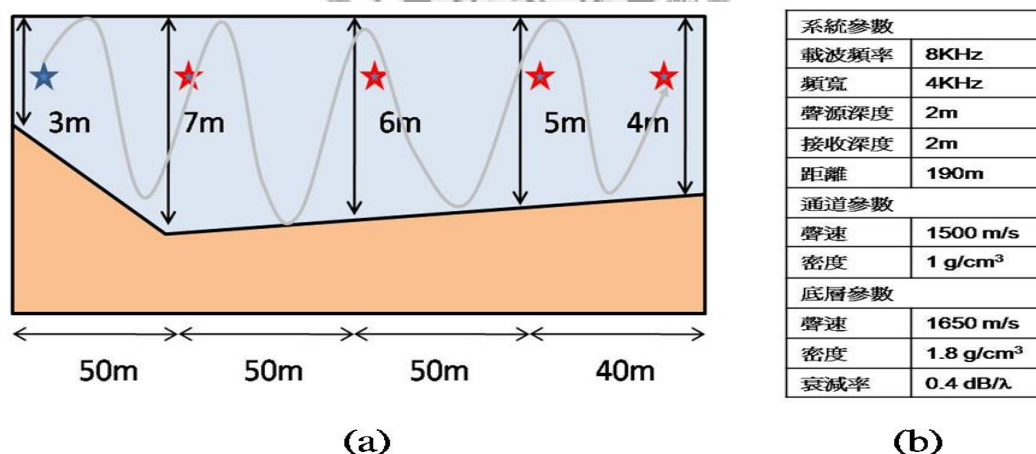


圖 4-14、(a)GBM 模擬水下聲場(b)模擬環境的各種參數

每段距離模擬的水下通道脈衝響應(圖 4-15(a)(b)(c)(d))，輸入訊號經過水下通道所得到輸出訊號，換句話說就是將通道的脈衝響應與 BPSK 訊號作乘積(圖 4-16(a)(b)(c)(d))，從圖 4-15 中仔細看出，收到訊號已有所不同，傳播距離越長，能量損失越大。模擬的聲壓振幅從 50 公尺(0.006V)至 190 公尺(0.003V)，

隨距離越來越小。受多重路徑效應影響下，隨著距離增加收到更多脈衝響應訊號，由原為 3 個脈衝響應增加至 9 個脈衝響應(圖 4-15)。

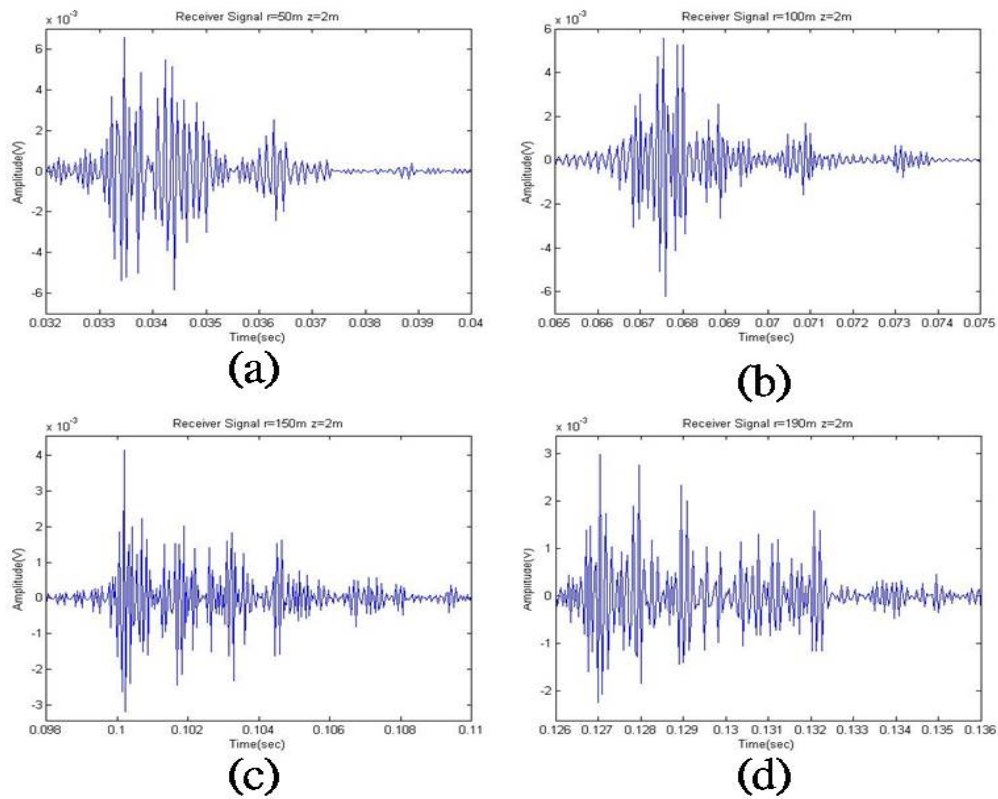


圖 4-15、每段距離的脈衝響應(a)50 公尺(b)100 公尺(c)150 公尺(d)190 公尺

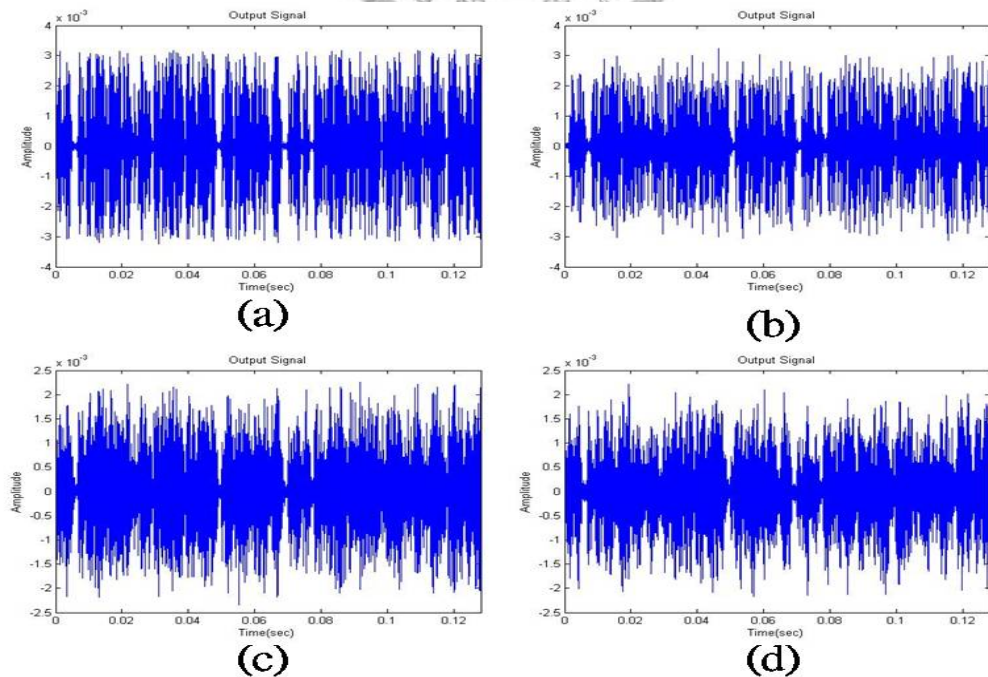


圖 4-16、經過通道所得訊號(a)50 公尺(b)100 公尺(c)150 公尺(d)190 公尺

### 4.1.3.1 靜態水文環境下

靜態水文環境(Pekeris waveguide)下距離 50 公尺，環境為理想情況下沒有雜訊干擾，訊號 BPSK 解調在星座圖 $-1.5 \sim 1.5$ 之間線上(圖 4-17(a))，線性等化狀況解調都在星座圖 x 軸 $-0.5 \sim -1.5$ 、 $0.5 \sim 1.5$ 之間(圖 4-17(b))，在非線性等化收斂到 x 軸 $-1.2 \sim -0.8$ 、 $0.8 \sim 1.2$ 字元上比起線性更聚集(圖 4-17(c))。在均方誤差值上，線性在字元 250~280 之間出現錯誤，均方誤差變大，而非線性一開始在調整權重值會出現錯誤，之後沒出現錯誤碼，均方誤差一直變小，線性與非線性等化器針對靜態水文環境下都有收斂效果(圖 4-18 線性-x，非線性-o)。

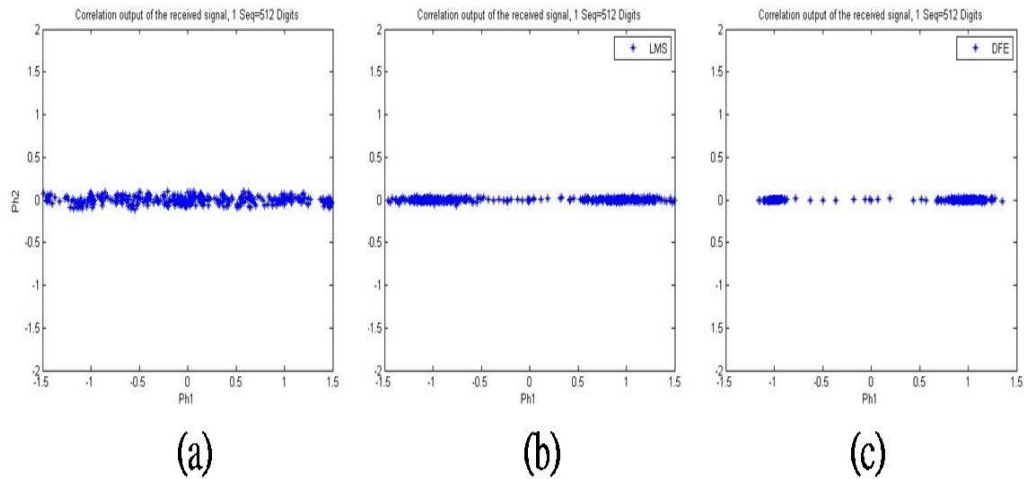


圖 4-17、距離 50 公尺靜態環境使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線性(c)非線性

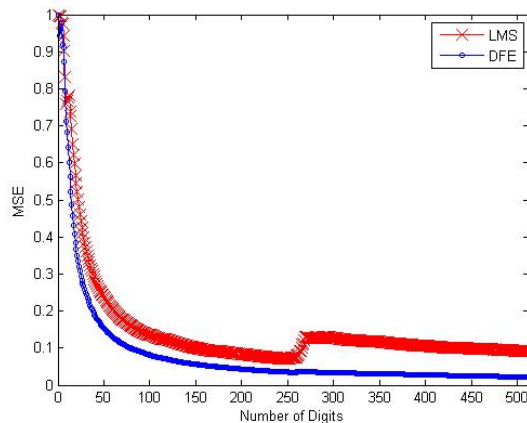


圖 4-18、距離 50 公尺靜態環境解調狀況，均方誤差值線性-x，非線性-o

將接收距離增加至 100 公尺，沒有雜訊的情況下收到訊號，訊號接收振幅越小，解調的星座圖散佈在 x 軸(ph1)-1.5~1.5 之間，y 軸(ph2)-0.5~0.5 之間(圖 4-19(a))，線性等化之後已經將散佈的字元聚集在 x 軸-1.3~-0.7、0.7~1.3 之間(圖 4-19(b))，在非線性等化收斂到 x 軸-1.1~-0.9、0.9~1.1 字元上，比起線性還聚集在-1、1 字元上(圖 4-19(c))，在均方誤差值上，線性字元在 270~300 之間出現錯誤值，均方誤差值變大，非線性一樣前幾個有錯誤字元，之後沒出現錯誤慢慢收斂(圖 4-20 線性-x，非線性-o)，非線性收斂較線性好(觀看整個 512 字元均方誤差值，明顯線性高於非線性)。

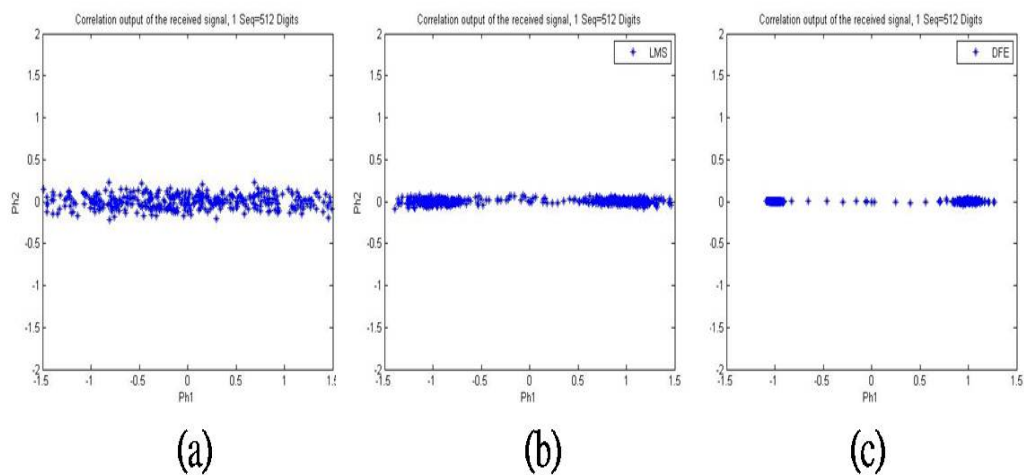


圖 4-19、距離 100 公尺靜態環境使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線性 (c)非線性

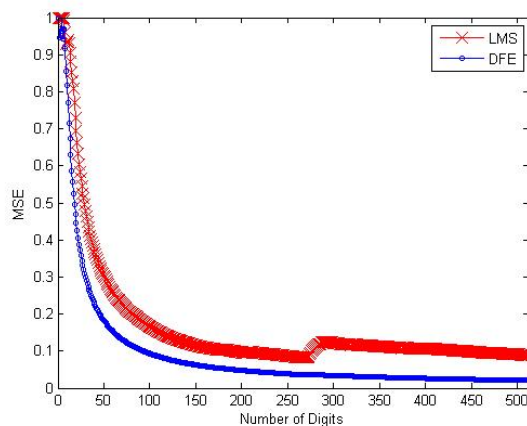


圖 4-20、距離 100 公尺靜態環境解調狀況，均方誤差值線性-x，非線性-o

距離增加至 150 公尺，解調星座圖仍集中在  $y$  軸  $-0.3 \sim 0.3$  的範圍內(圖 4-21(a))，線性收斂在星座圖  $x$  軸上的  $-1.3 \sim -0.7$ 、 $0.7 \sim 1.3$  字元之間(圖 4-21(b))，在非線性等化星座圖  $x$  軸收斂到  $-1.1 \sim -0.9$ 、 $0.9 \sim 1.1$  字元之間(圖 4-21(c))，在均方誤差上，線性收斂狀況字元在 260~300 之間仍有錯誤碼出現(圖 4-22 線性-x，非線性-o)。目前在靜態的水文環境下，線性收斂結果是穩定，但在真實的通道收到效果就可能收斂不穩定。

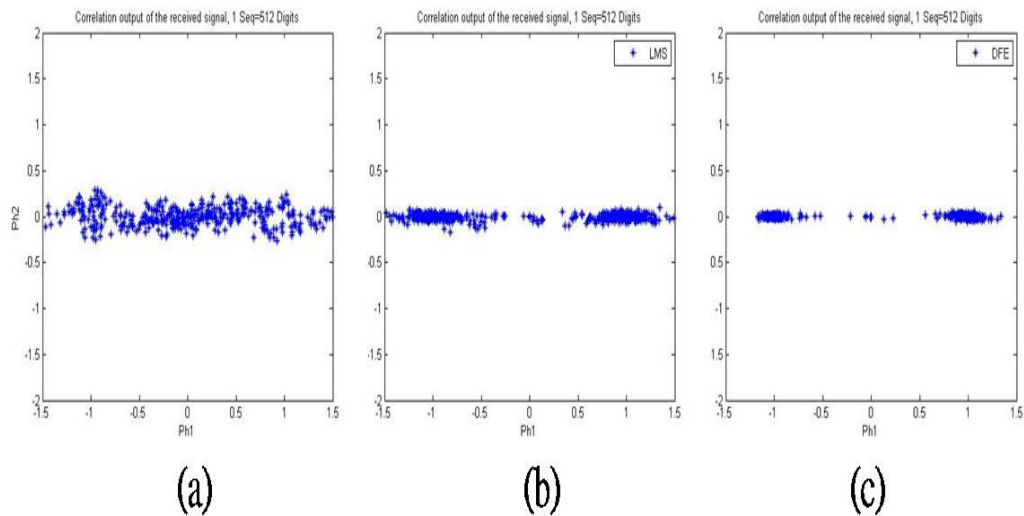


圖 4-21、距離 150 公尺靜態環境使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線性(c)非線性

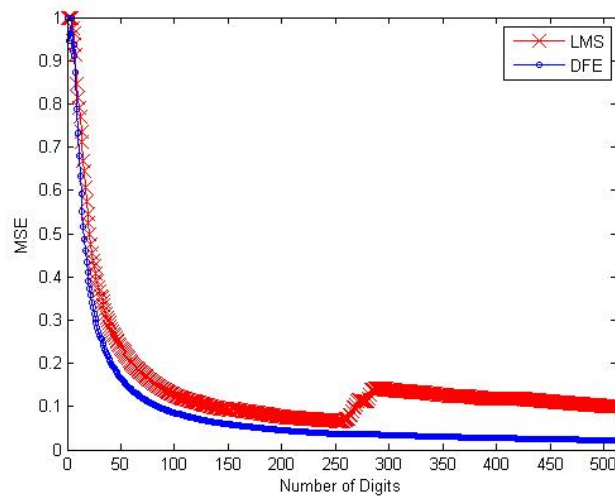


圖 4-22、距離 150 公尺靜態環境解調狀況，均方誤差值線性-x，非線性-o

將接收距離增加至 190 公尺，接收振幅為 50 公尺振幅的一半，解調的結果仍在 y 軸-0.3~0.3 之間，從圖中看出幾乎為一條線（圖 4-23(a)），線性在星座圖上 x 軸收斂到-1.5~-0.5、0.5~1.5 字元之間(圖 4-23(b))，在非線性等化星座圖 x 軸收斂到-1.2~-0.8、0.8~1.2 字元之間(圖 4-23(c))，從均方誤差值上，線性仍有明顯突出的一段(圖 4-24 線性-x，非線性-o)。，隨距離增加收斂也會有所影響，而從模擬 50 公尺與 190 公尺均方誤差相比顯示出，此傳送的距離仍不會有所影響。

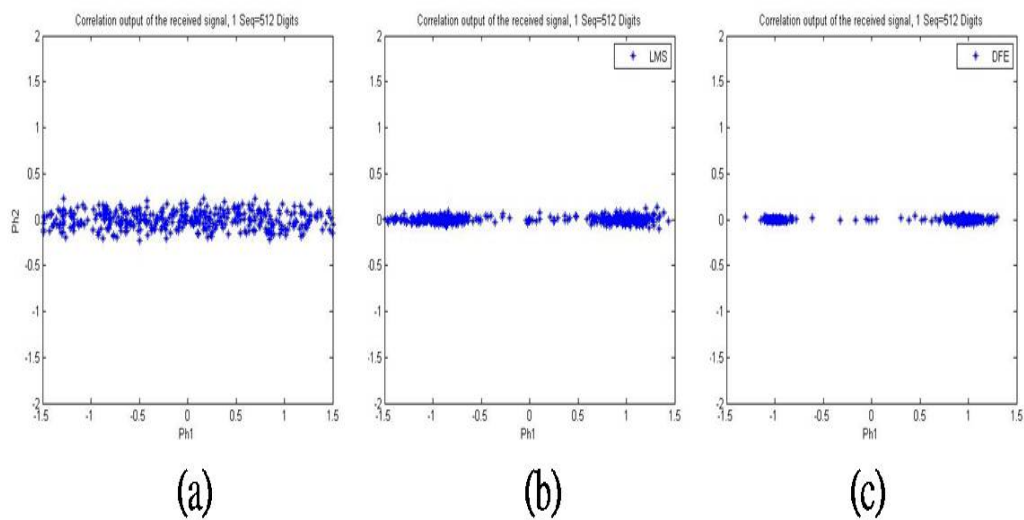


圖 4-23、距離 190 公尺靜態環境使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線性(c)非線性

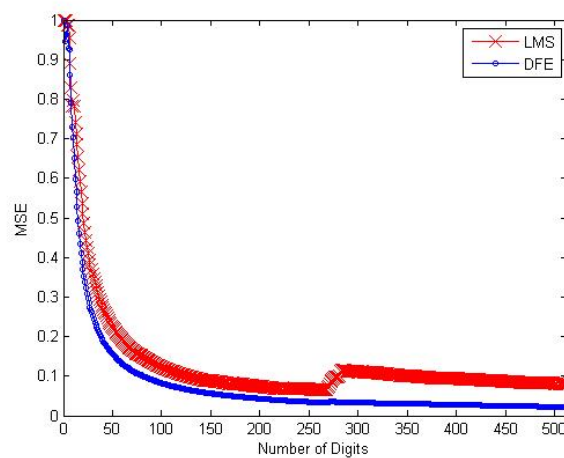


圖 4-24、距離 190 公尺靜態環境解調狀況，均方誤差值線性-x，非線性-o

### 4.1.3.2 模擬靜態水文環境加入高斯雜訊-1 sequence

將靜態水文環境通道，加入高斯雜訊模擬實際環境狀態，輸入訊號與雜訊比為 3(圖 4-25(a)(b)(c)(d))。

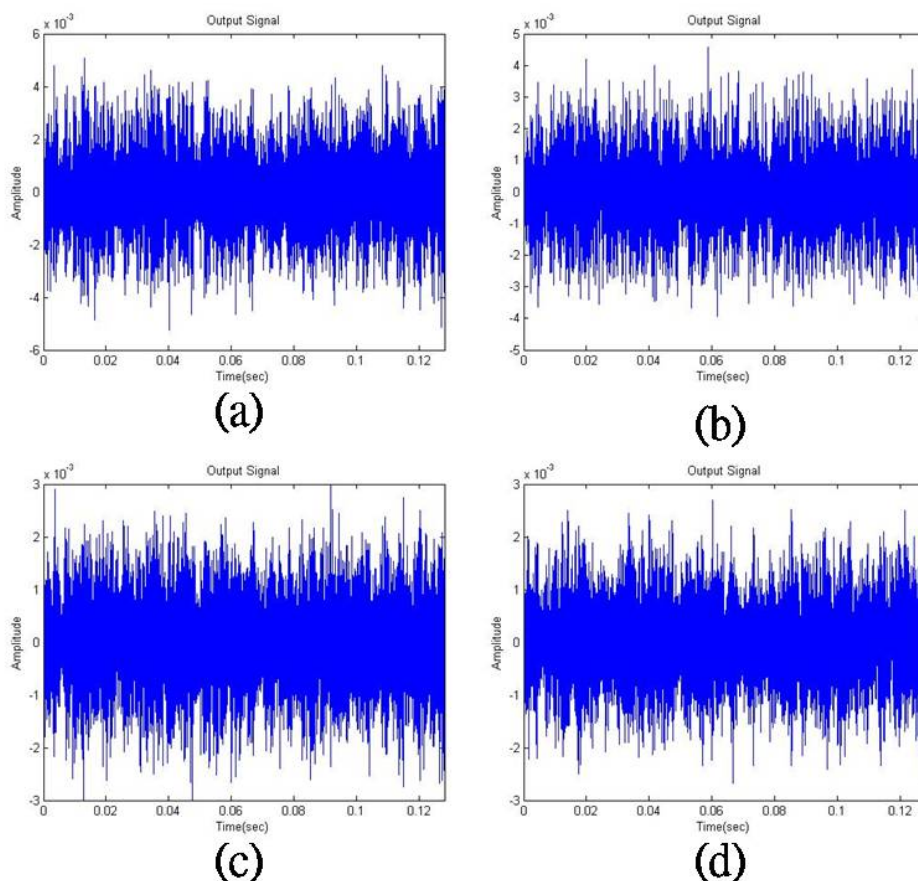


圖 4-25、經通道加高斯雜訊訊號(a)50 公尺(b)100 公尺(c)150 公尺(d)190 公尺

傳遞距離為 50 公尺、100 公尺、150 公尺、190 公尺，收到模擬實際訊號為廣泛分佈在星座圖上，隨距離增加沒受影響(圖 4-26、28、30、32(a))與 2 條隨機脈衝響應加入高斯雜訊不用等化器處理為兩團(圖 4-13)相比，能模擬出真實環境將訊號位元散佈在星座圖上，經過線性等化將散佈的訊號位元分為-1、1 兩團，散佈在 X 軸-1.5~1.5 之間，Y 軸-1~1 之間(圖 4-26、28、30、32(b))，用非線性等化可以將發送訊號字元集中收斂到-1、1 訊號位元(圖 4-26、28、30、32(c))，以均方誤差值得知，線性在字元 250~300 個之間出現錯誤，表示這一

段沒有收斂到，非線性均方誤差則呈現穩定收斂(圖 4-27、29、31、33 線性-X，非線性-0)。

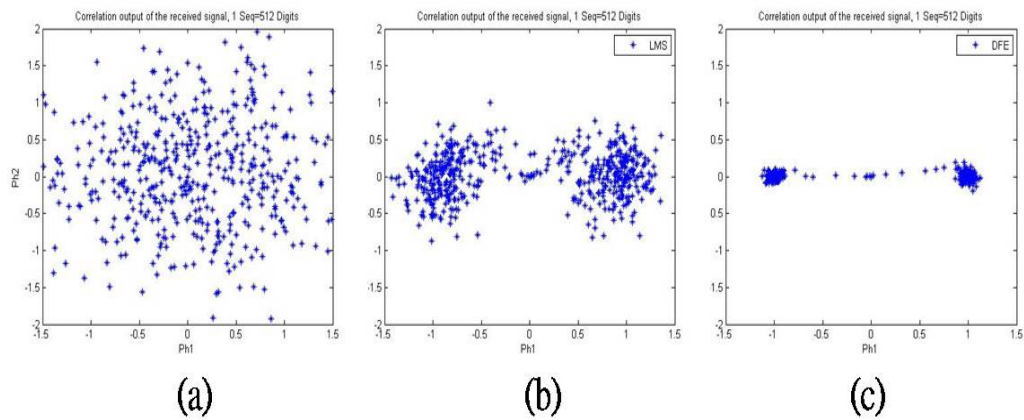


圖 4-26、距離 50 公尺模擬真實環境使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線性(c)非線性

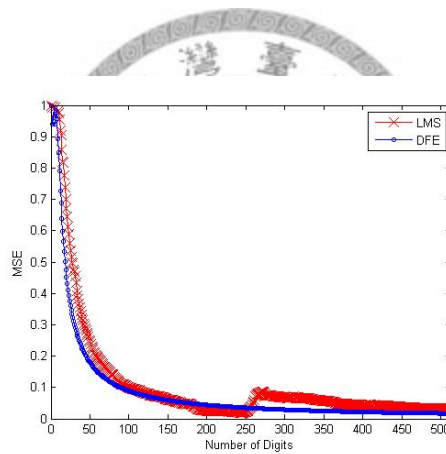


圖 4-27、距離 50 公尺模擬真實環境解調狀況，均方誤差值線性-x，非線性-o

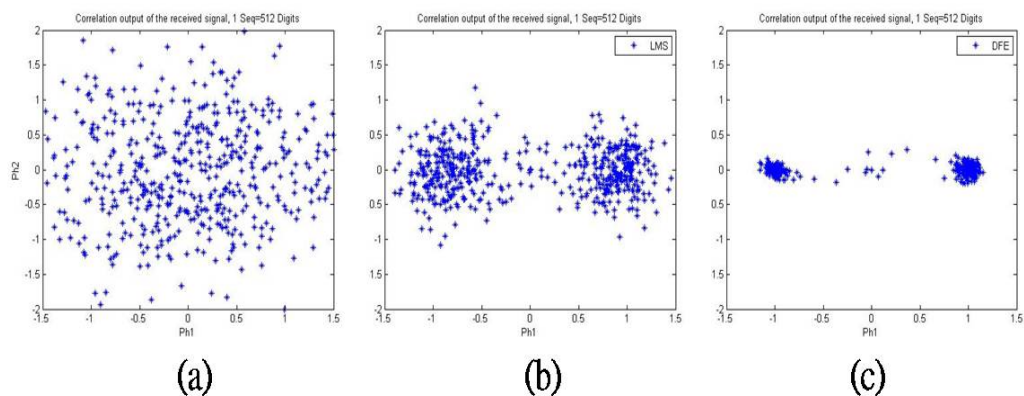


圖 4-28、距離 100 公尺模擬真實環境使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線性(c)非線性



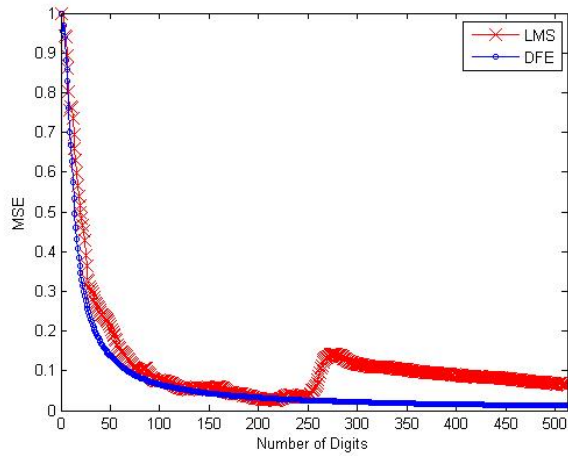


圖 4-29、距離 100 公尺模擬真實環境解調狀況，均方誤差值線性-x，非線性-o

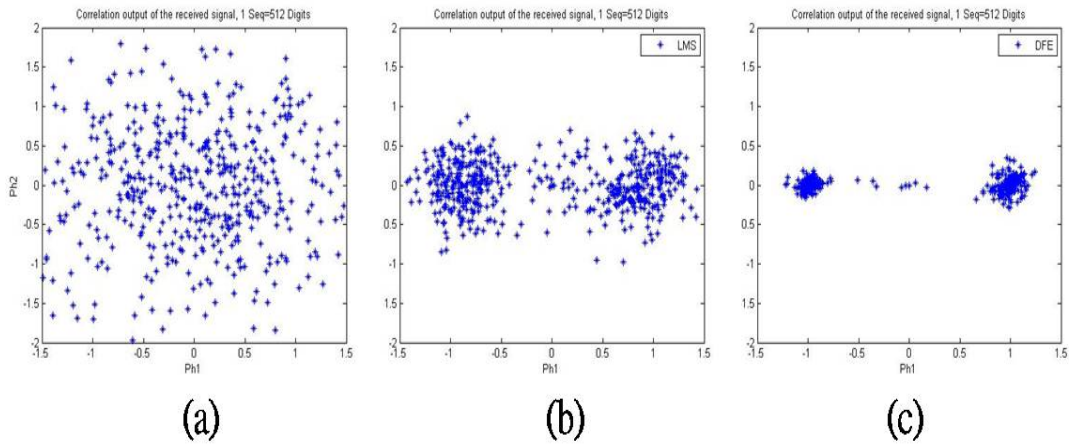


圖 4-30、距離 150 公尺模擬真實環境使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線性(c)非線性

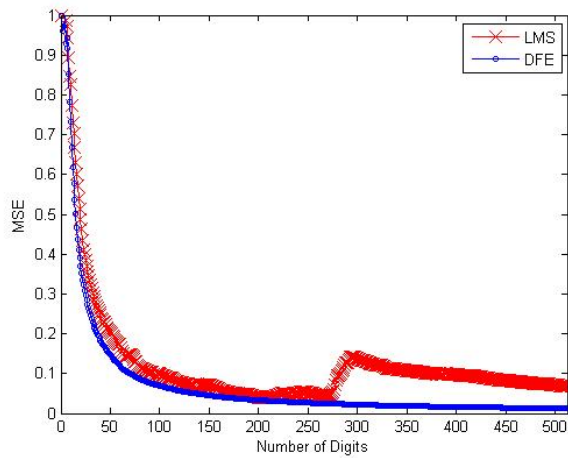


圖 4-31、距離 150 公尺模擬真實環境解調狀況，均方誤差值線性-x，非線性-o

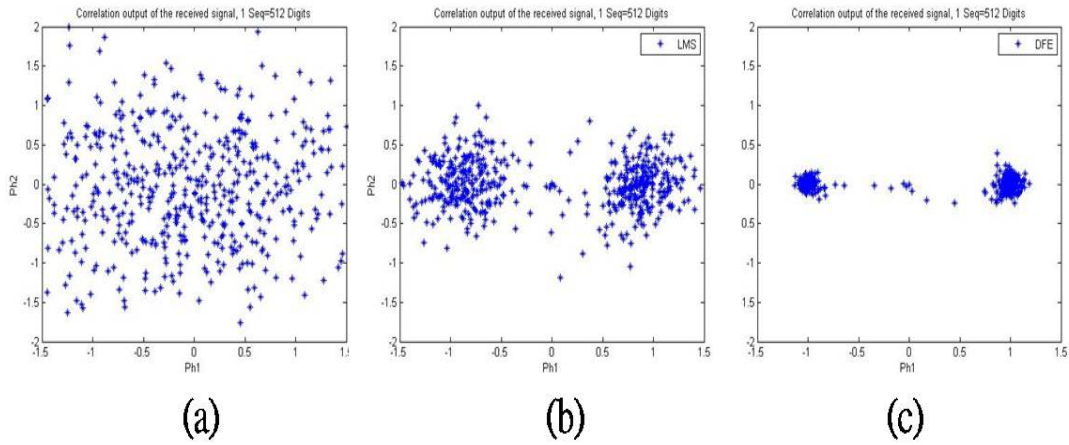


圖 4-32、距離 190 公尺模擬真實環境使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線性(c)非線性

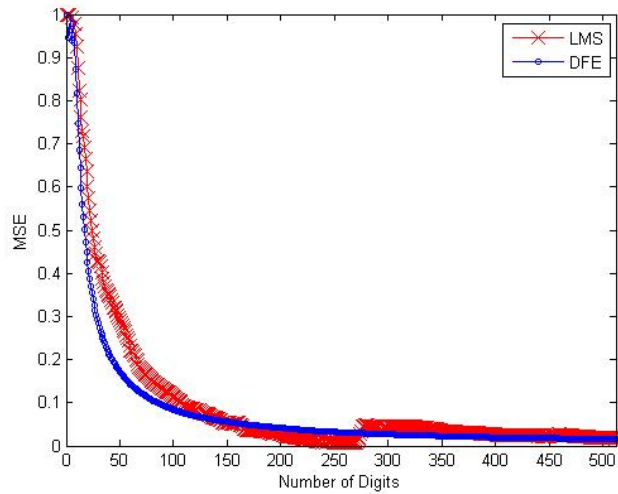


圖 4-33、距離 190 公尺模擬真實環境解調狀況，均方誤差值線性-x，非線性-o

將模擬真實環境的訊號搭配帶通濾波器(bandpass filter)，頻率寬度設定在 6KHz~10KHz，訊號經過帶通濾波器，原本 50 公尺的振幅為-0.006V~0.006V，改為-0.0008V~0.008V，隨距離增加振幅也越小，到距離 190 公尺振幅-0.0004V~0.0004V(圖 4-34(a)(b)(c)(d))，經過線性等化分為兩團仍廣泛散佈-1、1 位元間(圖 4-35~38(b))，用非線性等化可以將發送訊號字元集中收斂到-1、1 位元(圖 4-35~38(c))。

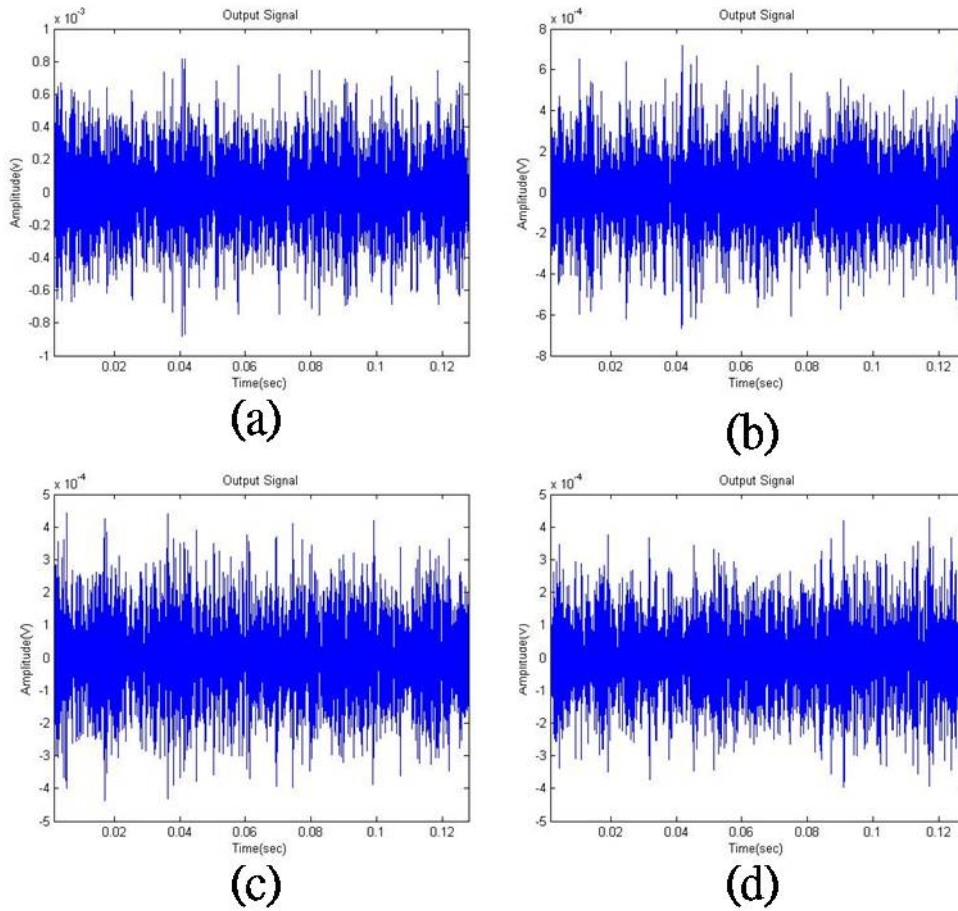


圖 4-34、模擬真實環境配合帶通濾波器(a)50 公尺(b)100 公尺(c)150 公尺(d)190 公尺

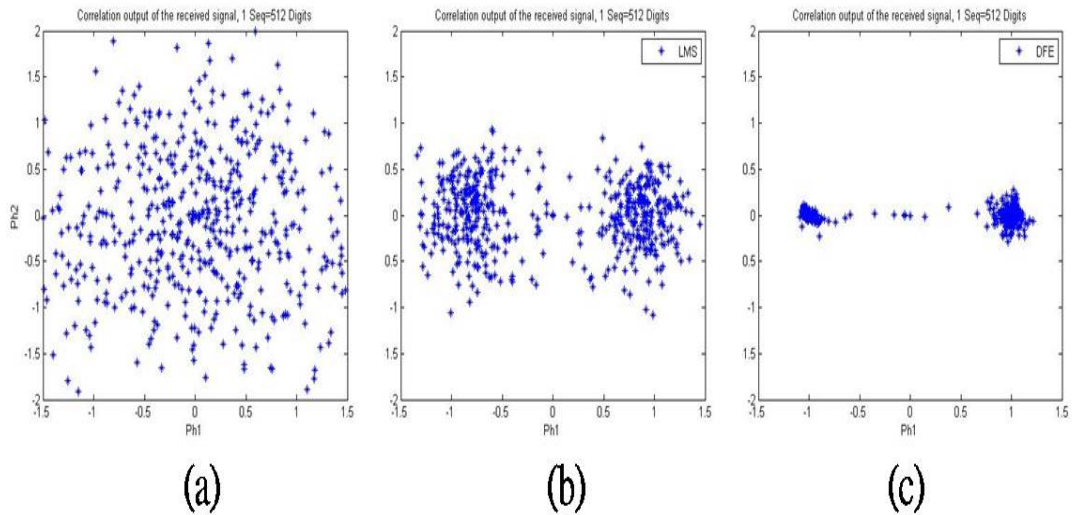


圖 4-35、距離 50 公尺模擬真實環境配合帶通濾波器，使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線性(c)非線性

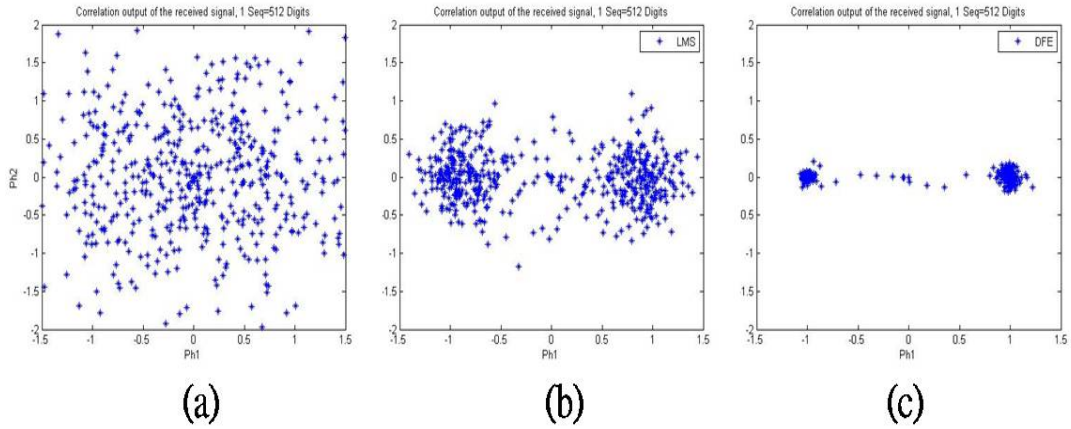


圖 4-36、距離 100 公尺模擬真實環境配合帶通濾波器，使用不同等化器解調(a) 無使用等化器(b)線性(c)非線性

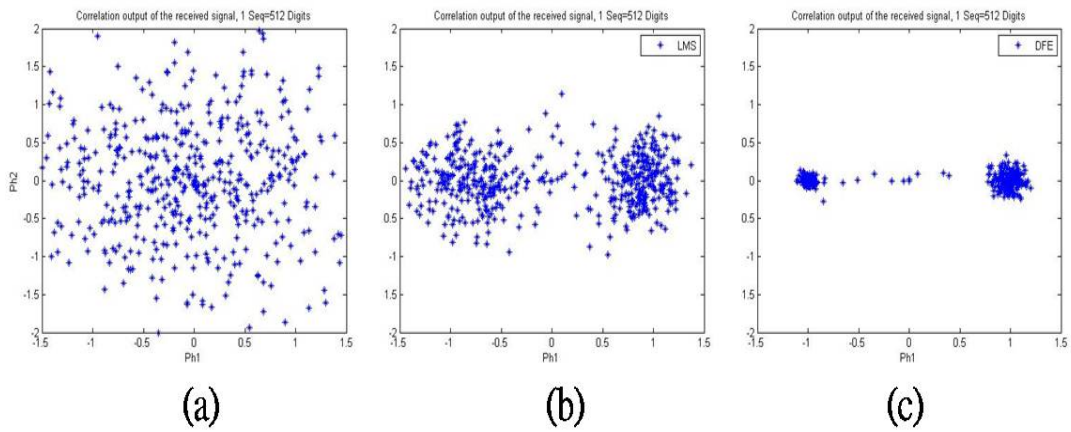


圖 4-37、距離 150 公尺模擬真實環境配合帶通濾波器，使用不同等化器解調(a) 無使用等化器(b)線性(c)非線性

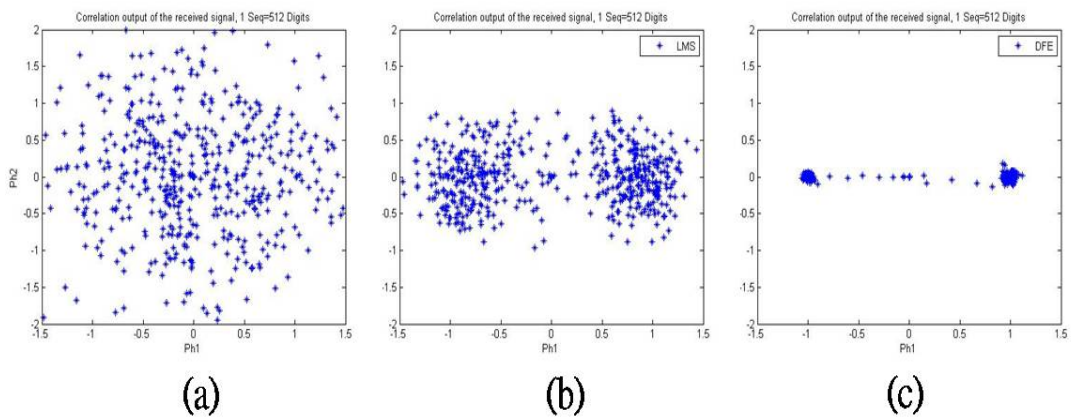


圖 4-38、距離 190 公尺模擬真實環境配合帶通濾波器，使用不同等化器解調(a) 無使用等化器(b)線性(c)非線性

均方誤差值上，1sequence 經過線性與非線性收斂狀況良好，線性在字元 250~300 之間仍有出現錯誤。當通訊距離越長時，字元錯誤率會增加，圖 4-39 中，各傳輸距離用線性與非線性解調，均方誤差值沒很大變動，表示可增加傳輸距離及訊號長度。

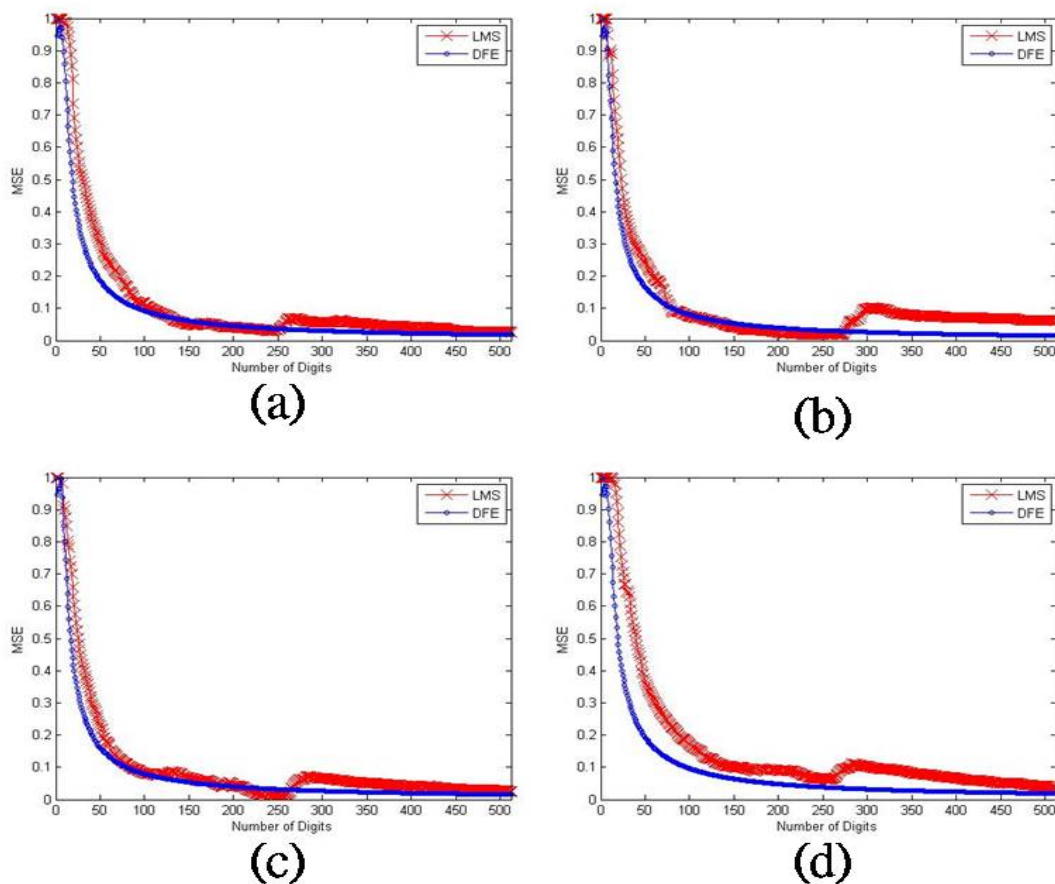


圖 4-39、模擬真實環境，均方誤差值線性-x 非線性-o (a)50 公尺(b)100 公尺 (c)150 公尺(d)190 公尺

#### 4.1.3.3 模擬靜態水文環境加入高斯雜訊-30 sequence

模擬訊號長度為 30sequence 共 15360 個字元，時間為 3.84 秒，傳遞距離為 50 公尺、100 公尺、150 公尺、190 公尺收到模擬真實訊號，經過帶通濾波器再解調（圖 4-40），佈滿整個星座圖（圖 4-41~44(a)），經過線性等化將散佈的訊號位元分為-1、1 兩團，散佈在 X 軸-1.5~1.5 之間，Y 軸-1~1 之間，分為兩

團仍廣泛散佈-1、1 位元間，兩團之間  $ph1$  等於 0 為判斷線，此區域容易造成錯誤字元(圖 4-41~44(b))，用非線性等化可以將發送訊號字元集中收斂到-1、1(圖 4-41~44 (c))，非線性收斂情況比線性好，明顯從圖 4-41~44(b)(c)中觀察更為集中及非線性很少字元在  $ph1$  等於 0 的區域，此為 30 sequence 誤碼率圖，橫軸表示為 1~30 sequence，縱軸表示為誤碼率，每一個 sequence 收斂情況呈現忽高忽低，當下一個 sequence 誤碼率變高時，表示比起前幾個平均誤碼率高，反之誤碼率變低時比平均誤碼率低，由誤碼率圖顯示，線性收斂狀況從第一個 sequence 作訓練，之後 sequence 開始作收斂，會隨著每個 sequence 呈現起伏狀態，非線性收斂呈現一開始出現錯誤碼，之後修正 msequence 沒出現錯誤碼，隨著 sequence 增加錯誤碼率會降低(圖 4-45 線性-X，非線性-0)。

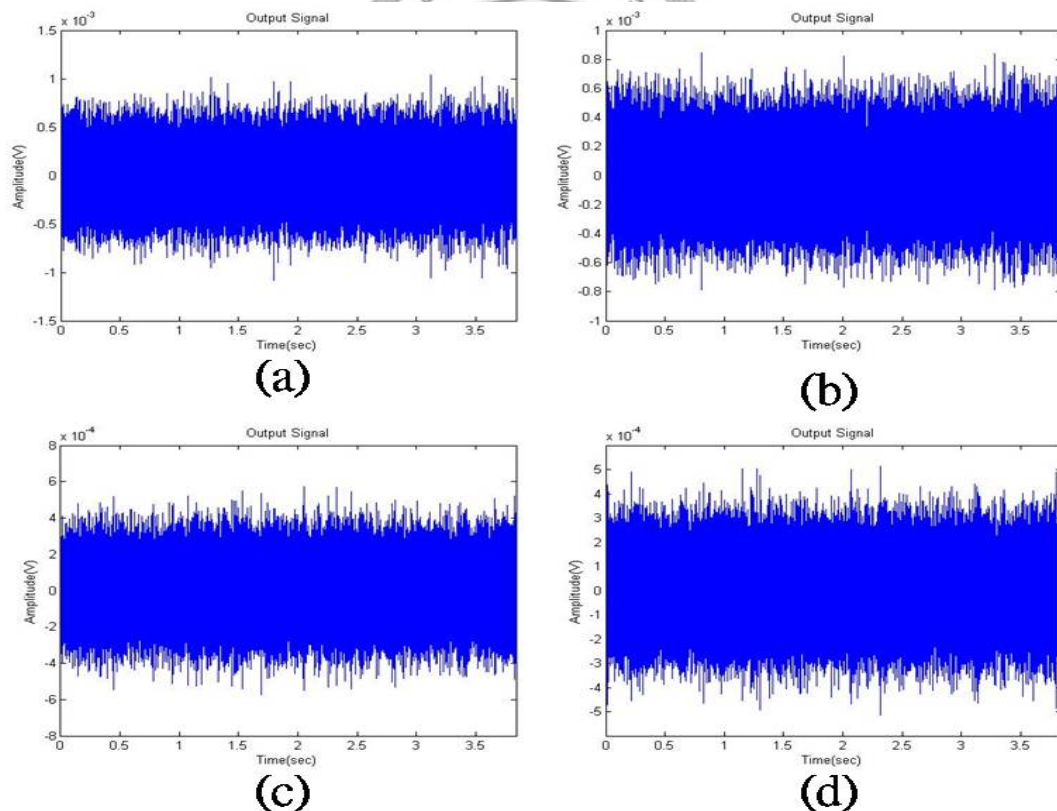


圖 4-40、模擬真實環境配合帶通濾波器 (a)50 公尺(b)100 公尺(c)150 公尺(d)190 公尺

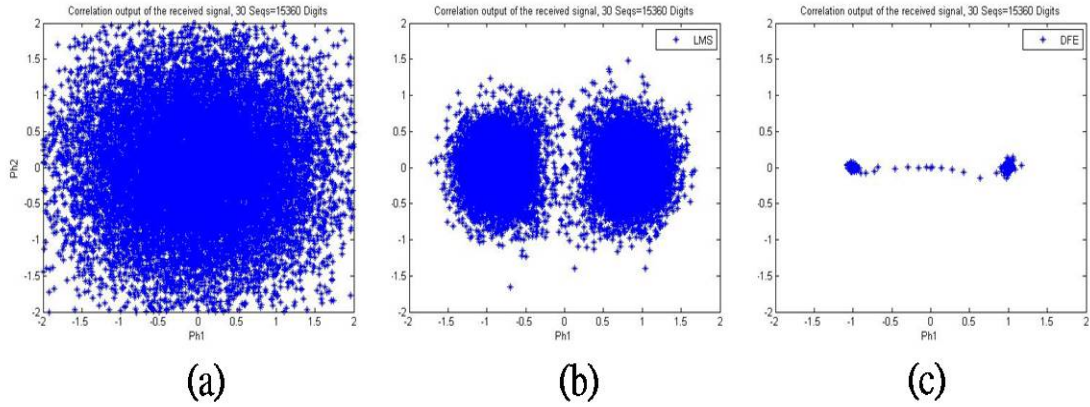


圖 4-41、距離 50 公尺模擬真實環境配合帶通濾波器，使用不同等化器解調(a) 無使用等化器(b)線性(c)非線性

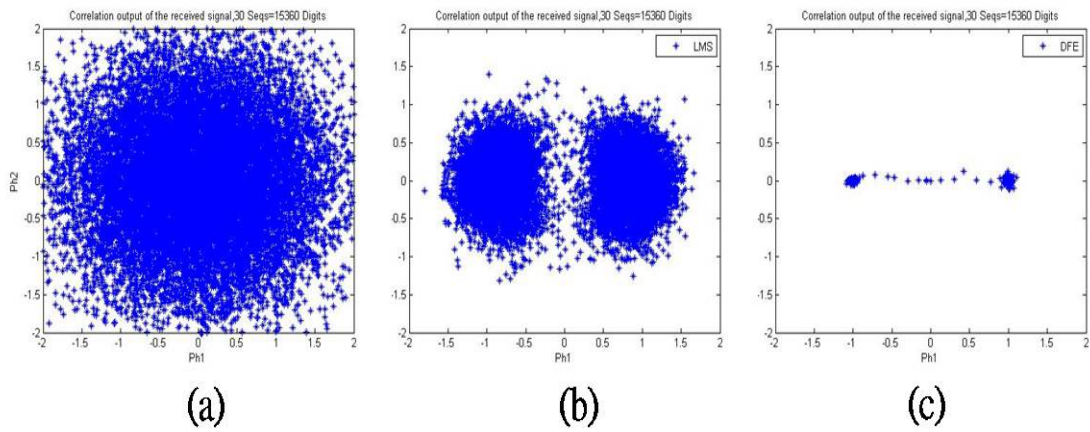


圖 4-42、距離 100 公尺模擬真實環境配合帶通濾波器，使用不同等化器解調(a) 無使用等化器(b)線性(c)非線性

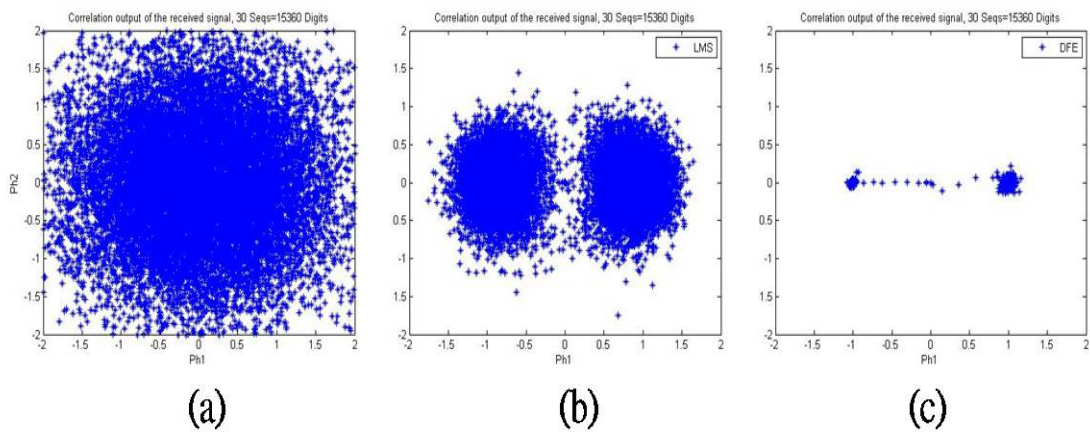


圖 4-43、距離 150 公尺模擬真實環境配合帶通濾波器，使用不同等化器解調(a) 無使用等化器(b)線性(c)非線性

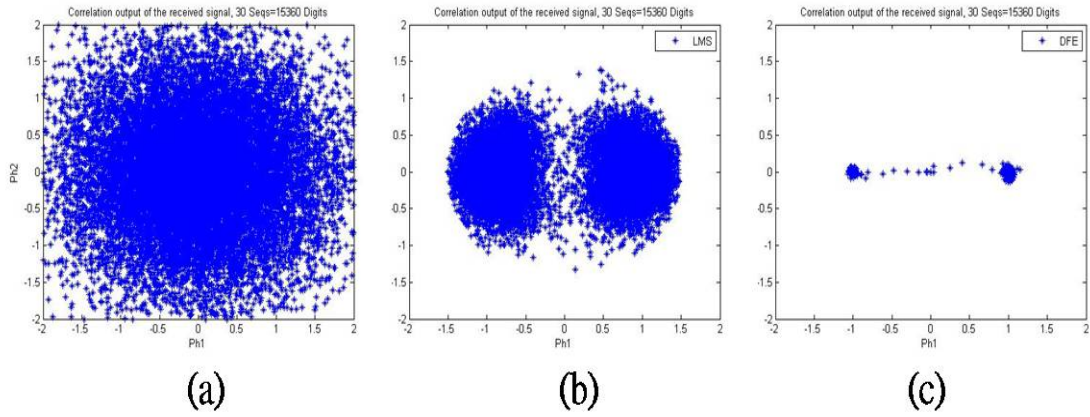


圖 4-44、距離 190 公尺模擬真實環境配合帶通濾波器，使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線性(c)非線性

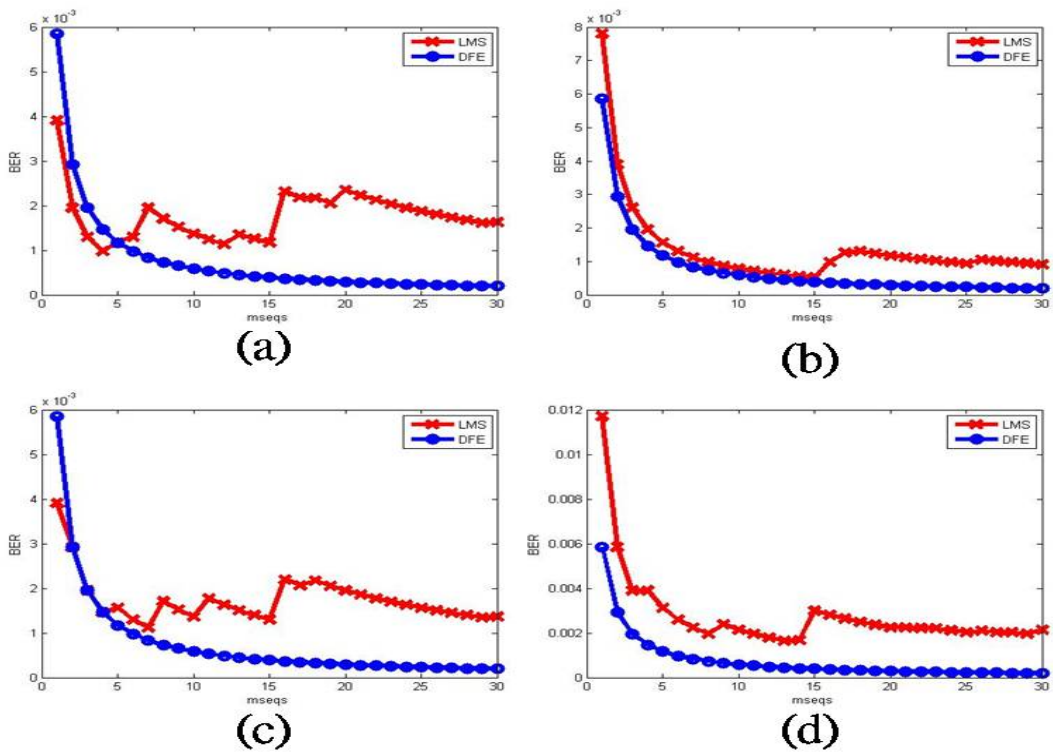


圖 4-45、模擬真實環境，誤碼率線性-x 非線性-o (a)50 公尺(b)100 公尺(c)150 公尺(d)190 公尺

## 4.2 淡水河實驗-點對點

本實驗時間為漲潮時期，流速有 3 節，作一條測線分別在 50、100、150、190 公尺量測其訊號，點位位置為 A1~A4，此點位底層深度為 3~7 公尺(圖 4-14)，



測得水溫為 19 度，將聲源與接收麥克風放置水深 2 公尺作發射與接收端通訊實驗。

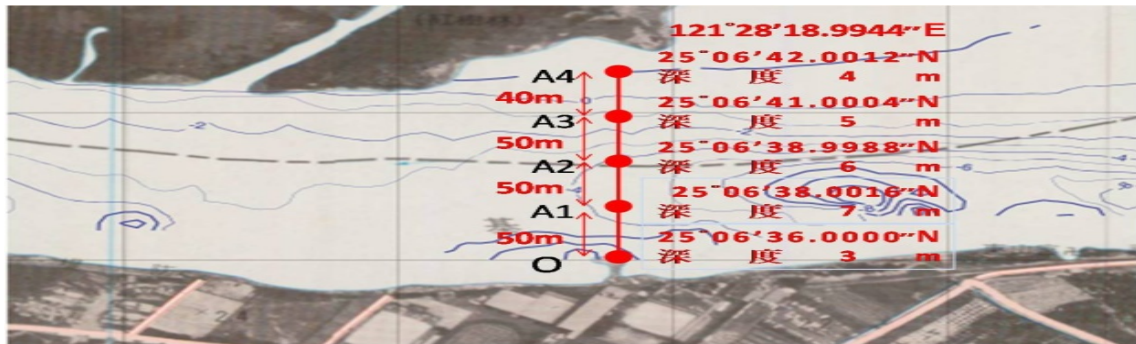


圖 4-46、實驗點位圖 (O 點為聲源點位，A1~A4 為接收點位)

#### 4.2.1 點對點實驗-1 sequence

經過水下通道的訊號，收到沒規律性的訊號，訊號載波在通道脈衝響應上，即使是相同距離沒有收到一樣的訊號，明顯看出各距離接收訊號(圖 4-47)，訊號受水下通道影響強烈的變化和振盪，也隨著時變性變動，將訊號直接運用等化器作訊號處理，線性處理訊號字元，星座圖上能收斂成兩大團(圖 4-48~圖 4-51(b))，非線性處理顯示-1、1 字元上(圖 4-48~圖 4-51(c))，非線性收斂情況很好(圖 4-52)。本實驗最遠距離 190 公尺非線性錯誤率低，表示通訊距離可以增加。

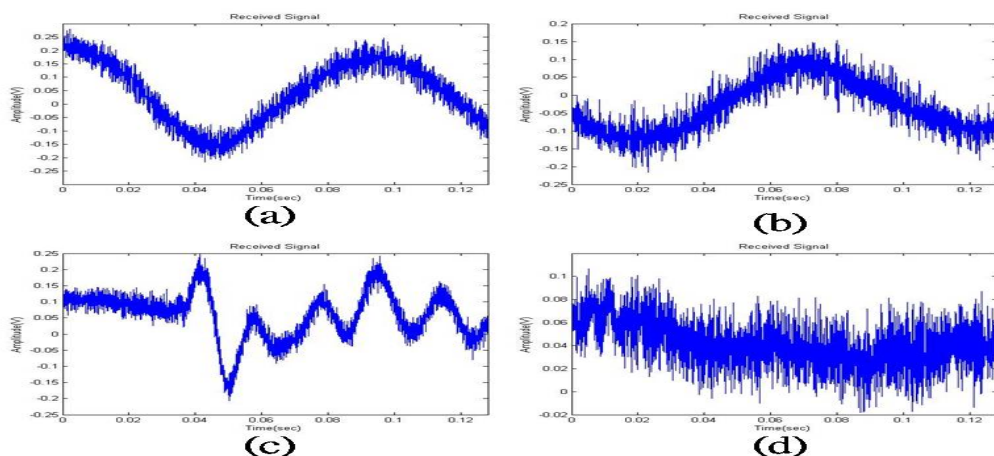


圖 4-47、接收訊號(a)距離聲源 50 公尺(b) 距離聲源 100 公尺(c) 距離聲源 150 公尺(d) 距離聲源 190 公尺

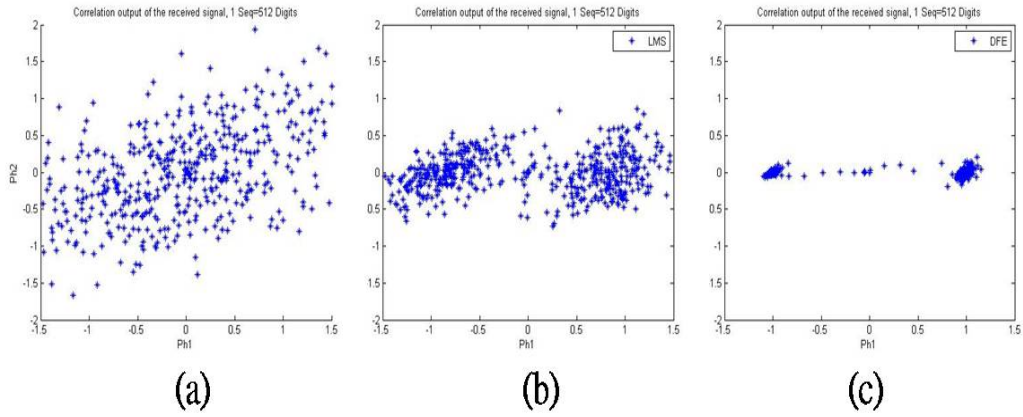


圖 4-48、距離 50 公尺解調狀況，使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線性  
(c)非線性

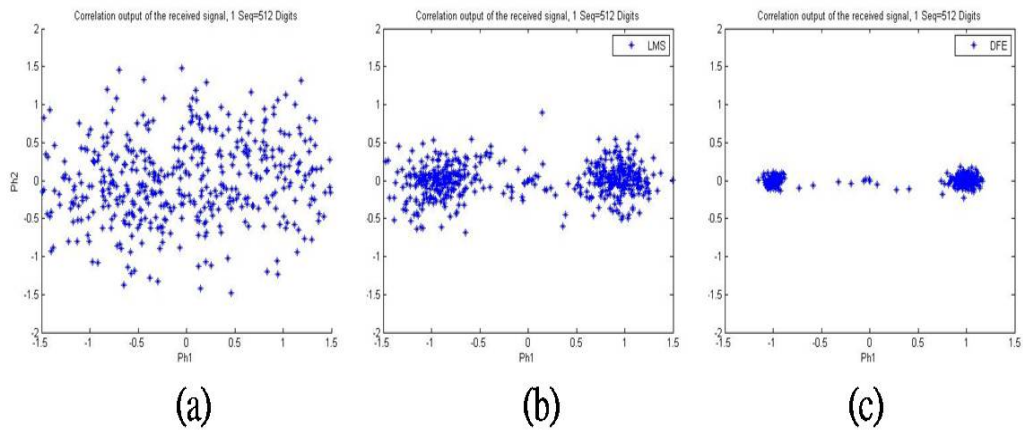


圖 4-49、距離 100 公尺解調狀況，使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線  
性(c)非線性

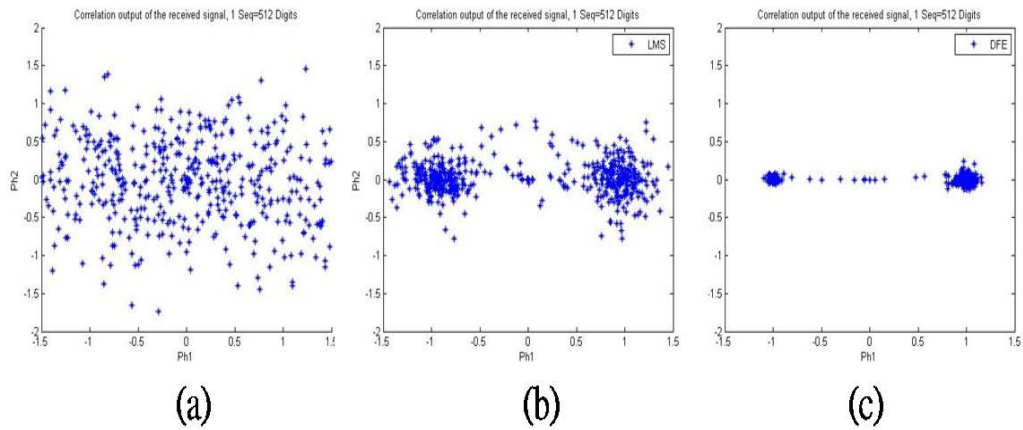


圖 4-50、距離 150 公尺解調狀況，使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線  
性(c)非線性

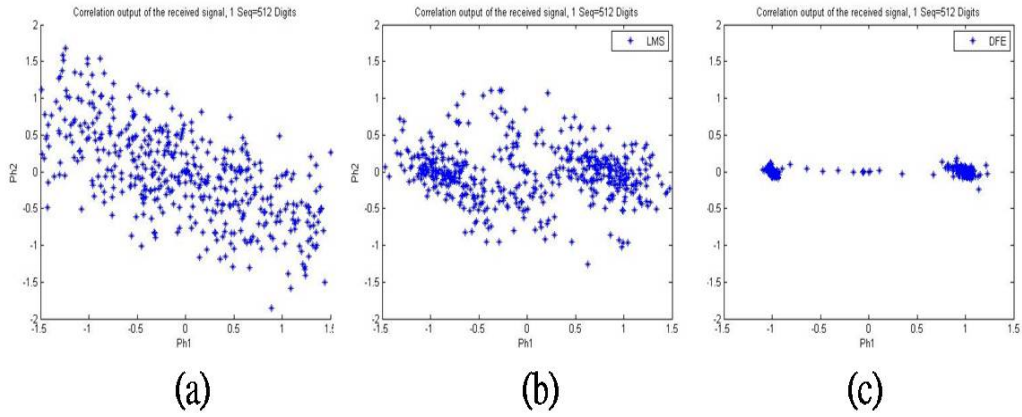


圖 4-51、距離 190 公尺解調狀況，使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線性(c)非線性

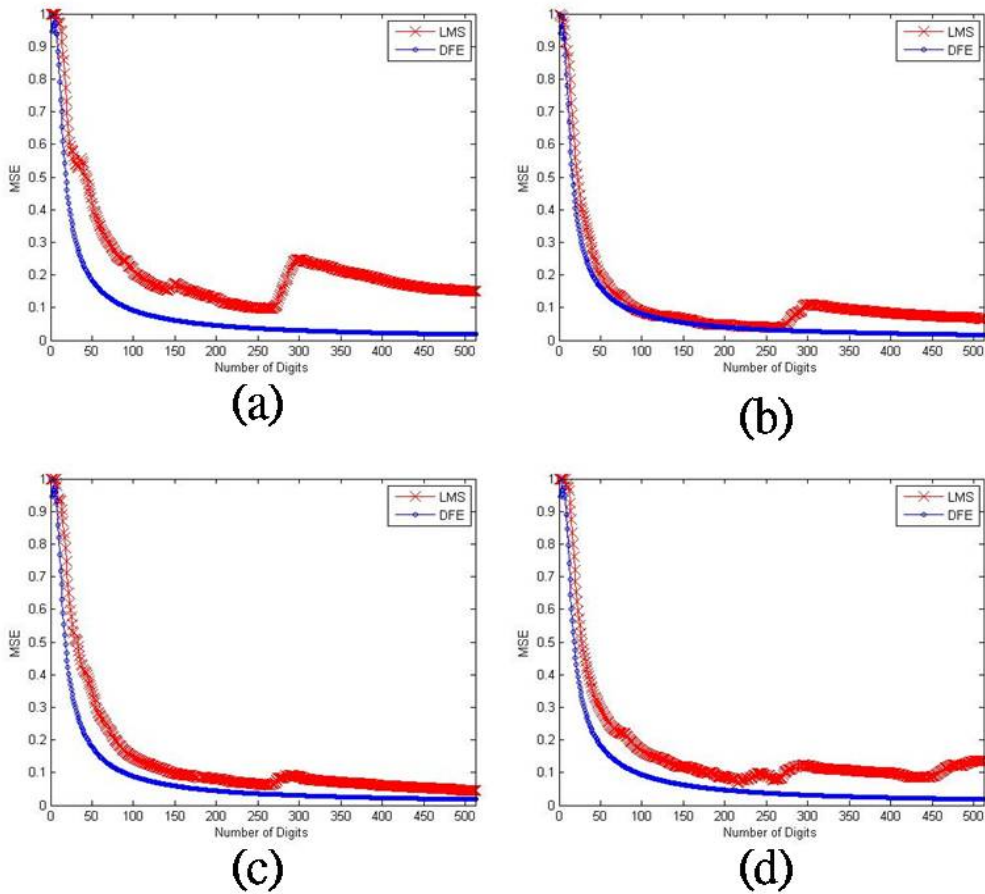


圖 4-52、實驗均方誤差值線性-x 非線性-o (a)50 公尺(b)100 公尺(c)150 公尺 (d)190 公尺

## 4.2.2 點對點實驗-30 sequence

訊號長度為 30 sequence 字元 15360 個，時間 3.84 秒，經過水下通道的訊號，收到不規則的訊號，即使是相同距離沒有收到一樣的訊號，明顯看出各距離接收訊號(圖 4-53(a))，訊號經過帶通濾波器處理，收到訊號能明顯看出(圖 4-53(b))，隨著訊號長度為 30 sequence，收到訊號會受水下通道影響電壓會有忽大忽小(圖 4-53(b3) (b4))，將訊號直接運用等化器作訊號處理，線性處理訊號字元星座圖上能收斂成兩大團(圖 4-54~圖 4-57(b))，非線性處理顯示-1、1 字元上(圖 4-54~圖 4-57(c))，線性會隨著收到訊號的大小，影響到下一個 sequence 的錯誤率，曲線會忽大忽小的，非線性誤碼率則在第一個 sequence 出現錯誤，之後 sequence 沒出現錯誤，呈現一直遞減的曲線(圖 4-58)，相對地在計算時間上，非線性隨著計算量大，花費時間越久。

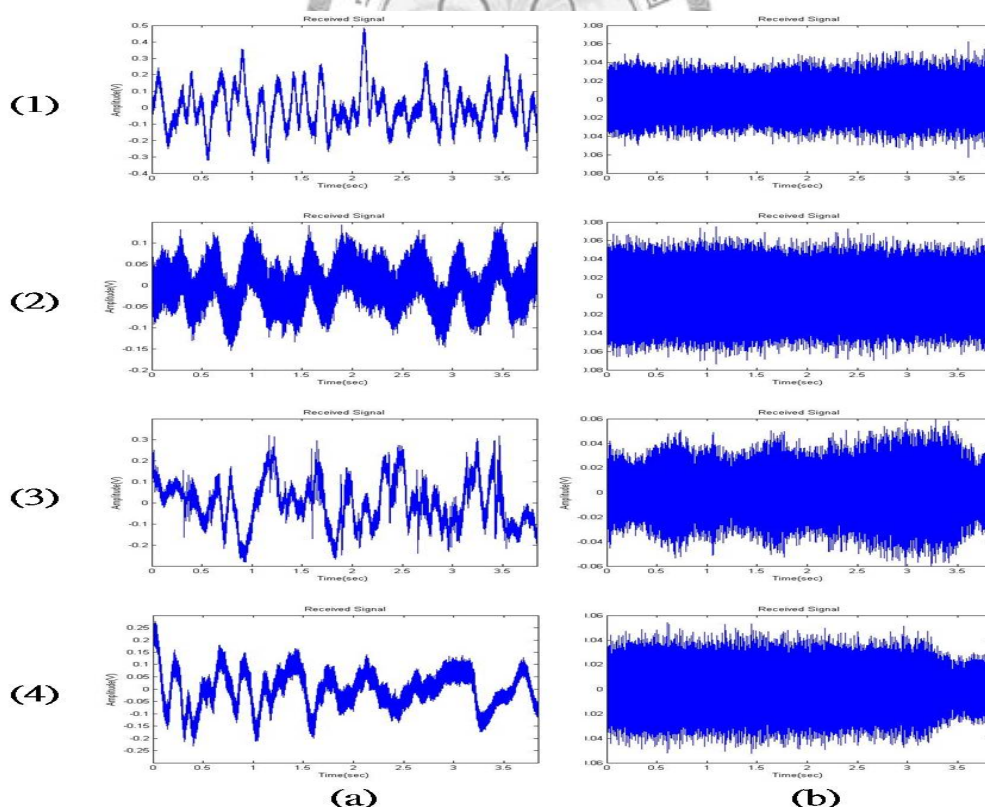


圖 4-53、接收訊號(1)(2)(3)(4)分別表示為傳輸距離為 50 公尺、100 公尺、150 公尺、190 公尺，(a)原始訊號(b)經帶通濾波器(頻率 6K~10K)訊號

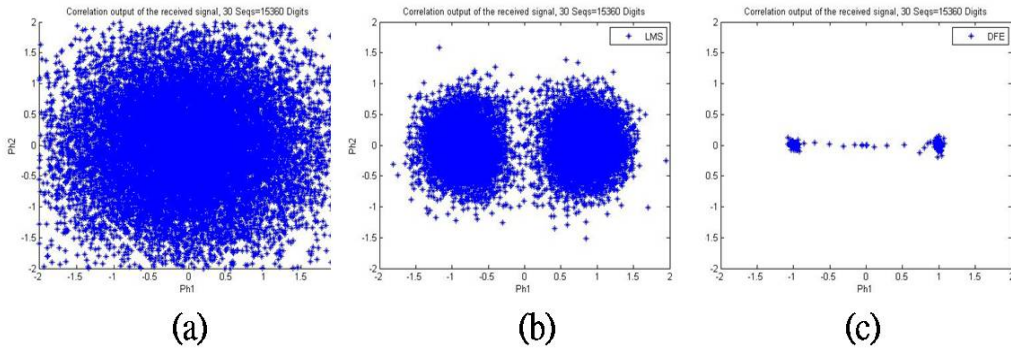


圖 4-54、距離 50 公尺解調狀況，使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線性(c)非線性

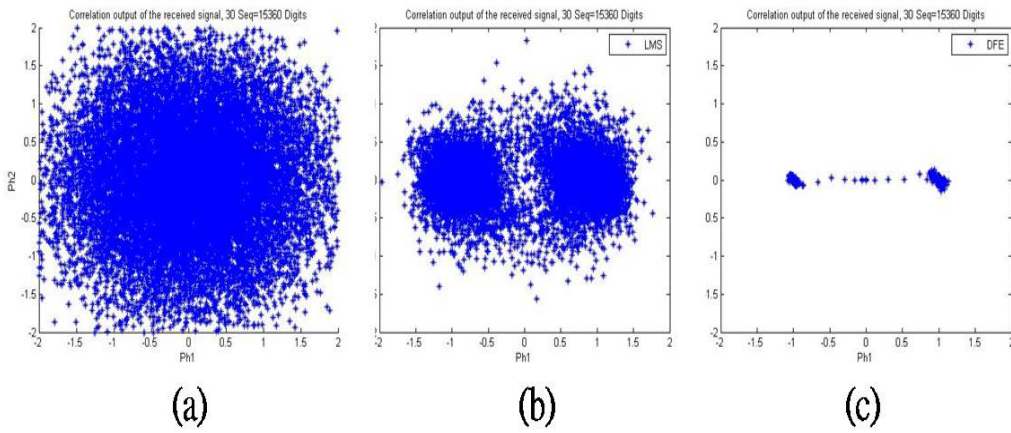


圖 4-55、距離 100 公尺解調狀況，使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線性(c)非線性

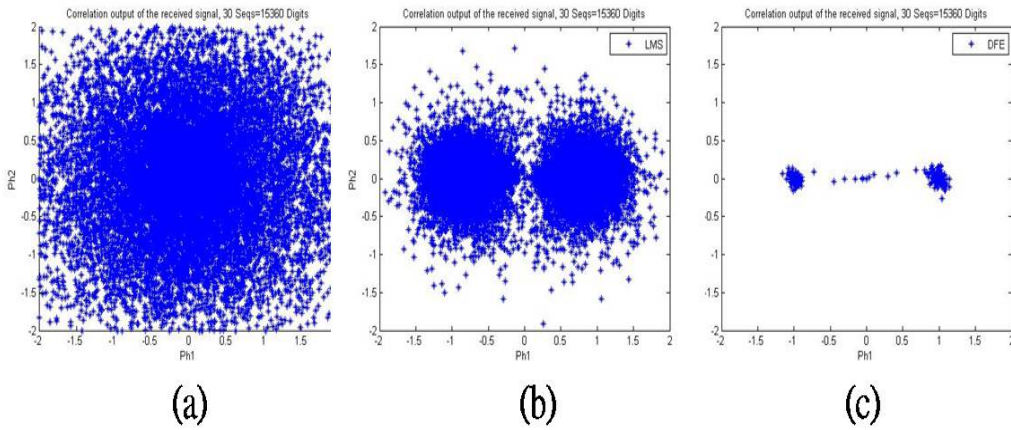


圖 4-56、距離 150 公尺解調狀況，使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線性(c)非線性

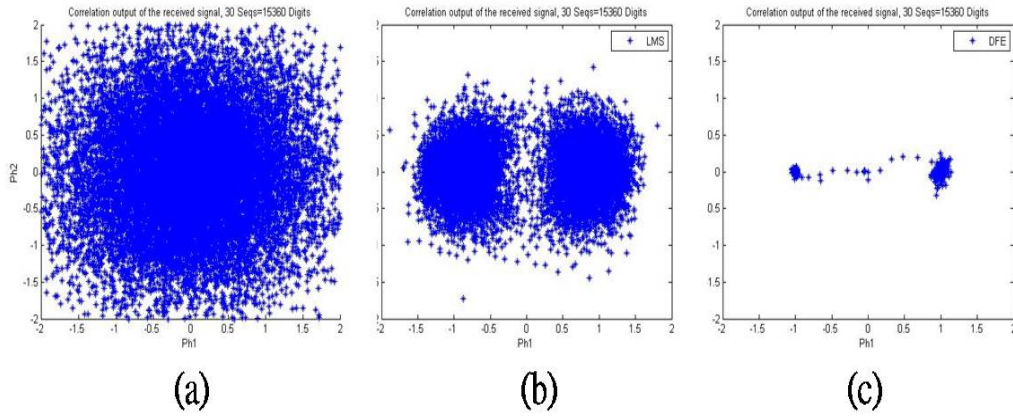


圖 4-57、距離 190 公尺解調狀況，使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線性(c)非線性

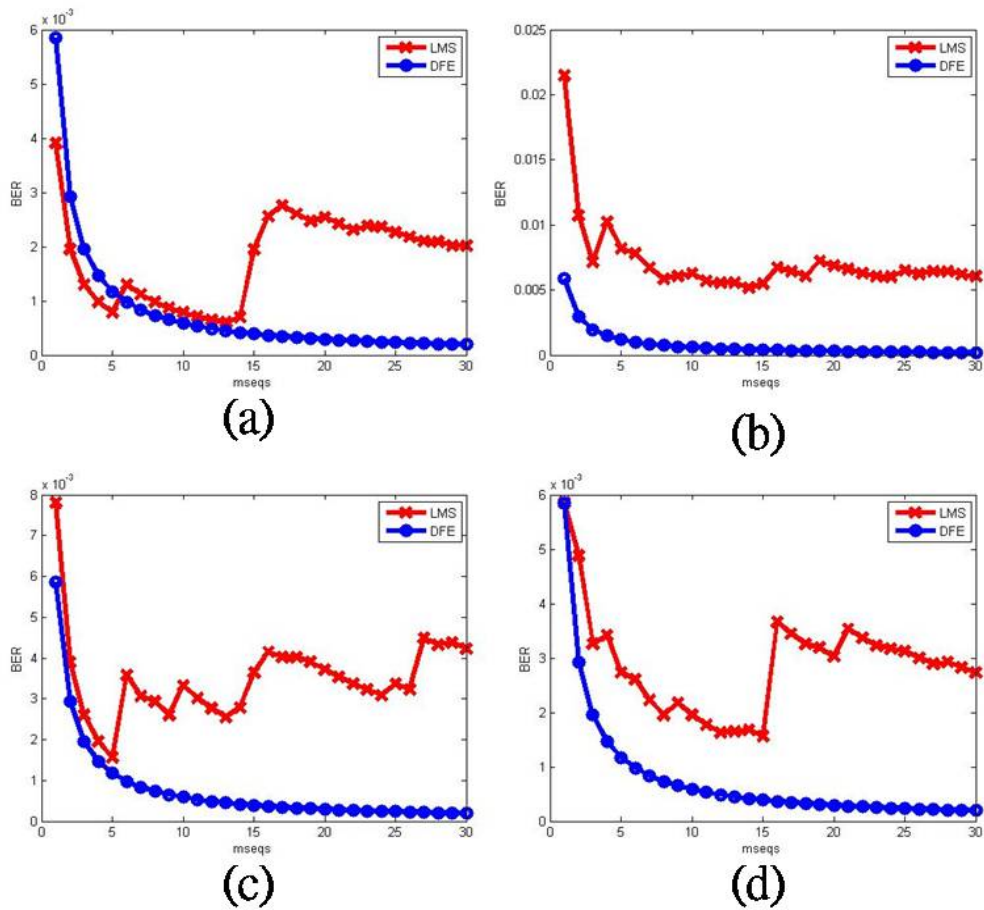


圖 4-58、實驗誤碼率線性-x 非線性-o (a)50 公尺(b)100 公尺(c)150 公尺(d)190 公尺

### 4.3 實驗與模擬驗證

由實驗與模擬的 Ber 作比對，模擬水下通道與實驗的差異性，模擬訊號雜訊為隨機變化，模擬 5 次的 Ber 與實驗數據作比較。

#### 4.3.1 實驗與模擬驗證-1sequence

由發射與接收距離為 50 公尺的數據比對，除了實驗第一筆資料線性錯誤字元為 30，比其他數據過高，實驗與模擬上線性錯誤字元 5~20 個之間，非線性錯誤字元為 1~4 個(表 4-1)，表 4-1~表 4-3 實驗與模擬上，線性錯誤字元 5~20 個之間，非線性錯誤字元在 1~4 個之間，明顯此傳輸距離不會影響到字元錯誤率，且實驗與模擬吻合;表 4-4 實驗第一、三、五筆資料，線性錯誤字元增加至 27 個以上，表示傳輸水下通道距離增加導致錯誤字元更多，但模擬上無法顯示錯誤字元開始增加，可見水下通道的複雜性，通道仍為水下通訊目前需要研究的課題。

距離50m		1		2		3		4		5	
		LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE
實 驗	錯誤字元	30	3	19	3	15	3	8	3	14	4
	錯誤率	0.059	0.006	0.037	0.006	0.029	0.006	0.016	0.006	0.027	0.008
模 擬	錯誤字元	10	3	18	4	9	1	11	3	12	3
	錯誤率	0.02	0.006	0.035	0.008	0.018	0.002	0.021	0.006	0.023	0.006

表 4-1、距離 50 公尺，實驗與模擬錯誤率比對

距離100m		1		2		3		4		5	
		LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE
實 驗	錯誤字元	11	3	12	3	18	3	16	3	17	2
	錯誤率	0.021	0.006	0.023	0.006	0.035	0.006	0.031	0.006	0.033	0.004
模 擬	錯誤字元	7	2	12	1	12	3	17	3	12	1
	錯誤率	0.014	0.004	0.023	0.002	0.023	0.006	0.033	0.006	0.023	0.002

表 4-2、距離 100 公尺，實驗與模擬錯誤率比對

距離150m	1		2		3		4		5		
	LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE	
實驗	錯誤字元	9	3	10	3	16	3	15	3	18	3
	錯誤率	0.018	0.006	0.02	0.006	0.031	0.006	0.029	0.006	0.035	0.006
模擬	錯誤字元	11	4	14	3	6	1	20	4	9	2
	錯誤率	0.021	0.008	0.027	0.006	0.012	0.002	0.039	0.008	0.018	0.004

表 4-3、距離 150 公尺，實驗與模擬錯誤率比對

距離190m	1		2		3		4		5		
	LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE	
實驗	錯誤字元	36	3	9	3	31	3	18	3	27	3
	錯誤率	0.07	0.006	0.018	0.006	0.061	0.006	0.035	0.006	0.053	0.006
模擬	錯誤字元	13	3	16	3	14	3	18	3	18	4
	錯誤率	0.025	0.006	0.031	0.006	0.027	0.006	0.035	0.006	0.035	0.008

表 4-4、距離 190 公尺，實驗與模擬錯誤率比對

#### 4.3.2 實驗與模擬驗證-30 sequence

30 sequence 經過等化器處理，第一個 sequence 處理錯誤率會最高，之後慢慢修正錯誤，表 4-5 中距離 50 公尺實驗與模擬 30 sequence 錯誤率在一個範圍內，線性錯誤字元 20~40 個左右，非線性為 3、4 個之間，表 4-6~表 4-8 實驗與模擬差異性大，線性模擬錯誤字元仍在 20~40 個之間，實驗則錯誤字元 40~90 個之間，當距離增加由表 4-8 第二、五筆資料觀察，線性錯誤字元到 100~200 個，仍有三筆錯誤字元仍在 40~90 個之間，距離有所影響目前此實驗距離為 190 公尺有影響性但不大；實驗與模擬上，非線性依舊錯誤字元為 3、4 個，能收到訊號解調狀況很好。實驗與模擬水下通道仍有改善空間。

距離50m	1		2		3		4		5		
	LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE	
實驗	錯誤字元	31	3	24	3	28	3	33	4	46	3
	錯誤率	0.00202	0.0002	0.00156	0.0002	0.00182	0.0002	0.00215	0.00026	0.00299	0.0002
模擬	錯誤字元	27	3	31	3	26	3	28	4	30	3
	錯誤率	0.00176	0.0002	0.00202	0.0002	0.00169	0.0002	0.00182	0.00026	0.00195	0.0002

表 4-5、距離 50 公尺，實驗與模擬錯誤率比對



距離100m		1		2		3		4		5	
		LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE
實 驗	錯誤字元	93	3	52	4	42	3	63	3	74	3
	錯誤率	0.00605	0.0002	0.00339	0.00026	0.00273	0.0002	0.0041	0.0002	0.00482	0.0002
模 擬	錯誤字元	22	3	25	3	36	3	27	3	31	4
	錯誤率	0.00143	0.0002	0.00163	0.0002	0.00234	0.0002	0.00176	0.0002	0.00202	0.00026

表 4-6、距離 100 公尺，實驗與模擬錯誤率比對

距離150m		1		2		3		4		5	
		LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE
實 驗	錯誤字元	88	3	65	3	68	4	57	4	84	3
	錯誤率	0.00573	0.0002	0.00423	0.0002	0.00443	0.00026	0.00371	0.00026	0.00547	0.0002
模 擬	錯誤字元	29	3	26	3	25	4	33	2	19	3
	錯誤率	0.00189	0.0002	0.00169	0.0002	0.00163	0.00026	0.00215	0.00013	0.00124	0.0002

表 4-7、距離 150 公尺，實驗與模擬錯誤率比對

距離190m		1		2		3		4		5	
		LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE	LMS	DFE
實 驗	錯誤字元	42	3	258	4	41	3	54	3	126	3
	錯誤率	0.00273	0.0002	0.0168	0.00026	0.00267	0.0002	0.00352	0.0002	0.0082	0.0002
模 擬	錯誤字元	14	3	31	3	25	3	13	3	30	3
	錯誤率	0.00091	0.0002	0.00202	0.0002	0.00163	0.0002	0.00085	0.0002	0.00195	0.0002

表 4-8、距離 190 公尺，實驗與模擬錯誤率比對

#### 4.4 淡水河實驗-點對移動載台

研究點對移動載台的通訊實驗，以圖 4-46 聲源 0 點為圓心，在距離 50 公尺、100 公尺(圖 4-46，A1、A2)為半徑，作點對移動載台實驗，載台移動速度為 5 節，接收訊號是否有受影響，明顯受移動載台的馬達噪音所影響，仍正常收到訊號但變的很吵雜，從時域圖上看，距離 50 公尺、100 公尺的訊號看不出來(圖 4-59(a)(b)未濾波)，需放大時域訊號才知接受訊號狀況，通過帶通濾波器可明顯看出 BPSK 訊號(圖 4-59(a)(b)濾波)。經過濾波器與未經過濾波器解調情況(圖 4-60、61)，在均方誤差值上，線性在濾波後明顯均方誤差值大，未濾波涵蓋很

多雜訊會影響錯誤，非線性曲線濾波與未濾波為一樣，線性只差 1、2 個錯誤字元，非線性錯誤字元是一樣(圖 4-62)。濾波器的功用是必要，如果沒經過濾波器在訊號上是很難處理的。

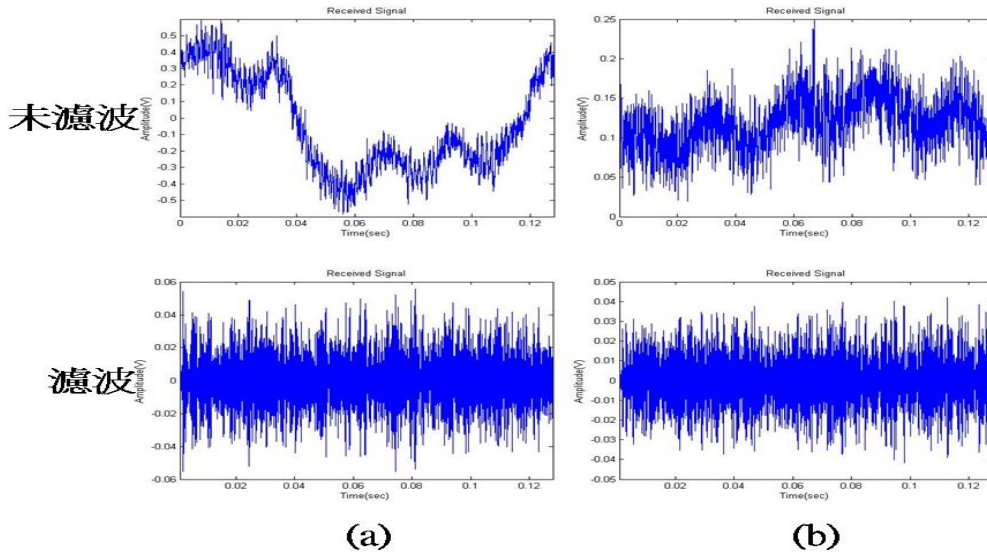


圖 4-59、接收訊號(a)距離聲源 50 公尺(b) 距離聲源 100 公尺

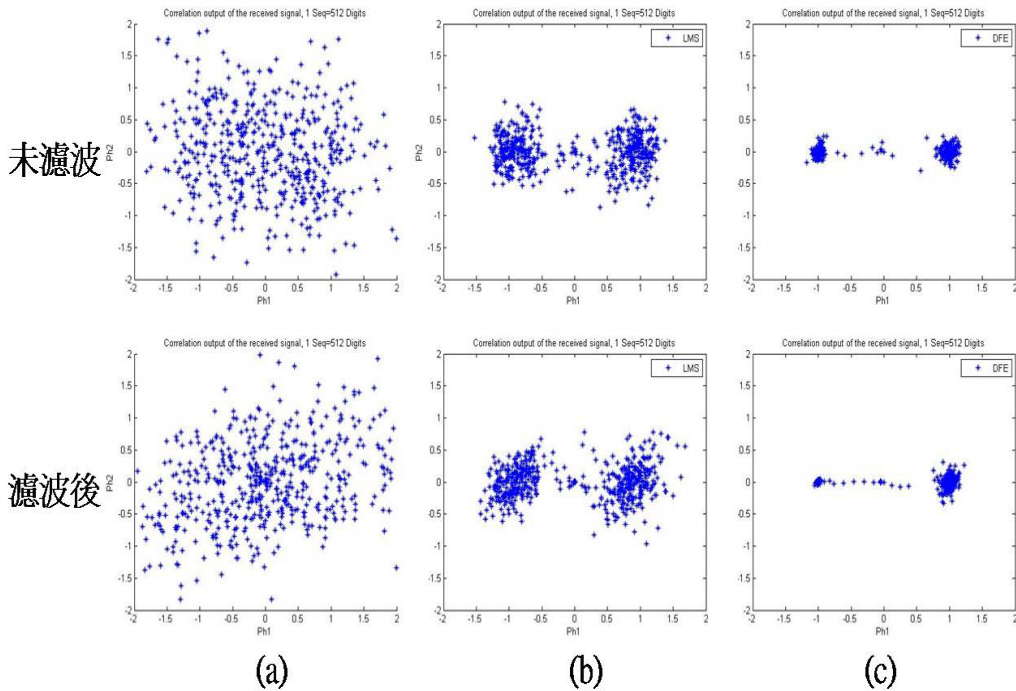


圖 4-60、距離 50 公尺解調狀況，使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線性(c)非線性

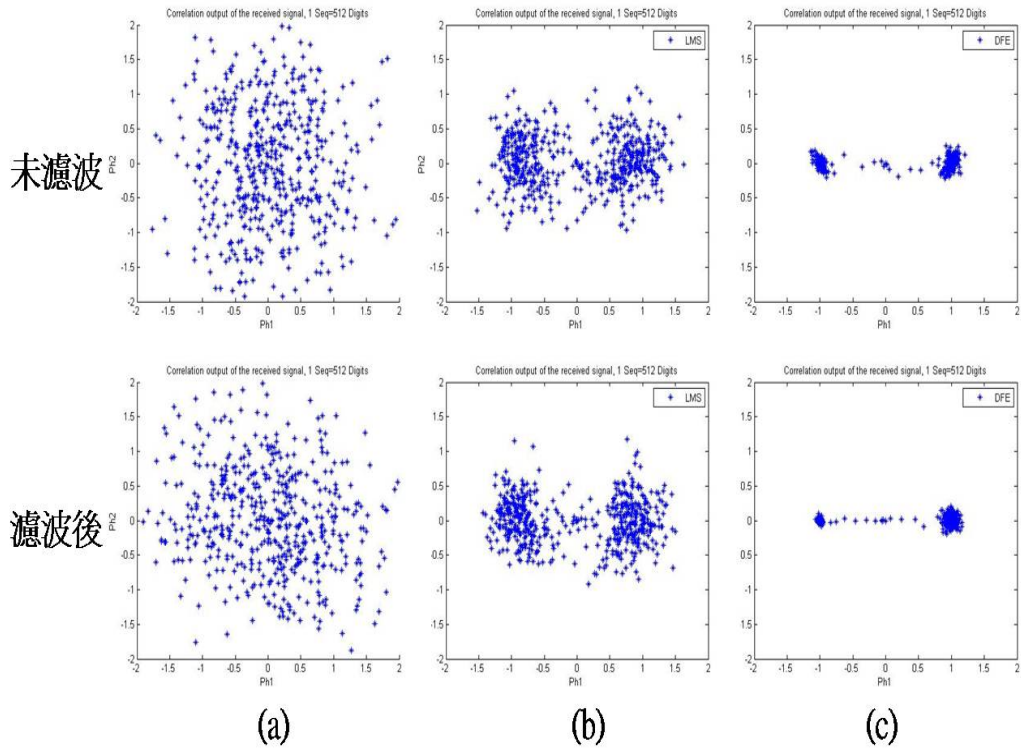


圖 4-61、距離 100 公尺解調狀況，使用不同等化器解調(a)無使用等化器(b)線性(c)非線性

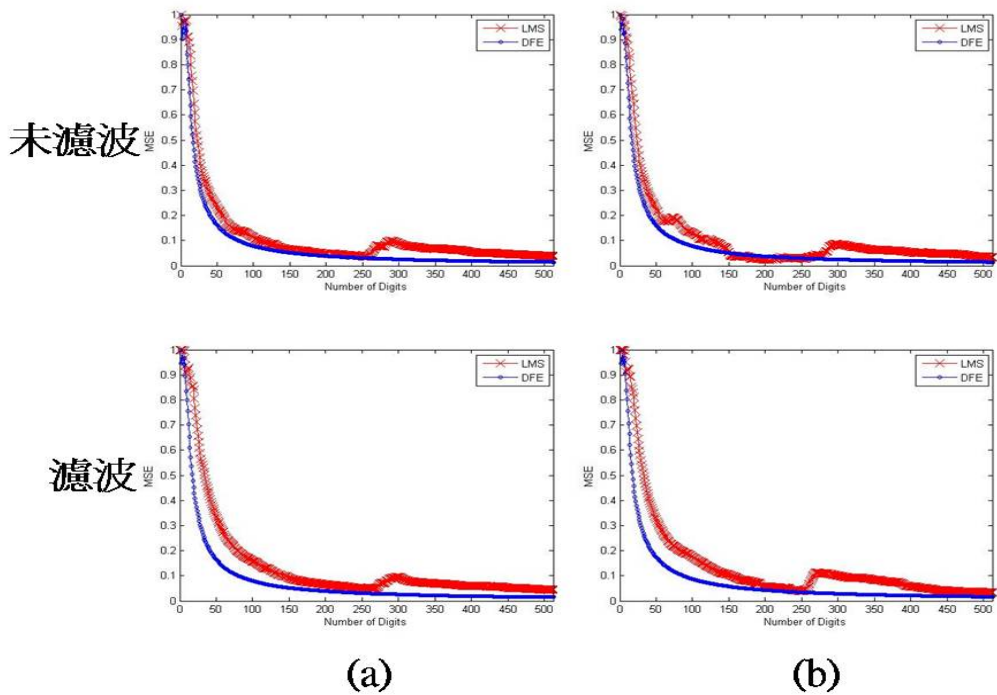


圖 4-62、實驗均方誤差值，線性-x 非線性-o (a)50 公尺(b)100 公尺

## 第五章 結論與未來工作

本論文在淡水河流域作水下通訊實驗，為了確定淡水河為長期通訊研究地點，針對淡水河的水下通道主要作 3 部份研究，一、先利用高斯波束法理論模擬水下通道解調情形。二、將實際量測到淡水河的訊號作分析，確定淡水河為長期研究地點。三、將模擬與實驗數據作比對，驗證模擬是否與實驗符合。所以在淡水河流域發射 BPSK 訊號(主要載波頻率 8 KHz、頻寬為 4KHz、傳輸率為 4Kbit/s)，訊號長度分為兩種：(1)0.128 秒(1sequence 512 個字元)，(2)3.84 秒(30 sequence 15360 個字元)，傳輸距離分別為 50 公尺、100 公尺、150 公尺、190 公尺，經此傳輸距離收到淡水河通訊訊號。將收到通訊訊號用三種方式處理：1、當訊號呈現不規律時，利用帶通濾波器(頻率為 6KHz~10KHz)去除干擾的雜訊，得到主要訊號。2、當訊號經由帶通濾波器解調後，訊號位元散佈在星座圖上而無法辨識為原先位元時，利用線性 LMS 等化器作處理，得到解調狀況改善。3、因線性等化解調有限且誤碼率偏高，在使用非線性等化作處理，得到通訊結果，將此結果確定淡水河適合長期通訊地點。

從第二部份研究的實驗分析結果得到二項，一、訊號時間為 0.128 秒(1 sequence)，線性等化解調錯誤率為 $10^{-2}$ ，非線性等化解調錯誤率為 $10^{-3}$ 。二、訊號時間為 3.84 秒(30 sequence)，線性錯誤率在 $10^{-3}$ 之間，有兩次錯誤率達到 $10^{-2}$ ，而非線性錯誤率在 $10^{-4}$ 之間。將第二項非線性等化處理結果(傳輸率為 4 Kbit/s，錯誤率為 $10^{-4}$ )與遙測訊號需求相比(傳輸率為 1~10 Kbit/s，錯誤率為 $10^{-3}$ ~ $10^{-4}$ )，明確顯示分析訊號 BPSK 結果符合通訊遙測訊號的要求，淡水河確實適合作為長期通訊研究地點。

從第三部份模擬與實驗驗證，依照二種訊號比對結果：(1)訊號長度為 1 sequence 時，實驗與模擬錯誤率，線性皆在 $10^{-2}$ 之間，非線性皆在 $10^{-3}$ 之間，但當傳輸距離拉至 190 公尺，實驗線性等化處理出現 3 次錯誤率高的情況，而模擬的錯誤率並沒有像實驗有錯誤率偏高情形。結果顯示時間長度為 1 sequence，模擬對傳輸距離 150 公尺以內有準確性，傳輸距離 190 公尺開始出現誤差大情況。(2)訊號長度為 30 sequence 時，實驗與模擬確實在線性錯誤率上有所差距，模擬還無法將訊號模擬成實驗所受時變影響而有忽大忽小的電壓值，導致整個模擬錯誤率遠低於實驗值；模擬與實驗在非線性等化呈現錯誤率一樣情形，是由於非線性等化多一個迴授機制。將二種訊號結果比對，模擬通訊通道的這一部分仍有待繼續研究

在線性等化分析過程中，會出現二種狀況：(1)1 sequence 線性錯誤率高於 30 sequence 線性錯誤率，是由於等化器在處理過程中，需要有一組訓練序列，經此序列調整等化器權重值運用在下一個訊號序列上，會使錯誤率慢慢降低。(2)會在中段出現錯誤字元代表訓練序列太短，未能調整適當權重值；在非線性等化分析過程中，由於非線性等化有兩種濾波一為迴前另一為迴授，訊號經由兩個濾波器可將錯誤率降至最低，但相對地所計算時間耗費很久；接收系統是透過電池提供電力所組成的系統，記錄器取樣頻率可調至 192KHz，儲存容量到 40GB，確實可以作為通訊上實驗量測的系統。

未來可將水下通訊點對點實驗距離拉長至 1 公里，當距離越長所受到的符間干擾影響越大，再運用非線性等化器是否能收斂，另外也增加點對移動載台的傳輸距離，多長距離致使訊號受載台噪音影響而無法解

調。針對通訊的編碼情形、等化器處理及濾波，能改善其傳遞速率及誤碼率都得再作進一步的研究。期望建構聲源系統透過電池提供發射所需的能量，把系統的聲源端與接收端皆由電池所組成的水下通訊系統，更進一步作移動載台對移動載台的通訊實驗，發展成水下即時通訊系統。



## 參考文獻

1. M.Chitre ,S.Shahabudeen ,M.Stojanovic ,“Underwater Acoustic Communications and Networking:Recent Advances and Future Chanllenges” MarineTechnology Society Journal,2008.
2. L.Berkhovskikh and Y.Lysanov,”Fundamentals of Ocean Acoustics”,New York:Springer,1982.
3. M.Stojanovic,”Recent Advances in High-Speed Underwater Acoustic Communications”IEEE J.Oceanic Eng.,vol.21,pp125-136,1996.
4. R.J.Urick ,”Principles of Underwater Sound ”,3d ed New York:McGraw-Hill,p.129,1983.
5. R.Coates,”Underwater Acoustic Systems” New York:Macmillan Education Ltd.,pp.26-28,1990.
6. M.Stojanovic ,J.A.Captipovic and J.G.Proakis ,”Phase Coherent Digital Communications for Underwater Acoustic Channels,”IEEE J.Oceanic Eng.,vol.19,pp100-111,Jan,1994.
7. M.Stojanovic,J.Catipovic,J.G.Proakis,” Adaptive Multichannel Combining and Equalization for Underwater Acoustic Communications” The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 94, Issue 3, pp.1621-1631, September 1993.
8. M.Stojanovic ,J.A.Captipovic and J.G.Proakis”Reduced-complexity multichannel processing of underwater acoustic communication signals,” J.Acoust.Soc.Amer.,vol.98,no.2,pt.1,pp.961-972,Aug.1995.
9. Quazi and W. Konrad, “Underwater Acoustic Communication,” *IEEE CommMagazine*, pp. 24-29, Mar. 1982.
10. M.Stojanovic,”Underwater Acoustic Communication,” *Wiley Encyclopedia of*

- Electrical and Electronics Engineering, 2004.
11. M.B.van Gijzen,P.A. van Walree,"Shallow-Water Acoustic Communication with High Bit Rate BPSK Signals"OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition Volume 3, page1621-1624 vol.3.
  12. 黃維信,張元櫻,"水下系統多向通訊之研究—應用高斯波束群法建立水下迴響數值模擬系統",國科會成果報告,2004-2006
  13. M. B. Porter and H. P. Bucker, "Gaussian Beam Tracing for Computing Ocean Acoustic Fields", J. Acoust. Soc. Am. 82(4), pp.1349-1359, 1987.
  14. D. B. Kilfoyle and A. B. Baggeroer, "The State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry," *IEEE J.Oceanic Eng.*, vol. 25, no.1, pp. 4-27, 2000
  15. Simon Haykin, "Communication Systems 4th Ed"., John Wiley, 2001.
  16. J.G.Proakis, "Digital Communications", New York, Mc-Graw Hill, 2001.
  17. Z.Zvonar,D.Brady and J. Catipovic,"Adaptive Detection for Shallow Water Acoustic Telemetry with Cochannel Interference" *IEEE J.Oceanic Eng.*, vol. 21, no.4, pp. 528-536,1996.
  18. Simon.Haykin,"Adaptive Filter Theory",Peentice -Hall New Jersey,1991.
  19. D.C. Coll and D.A. George,"A Receiver for Time-Dispersed Pulses," in Conf. Rec.,IEEE communication conference,pp.753-758,1965.
  20. R.W.Lucky,"Techniques for Adaptive Equalization of Digital Communication Systems,"Bell Syst , Tech. J.,vol.45 ,Feb,pp .255-268, 1966.
  21. J.G.Proakis and J. H.Miller , "An Adaptive Receiver for Digital Signaling though Channels with Intersymbol Interference,"*IEEE Trans Inform.Theory* ,vol.IT-15, pp.484-497,July 1969.
  22. Jerald W.Caruthers,"Fundamentals of Marine Acoustics ",Elsevier Oceanography Series.
  23. Robert J.Urick,"Principles of Underwater Sound",McGraw-Hill Book company.
  24. G. V. Frisk,"Ocean and Seabed Acoustics: a Theory of Wave Propagation", Prentice-Hall, NJ, 1994
  25. V. Cerveny, M. M. Popov and I. Psencik, "Computation of Wave Fields in Inhomogeneous Media – Gaussian Beam Approach", *Geophys. J. astr. Soc.* 70,



pp.109-128, 1982.

26. 王崇武, 楊明恩, 宋國士, 張家瑞, 許旻棋, 房振昆, 李朝盛, 臺北市水域活動調查及規劃研究, 民國 97 年. 97、180 頁
27. T.C.Yang, "Differences Between Passive-Phase Conjugation and Decision-Feedback Equalizer for Underwater Acoustic Communications" IEEE J.Oceanic Eng., vol. 29, no.2, April, 2004
28. A.Essebbar, E.Vercelloni, "Simulation of Communication System for Underwater Acoustics", Oceans'95 MTS/IEEE conference, page 1204-1207, vol.2.

