

95-49-7191
MOTC-IOT-94-H2EB002

九十四年度臺北港雷達遙感 波浪監測研究



交通部運輸研究所

中華民國 95 年 3 月

95-49-7191
MOTC-IOT-94-H2EB002

九十四年度臺北港雷達遙感 波浪監測研究

著 者：徐如娟、周宗仁、尹彰、翁文凱、何良勝

交通部運輸研究所

中華民國 95 年 3 月

95

九十四年臺北港雷達遙感波浪監測研究

交通部運輸研究所

GPN : 1009500867

定價 200 元

國家圖書館出版品預行編目資料

臺北港雷達遙感波浪監測研究. 九十四年度 /
徐如娟等著. -- 初版. -- 臺北市：交通部
運研所，民95
面；公分
參考書目：面
ISBN 986-00-4896-7(平裝)

1. 波動 - 臺灣 2. 遙感探測

351.941

95006466

九十四年臺北港雷達遙感波浪監測研究

著者：周宗仁、尹彰、翁文凱、徐如娟、何良勝

出版機關：交通部運輸研究所

地址：臺北市敦化北路 240 號

網址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電話：(04) 26587176

出版年月：中華民國 95 年 3 月

印刷者：

版(刷)次冊數：初版一刷 110 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

定價：200 元

展售處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

國家書坊臺視總店：臺北市八德路 3 段 10 號 B1•電話：(02)25781515

五南文化廣場：臺中市中山路 2 號 B1•電話：(04)22260330

GPN：1009500867

ISBN：986-00-4896-7 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：九十四年臺北港雷達遙感波浪監測研究			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 986-00-4896-7（平裝）	政府出版品統一編號 1009500867	運輸研究所出版品編號 95-49-7191	計畫編號 94-H2EB002
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：何良勝 研究人員：徐如娟 聯絡電話：04.26587125 傳真號碼：04.26571329	合作研究單位：國立臺灣海洋大學 計畫主持人：周宗仁、尹彰、翁文凱 研究人員：林騰威、陳泰宏 地址：基隆市北寧路二號 聯絡電話：02-24622192		研究期間 自 94 年 01 月 至 94 年 12 月
關鍵詞：遙感測量、雷達			
摘要： 為因應臺北港工程規劃之需求，交通部基隆港務局委託本所港灣技術研究中心針對八里、林口海岸區域進行漂沙調查及海氣象與地形變遷監測，以期能確實掌握八里、林口海岸漂沙及海氣象與地形變遷特性。先前本中心曾與臺大海洋所合作研發一套雷達海象觀測作業系統，並設置於臺北港現場進行實測作業。而隨著臺北港之建設，設立於臺北港之雷達測波儀受限於設置高程及防波堤增高影響，在觀測上受限頗多。因此 92 年於沙崙新設一雷達測波站以進行海氣象監測。兩測站同時監測海洋波動現象將有助於消除觀測死角。在本年度研擬將一號站遷移至港務大樓附近的制高點，以恢復原有之功能。而在觀測資料分析方面，本年度研擬用『波數譜』及『波數-頻率譜』（『方向頻譜』）求波場的波高及主方向，及『主成份分析』法找出波場主要成份波的振幅、波長及方向，與現有建置於系統中的分析模式做一比較。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
95 年 3 月	152	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： ☐ 密 ☐ 機密 ☐ 極機密 ☐ 絕對機密 （解密條件：☐ 年 ☐ 月 ☐ 日解密，☐ 公布後解密，☐ 附件抽存後解密， ☐ 工作完成或會議終了時解密，☐ 另行檢討後辦理解密） ■ 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: Remote Sensing of Coastal Waves by Marine Radar at Taipei Harbor in 2005			
ISBN(OR ISSN) ISBN 986-00-4896-7 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009500867	IOT SERIAL NUMBER 95-49-7191	PROJECT NUMBER 94-H2EB002
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu, Yung-Fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Ho, Liang-Shang PROJECT STAFF: Hsu, Ju-Chuan PHONE: (04) 26587125 FAX: (04) 26561329			PROJECT PERIOD FROM January 2005 TO December 2005
RESEARCH AGENCY: National Taiwan Ocean University PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chung-Ren Chou, J.Z. Yim, W. K. Weng PROJECT STAFF: T.W. Lin, T.H. Chen ADDRESS: 2, PEI-NING RD., KEELUNG 202, Taiwan, R.O.C. PHONE: (02) 24622192 #6126			
KEY WORDS: Remote sensing, Radar, X-band			
ABSTRACT: In order to fulfill the requirements of environmental impact assessments as well as engineering planning of Taipei Harbor, the Port Authority of Keelung Harbor contracted Harbor and Marine Technology Center a long-term program aimed at monitoring the evolution of the nearby coastal environments of Taipei Harbor. The task of remote sensing of ocean waves by Radar is later developed by IHMT with the Institute of Oceanography, National Taiwan University as a cooperative study between the two institutions, and installed at Taipei Harbor. However, the effect of this Radar wave system is confined on environment day by day. To select another suitable area to set up new Radar wave system is necessary for understanding wave motion within this area. Besides, the images from Radar wave system will be modified by orthographic projection theory, and data collected by this Radar wave system can be compared with wave measurements by a pressure type gauge, which was installed on an offshore pillar.			
DATE OF PUBLICATION March 2006	NUMBER OF PAGES 152	PRICE 200	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目 錄

中文摘要.....	
英文摘要.....	
目錄.....	
圖目錄.....	
表目錄.....	
第一章 前言.....	1-1
1.1 計畫背景分析.....	1-1
1.2 研究範圍與對象.....	1-2
1.3 計畫工作之進行步驟.....	1-2
第二章 『波數-頻率譜』模式的驗證.....	2-1
2.1 前言.....	2-1
2.2 波數 - 頻率譜.....	2-5
2.3 「波數 – 頻率譜」的物理意義.....	2-6
2.4 「波數 – 頻率譜」與其它形式譜的關係.....	2-9
2.5 從(雷達)影像計算「波數 – 頻率譜」.....	2-11
2.6 模擬波面求取波向及有義波高.....	2-38
第三章 雷達影像分析.....	3-1
3.1 前言.....	3-1
3.2 灰階化.....	3-2
3.3 影像濾波.....	3-6
3.3.1 低通濾波(Low Pass-Filter).....	3-6
3.4 雷達影像分析.....	3-7
3.4.1 有義波高.....	3-7

3.4.2 主波向.....	3-11
3.5 結果分析.....	3-13
第四章 利用『主成份分析』擷取雷達影像資訊.....	4-1
4.1 前言.....	4-1
4.2 理論敘述.....	4-2
4.2.1 一些有關數學的部份.....	4-2
4.2.2 複數經驗正交函數.....	4-6
4.3 解析及討論.....	4-7
4.3.1 理論波場的解析結果.....	4-7
4.3.2 討論.....	4-12
4.4 結論.....	4-22
第五章 儀器及網站之遷移.....	5-1
5.1 維護網頁展示系統.....	5-2
5.2 台北港一號雷達測波站之遷移.....	5-2
5.3 雷達測波儀維護保養.....	5-3
第六章 結論.....	6-1
6.1 檢討與改進.....	6-1
6.2 研究計畫三年之結果與討論.....	6-1
參考文獻.....	R-1
附錄 A 台北港雷達搬遷作業.....	A-1
附錄 B 雷達測波儀維護保養情形.....	B-1
附錄 C 期末報告簡報.....	C-1
附錄 D 期中報告審查意見表.....	D-1
附錄 E 期末報告審查意見表.....	E-1

圖 目 錄

圖 2.1	有相同頻率的訊號 (Dudgeon 和 Mersereau,1984).....	2-7
圖 2.2	有相同速度的訊號 (Dudgeon 和 Mersereau,1984).....	2-8
圖 2.3	有相同行進方向的訊號 (Dudgeon 和 Mersereau,1984)...	2-8
圖 2.4	模擬規則波平面圖.....	2-12
圖 2.5	二維波數譜起伏圖(relief).....	2-13
圖 2.6	二維波數譜立體圖.....	2-13
圖 2.7	Stokes 二階有限振幅波二維波數譜起伏圖(relief).....	2-14
圖 2.8	Stokes 二階有限振幅波二維波數譜立體圖.....	2-15
圖 2.9	Stokes 三階有限振幅波二維波數譜起伏圖(relief).....	2-15
圖 2.10	Stokes 三階有限振幅波二維波數譜立體圖.....	2-16
圖 2.11	Stokes 三階有限振幅波二維波數譜輪廓圖.....	2-16
圖 2.12	單方向不規則波水面變化。(模擬條件 : Bretschneider-Mitsuyasu 頻譜).....	2-18
圖 2.13	同圖 2.12。單點採樣結果.....	2-19
圖 2.14	將波數 – 頻率譜對頻率積分後所得波數譜的立體圖。模擬條件同圖 2.12。.....	2-20
圖 2.15	將波數 – 頻率譜對頻率積分後所得波數譜的輪廓圖。模擬條件同圖 2.12。.....	2-21
圖 2.16	將波數 – 頻率譜對頻率積分後所得波數譜的立體圖。模擬條件同圖 2.12。.....	2-21
圖 2.17	將波數 – 頻率譜對頻率積分後所得波數譜的立體圖。(模擬條件 : JONSWAP 頻譜。).....	2-22
圖 2.18	三種不同方式取得的頻譜(目標、單點取樣、對波數–	2-23

頻率譜積分頻譜)比對圖。模擬條件同圖 2.12。	
圖 2.19 以 Pierson-Moskowitz 為目標頻譜的模擬結果。其它模擬條件同圖 2.12。	2-25
圖 2.20 以 JONSWAP 為目標頻譜的模擬結果。其它模擬條件同圖 2.12。	2-26
圖 2.21 以 Pierson-Moskowitz 為目標頻譜波數譜的立體圖。其它模擬條件同圖 2.12。	2-27
圖 2.22 以 JONSWAP 為目標頻譜波數譜的立體圖。其它模擬條件同圖 2.12。	2-28
圖 2.23 Bretschneider-Mitsuyasu 頻譜模擬的結果。	2-29
圖 2.24 以 Bretschneider-Mitsuyasu 為目標頻譜模擬後三種頻譜的比對圖。其它模擬條件同圖 2.23。	2-30
圖 2.25 以 Pierson-Moskowitz 為目標頻譜模擬後三種頻譜的比對圖。其它模擬條件同圖 2.23。	2-31
圖 2.26 以 JONSWAP 為目標頻譜模擬後三種頻譜的比對圖。其它模擬條件同圖 2.23。	2-32
圖 2.27 水面變化.....	2-33
圖 2.28 類影像畫面	2-33
圖 2.29 任一點之時間序列	2-34
圖 2.30 目標頻譜模擬後三種頻譜的比對圖.....	2-35
圖 2.31 二維波數譜圖.....	2-36
圖 2.32 『分散(關係)殼』的示意圖.....	2-37
圖 2.33 由理論波面計算有義波高結果比較圖.....	2-39
圖 2.34 由理論波面計算主波向結果比較圖.....	2-41
圖 3.1 雷達影像分析作業流程圖.....	3-1
圖 3.2 雷達回波之彩色影像的結果.....	3-2

圖 3.3	雷達回波之灰階影像（一般轉換公式）的結果.....	3-3
圖 3.4	雷達回波的彩色 RGB 色板及灰階（一般轉換公式）色板變化的結果.....	3-4
圖 3.5	雷達回波之灰階影像（修正後轉換公式）.....	3-5
圖 3.6	雷達回波的灰階（一般轉換及修正後轉換公式）色板變化的結果.....	3-5
圖 3.7	各月迴歸線圖.....	3-7
圖 3.8	總迴歸曲線圖.....	3-8
圖 3.9	雷達影像取樣位置圖.....	3-9
圖 3.10	截取波面放大圖.....	3-10
圖 3.11	臺北觀測樁之位置座標定位圖.....	3-10
圖 3.12	取二倍標準差截取圖.....	3-10
圖 3.13	截取後迴歸曲線圖(二倍標準偏差，資料剩餘 96.93%)..	3-11
圖 3.14	各月雷觀影像轉換得的有義波高平均值與觀測樁有義波高平均值群組直條圖.....	3-11
圖 4.1	目標頻譜的立體圖.....	4-8
圖 4.2	T = 64 秒時的水面變化.....	4-9
圖 4.3	由第一個『主成份』所構成的海面變化.....	4-9
圖 4.4	由第二個『主成份』所構成的海面變化.....	4-10
圖 4.5	由第三個『主成份』所構成的海面變化.....	4-11
圖 4.6	由第十個『主成份』所構成的海面變化.....	4-11
圖 4.7	由第十八個『主成份』所構成的海面變化.....	4-12
圖 4.8	保留各個時間序列本身變異後第一個『主成份』所構成的海面變化.....	4-14
圖 4.9	保留各個時間序列本身變異後第二個『主成份』所構	4-15

成的海面變化.....	
圖 4.10 保留各個時間序列本身變異後第四個『主成份』所構成的海面變化.....	4-15
圖 4.11 目標頻譜的立體圖(JONSWAP, $f_p = 0.1$ Hz, $S_{max} = 30$, $H_s = 2.50$ m).....	4-17
圖 4.12 由第一個『主成份』所構成的海面變化圖.....	4-17
圖 4.13 由第四個『主成份』所構成的海面變化圖.....	4-18
圖 4.14 由第七個『主成份』所構成的海面變化圖.....	4-18
圖 4.15 第一個『主成份』的相位在時間領域的演變.....	4-20
圖 4.16 第四個『主成份』的相位在時間領域的演變.....	4-21
圖 4.17 第七個『主成份』的相位在時間領域的演變.....	4-21
圖 5.1 台北港二號測站即時顯示雷達遙測波浪圖像網頁.....	5-1
圖 5.2 台北港一號測站即時顯示雷達遙測波浪圖像網頁.....	5-2
圖 5.3 台北港二號測波站最近 72 小時內逐時波高記錄時序圖	5-2

表 目 錄

表 2.1	誤差百分率表.....	2-40
表 3.1	各月標準偏差及其總平均值.....	3-9
表 3.2	雷達影像主方向分佈表.....	3-12
表 3.3	觀測樁主方向分佈表.....	3-12
表 3.4	雷達及觀測樁主波向及有義波高季平均比較表.....	3-13
表 3.5	雷達主波向及有義波高季平均表.....	3-13
表 4.1	各個主成份序秩、所含變異量、以及佔全部變異量百分比.....	4-13
表 4.2	各個主成份序秩、所含變異量、以及佔全部變異量百分比(保留各個時間序列本身變異後的結果).....	4-16
表 4.3	各個主成份序秩、所含變異量、以及佔全部變異量百分比.....	4-19
表 5.1	雷達測波儀及截取資料電腦系統之維護保養管理計畫表.....	5-3

第一章 前言

1.1 計畫背景分析

從事海事工程之規劃、設計時，確實掌握現場海氣象資料為此項工程成敗之重要關鍵因素之一，而近年來，隨著國內海洋科技的進步與對海洋環境之重視，各項重大海事工程之建設除需了解其安全性外，亦須對其週遭之環境影響與變化進一步了解，並以研擬因應之措施，以期能將該項工程所引起對環境之衝擊降至最低。也因此臺北港建港之初，交通部基隆港務局即委託本所港灣研究中心辦理「八里、林口海岸漂沙調查及海氣象與地形變遷四年監測計畫」。本中心為國內對海事工程專門研究之行政機構，除需執行政府政策與命令外，並負有開發海事工程新技術之使命，因此在接辦臺北港監測計畫時，除於淡水河口設置固定樁及觀測儀器，以蒐集該海域之海氣象資料，同時與臺大海研所合作開發雷達遙測波浪之技術，並與固定樁上之觀測資料進行比對，以檢討雷達測波之可行性。該計畫已執行完畢，並獲至良好之結果。

有關應用雷達從事波浪遙測方面之研究相當早，如井島等(1964)、Wright 等(1965)皆曾利用船用雷達遙測海洋波動現象，雷達測波之原理主要為利用雷達所發射出的電磁波觸及海面時，將因海面波動起伏所構成之粗糙面而產生散射作用。其散射強度又與海洋表面粗糙結構之物理特性有密切關係。因此可根據雷達之回波訊號來反算、推估海面的波動特性。其優點在於遙測波浪之雷達可設置於環境條件較為穩定之岸上。因此在各項海氣象觀測儀器中，其設置價格較為便宜且維修容易，另一優點為雷達波為面之掃測，所蒐集之波浪資料範圍較廣，有助於了解整個海面波浪變化。尤其在近岸區域波浪易因地形變化而發生變形，雷達測波較諸單點測波儀器更具優勢。但其易受天候影響測波功能與品質，另外雷達測掃範圍與設置角度、回波訊號強弱、影像檔轉換影響等皆可能影響波浪資料分析之品質。凡此種種皆仍有進一步改進之空間。

為因應臺北港二、三期整體擴建工程之需求，同時兼顧海氣象資料須長期監測之連續性，基隆港務局仍委託本所港灣技術研究中心繼續對臺北港海氣象資料進行監測。本次監測期程為期三年。然而隨著建港過程，各項設施陸續施作，原先與臺大海研所合作所設置之雷達測波站逐漸被外擴防波堤遮蔽，本計畫除繼續維持原有雷達測波站之測波功能外，對測波雷達逐漸受遮蔽情況亦一併檢討改進。

1.2 研究範圍與對象

本計畫主要目的在於對臺北港之建港需求提供準確且長期之波浪資料，因此監測之波浪資料應位於臺北港附近之海域海面上，範圍則儘量涵蓋臺北港附近水域。目前本所與臺大海研所合作研發所設置之『臺北港一號雷達測波站』運作正常。但因臺北港的陸續擴建，此測站之回波訊號有被遮蔽的情況。九十二年於臺北港的沙崙地區另外設置一雷達測波站 - 『臺北港二號雷達測波站』，設置方式則以租用雷達方式進行測波。

本年度研擬用『波數譜』及『波數-頻率譜』(『方向頻譜』)求波場的波高及主方向，及『主成份分析』法找出波場主要成份波的振幅、波長及方向，與現有建置於系統中的分析模式做一比較。而在資料處理與展示方面，除對原有資料展示系統，即網頁即時顯示雷達測波圖像繼續維護改進外，另外對於資料之分析進行檢討改進。

1.3 計畫工作之進行步驟

本計畫本年度之研究內容主要包括有現場監測、測波資料分析、維護網頁展示系統、比對雷達測波資料、及臺北港一號雷達測波站之遷移等六項作業。各分項作業之進行步驟分述如下：

1.現場監測作業部分

臺北港一號及二號雷達測波儀將繼續維持每日 24 小時連續作業狀態，以執行海洋波浪長期監測工作。同時將定期(每月)派人赴現場彙整觀測數據。

2.測波資料分析部分

測波資料定期回收後將進行資料備份、統計、能譜及綜合分析，製作波浪動畫以及統計資料繪圖等工作。每月並將處理後之產品以 DAT 磁帶及 CD 光碟片方式寄交港研中心。另外，本年度研擬用『波數譜』及『波數-頻率譜』(『方向頻譜』)求波場的波高及主方向，及『主成份分析』法找出波場主要成份波的振幅、波長及方向，與現有建置於系統中的分析模式做一比較。

3.比對雷達測波資料部分

將雷達遙感監測結果與觀測樁監測結果相互比較驗證，同時檢討其差異原因。

4.維護網頁展示系統部分

網頁即時顯示雷達遙測波浪圖像之作業系統在臺北港測站已建立完成，使用單位可提供透過電腦網路即能獲得有關即時海況之訊息，本計畫將繼續維護、改進網頁內容，並確保網頁展示系統正常工作。另外，新設之沙崙測站亦將建立與臺北港相同之即時展示系統。

5.臺北港一號雷達測波站之遷移

因臺北港的陸續擴建，外廓防波堤的擴建，及物流倉儲區裡的大樓興建，此測站之回波訊號有被遮蔽的情況。擬將此測站遷移至港務大樓附近的制高點，以維持原有之功能。

6. 雷達測波儀維護保養

雷達站的維護皆按時進行，每天利用網路監控，若發生異常現象，皆立即派員到場處理，以維持觀測不中斷。一號雷達站於近日將暫時移至國立臺灣海洋大學，即本研究團隊的所在地進行新系統研究測試，待年底新的海巡署大樓建造完成，再遷回臺北港，在此段時間內仍由二號站繼續監測。

第二章 『波數-頻率譜』模式的驗證

2.1 前言

為瞭解海面上波場的特性，就必需進行量測工作，而量測工作可分成「點」與「面」的量測兩種。「點」的量測 - 就是在固定地點設置觀測儀器，如：波高計、波壓計、浮球等，紀錄海面的變化。因為「儀器」與「物件（海面）」直接接觸，所以可以把這種量測方式稱為「直接量測」。它的好處是儀器的反應就代表通過該定點各種物理量的真實變化，而缺點則是局限於（少數幾個）固定地點的觀測值。另一方面，為了要能瞭解較大範圍的特性，也有學者利用其他方式如：空中（立體）攝影（Cox & Munk, 1954; Stilwell & Pilon, 1974; Sugimori, 1975; Holthuijsen, 1981）、（船用）雷達、衛星等來觀測海面上的變化（Jackson et al., 1985; Young 等人, 1985; Ziemer, 1987; Krogstad & Barstow, 1999）。由於觀測儀器沒有與海面接觸，因此把這種量測方式稱為「間接量測」。優點是可以一次觀測到較大面積的變化，而缺點則是所得到的結果並不是各種現象的真實物理變化量，而是經過某些轉換過程後的結果。而這些轉換過程往往都是含有非線性因素的。

海面上波浪的生成原因有很多，如：風壓、剪力、星球間的萬有引力、地殼移動等等。學者大都認為用頻譜法來分析一個波場比較合理。頻譜理論的基本假設之一是所分析的對象 - 「訊號」 - 是由許多個不同頻率且互不相干的（小）訊號組成的，而這些訊號的頻率都是某個「基頻」的倍數。大多數的學者都認為，可以把海面上的變化當成由許許多多大小不同的、各自擁有自己的頻率（波長）及方向的自由波所造成的。

另一方面，由於海面上的波浪大多是都受到風力的作用產生的，而風多半有一個主要的風向，所以通常海面上的波浪都或多或少地會有一個主要的行進方向。因此，要完整地描述一個海面上波浪能量的

分佈，就應該用三（二）維的能量譜。以往學者常用的一維頻譜，忽略了波浪能量的分佈，因而在估算海岸（洋）構造物所可能承受的波力時往往會造成較保守的估計。

有鑑於此，西方的學者在四十多年前就開始研究所謂的『方向波譜』（Pierson, 1960; Barber, 1963; Longuet-Higgins 等人, 1963）。Mobarek（1965）探討了風波槽裡波場方向性；Simpson（1969）利用電磁式流速儀量測海岸附近的水粒子的流速，另外他也用壓力計測定波壓，利用壓力和速度的自我以及相互相關關係求方向波譜。不過，他討論重點的是風波的成長，而不是波場能量的方向性分佈。

早先，量測方向波譜的時候，大多是在量測地點設置多個測站，再利用這些測站的自我 - 以及相互相關關係求方向波譜。Barber（1963）是第一位提議以儀器陣列來估算波場裡『散佈函數』形式的學者。Longuet-Higgins 等人（1963）則是首次建議採用『傅利葉級數展開法』，或稱為『離散傅利葉級數展開法』（The discrete Fourier expansion method，簡稱 DFE），來估算散佈函數形式的。Borgman（1969, 1979）和 Panicker（1970, 1974）對這個方法做了詳盡的闡述。

雖然『離散傅利葉級數展開法』能夠估算出波場裡波浪能量的大致方向，不過因為：

- A、傅利葉的級數與量測儀器（波高計、波壓計等）的數目有關。如果量測儀器太少了的話，所得到的結果就顯得太粗糙。另一方面，如果裝置了太多量測儀器的話，不但會破壞波場原有的結構，同時花費也會增加。
- B、由於傅利葉級數有正、餘弦函數的關係，以致估算出的散佈函數有時會有負值，而這是沒有物理意義的。

所以現在學者幾乎都不再用這一個方法來估算波場的特性了。近幾年來似乎只偶爾有極少數的學者（Stansberg, 1998）等，還用這方法估算方向波譜。

許多學者都提出估算波場裡波浪能量分佈形式的方法。依照 Benoit 等人(1997)的歸納結果，有：

- A、最大概度估計法 (Maximum Likelihood Method, MLM)
- B、反覆迭代最大概度估計法 (Iterative Maximum Likelihood Method, IMLM)
- C、最大熵值估計法 (Maximum Entropy Method, MEM)
- D、擴張最大熵值法 (Extended Maximum Entropy Principle Method, EMEP)
- E、貝氏參數法 (Bayesian Directional Method, BDM)

一般來說，貝氏參數法 (Hashimoto et al., 1988) 應該是目前所有估算波場中能量分佈方法中最準確的。不過，這個方法計算比較費時。許多學者都探討了這些估算方法的優劣 (Nwogu, 1989a, b; Brissette, 1992; Hashimoto et al., 1994; Benoit et al., 1997; 黃，2003)。

嚴格地說，不論是在量測地點設置多個測站 (Davis & Regier, 1977; Regier & Davis, 1977)，或是利用浮球不同形式的運動 (Mistuyasu et al., 1975; Brissette & Tsanis, 1994) 來估算方向波譜，都是所謂的『點』的量測方式(point measurement)。這種量測方式只能用在變化不大，或是說合乎『遍歷性』(ergodic)假設的波場。如果想要知道變化比較複雜，或是範圍比較大，的波場特性的話，就必需用所謂的『遙測』了。

遙測技術的發展，一般是透過各種雷達的偵測或是採用攝影的方式擷取所需的資料。早在半個世紀前 Cox 和 Munk (1954) 就乘坐飛機，以空中攝影的方式，利用太陽反光的影像估算出海平面的斜率統計值了。Stilwell 和 Pilon (1974)、Sugimori (1975) 等人從相片中估算出方向頻譜。近些年來，隨著遙測技術的進步，很多學者也開始利用衛星探測結果來討論波場的方向性了 (Young et al., 1985; Phillips, 1988)。

一般較常使用的雷達系統包括 SAR (Synthetic Aperture Radar)、SLAR (Side-Looking Aperture Radar) 和 HF (High Frequency Radar)。HF 雷達由於裝置大小的問題，僅適合於架設於地面上使用；SAR 和 SLAR 則已成功的裝置於航空器或衛星上使用以利大範圍的觀測 (Young et al., 1985)。

雖然裝置於航空器或衛星上的雷達可以一次就量測到廣大的海域，但是一方面由於這種設備較為昂貴，另一方面也因為一般的工程都比較靠近海岸地區，同時範圍也比較小，許多學者都開始研究利用船用雷達(nautical radar, Dankert, 2003)或是用 CCD 攝影機拍攝影像 (Jähne et al., 1994; Holland et al., 1997; Dieter, J. 1998; Senet et al., 2000a, b, 2001; Curtis et al., 2002)，並從其中擷取有關海面上波浪能量分佈信息的可能性了。

一張有關海面變化的影像是由許許多多明暗不同的『光點』(pixel)所組成的。每一點的色階與該瞬間波浪表面的斜率有關。一般來說，量測數據進行分析時，

A、『點』的量測紀錄 - 即所謂的『時間序列』，可以分別從時間領域，或是頻率領域著手。前者可以藉著統計得到如二階統計特性 (variance) 則代表影像的偏離 (水面) 的程度；三階統計特性 (skewness) 是討論分佈的對稱性。四階的統計特性是討論分佈的平坦性 (Hahn & Shapiro, 1967) 等等。後者則是把所得到的量測結果當成是由各種不同振幅、頻率的簡諧波的組合。藉著自我相關係數，求取通過這一量測點各個成份波的能量。

B、『面』的量測結果 - 即所謂的『圖像 (時間) 序列』 (picture 或 image sequence)，則也可以分別從空間領域，或是頻率領域著手。前者所得到的空間的 (統計) 結構特性。不過，因為這時有瞬間各點的訊息，所以也可以藉著計算各點的交互相關係數，求取在這一瞬間海面上各種不同波長的分佈。後者則可以得到所謂的波數 - 頻率譜

(wavenumber-frequency spectrum) , 也就是一般所謂的『方向頻譜』。

2.2 波數 - 頻率譜

如果把海面上的波動看成是無數個不同振幅、不同波長、不同頻率、以及不同相位的線性（微小振幅）波在某一個時刻的機率組合的話，那麼就可以把它寫成：

$$\eta(\vec{x}, t) = \eta(x, y, t) = \sum_{j=1}^{\infty} a_j \left\{ \cos \left[k_j x \cos(\theta_j) + k_j y \sin(\theta_j) \right] - \omega_j t + \varepsilon_j \right\} \dots (2.1)$$

其中 a_j 是第 j 個諧頻波的振幅； k_j 是第 j 個諧頻波的波數， $k_j = 2\pi / \lambda$ ， λ 是波長； θ_j 是第 j 個諧頻波的與波浪主行進方向的夾角； ω_j 是第 j 個諧頻波的角頻率， $\omega_j = 2\pi f_j$ ， $f_j = 1/T$ 是頻率； ε_j 是第 j 個諧頻波的隨機相位， $0 \leq \varepsilon_j \leq 2\pi$ 。

兩個測站的交互關係函數是：

$$R(k, \omega) = \overline{\eta(\vec{x}, t_0) \eta(\vec{x} + \vec{r}, t_0 + \tau)} \dots (2.2)$$

其中 $\vec{x} = (x, y)$ 是某個測站的座標， $\vec{r} = (\Delta x, \Delta y)$ 是兩個測站的距離， $\vec{k} = (k_x, k_y) = (k \cos \theta, k \sin \theta) = (k, \theta)$ 是用向量方式表示的波數， $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ ， θ 是波浪行進方向與 x 軸的夾角， τ 是延滯時間。

「波數－頻率譜」提供了一個波場最完整的資訊。它的數學形式是：

$$S(\vec{k}, \omega) = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint R(\vec{r}, \tau) \exp[-(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega\tau)] d\vec{r} d\tau \quad (2.3)$$

或

$$S(k_x, k_y, \omega) = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint R(\Delta x, \Delta y, \tau) \exp[-(k_x \Delta x + k_y \Delta y - \omega\tau)] dk_x dk_y d\tau \quad (2.4)$$

2.3 「波數－頻率譜」的物理意義

Dudgeon 和 Mersereau (1984)指出，對一個基本的訊號來說，(2.5)式代表著一個行進的平面波。如果對三維的頻譜，(2.3)式，做逆(三維)傅利葉轉換的話，可以得到：

$$e(\vec{x}, t) = \exp[j(\omega_0 t - \vec{k} \cdot \vec{x})] \quad (2.5)$$

$$s(\vec{x}, t) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(\vec{k}, \omega) \exp[j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x})] d\vec{k} d\omega \quad (2.6)$$

這就表示，任何訊號 $s(\vec{x}, t)$ 都可以化成(無數個)平面波的組合。如果把向量 $\vec{a}_0$ 定義成：

$$\vec{a}_0 = \frac{\vec{k}_0}{\omega_0} \quad (2.7)$$

的話，那麼，(2.5)式就可以寫成：

$$e(\vec{x}, t) = \exp[j\omega_0(t - \vec{a}_0 \cdot \vec{x})] \quad (2.8)$$

上式表示，可以把基本的訊號 $e(\vec{x}, t)$ 看成一個以 $\frac{1}{|\vec{a}_0|}$ 的速度朝 $\vec{a}_0$ 方向移動的平面波。因為 $|\vec{a}_0|$ 的值等於行進速度的倒數 $\vec{a}_0$ ，Dudgeon 和 Mersereau 指出，(在訊號分析學裡)有時把 $\vec{a}_0$ 稱為『緩慢向量』(slowness vector)。

在 $(\vec{k}, \omega)$ 空間裡的每一點都代表者 $(\vec{x}, t)$ 空間裡的一個有特定方向和頻率的平面波。一般都把頻率 f (或 ω) 當做垂直軸，而把(兩個)波數軸， k_x, k_y ，當成平面座標。對圖 2.1 來說，它表示所有有相同頻率， $\omega = \omega_0$ ，的波都座落在這個 (k_x, k_y) 的切面上。

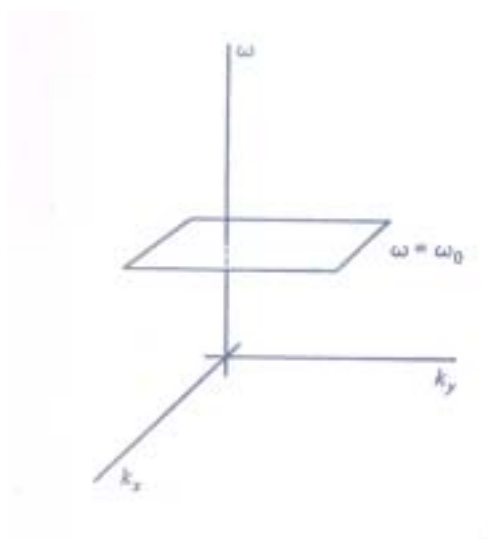


圖 2.1 有相同頻率的訊號 (Dudgeon 和 Mersereau, 1984)

在另一方面，因為 $C = \frac{\omega}{|\vec{k}|}$ ，有相同速度 C 的訊號會座落在一個圓錐的面上(圖 2.2)。另外，由於行進方向在這個頻率－波數圖上是由向量 $\vec{k}$ 的方向來表示的，所有有相同行進方向的訊號會座落在一個垂直於 (k_x, k_y) 平面的平面上(圖 2.3)。

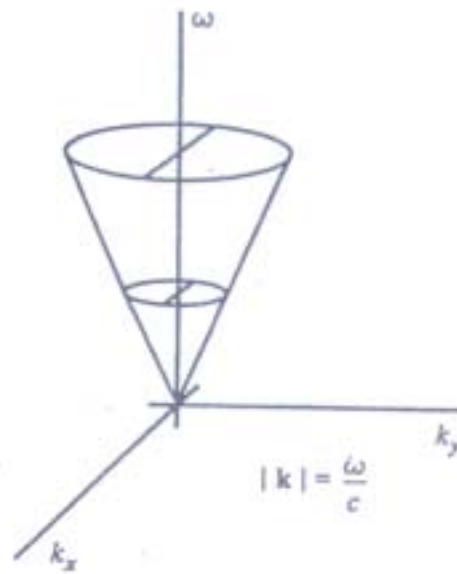


圖 2.2 有相同速度的訊號 (Dudgeon 和 Mersereau, 1984)

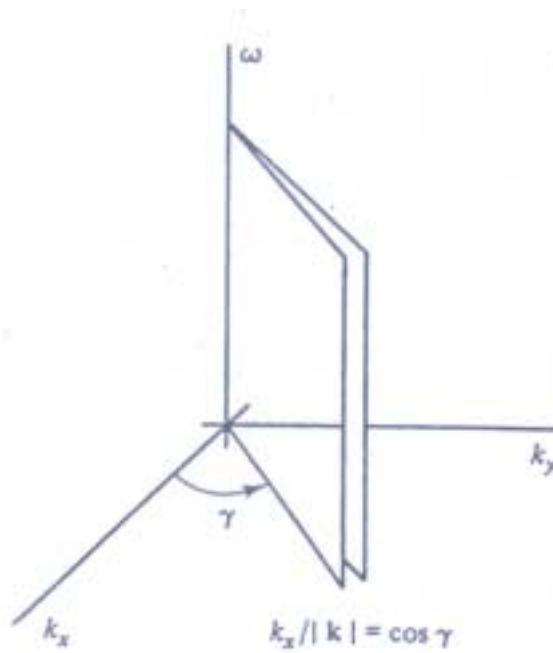


圖 2.3 有相同行進方向的訊號 (Dudgeon 和 Mersereau, 1984)

2.4 「波數－頻率譜」與其它形式譜的關係

前面提到過，一個波場裡所有的訊息都包含在波數－頻率譜裡了。不過，因為它是四維的－一個平面(x 和 y)，時間(頻率)，和水面的變化，所以很難表現在一個(平面的)圖上。在另一方面，為了要和一般點的量測結果此對，學者往往把波數－頻率譜簡化成其它形式的譜。

如果把「波數－頻率譜」寫成 $S(\vec{k}, f) = S(k_x, k_y, f)$ 的形式，那麼，它與一維的頻譜間的關係是：

$$S(f) = \int_{k_y=-\infty}^{\infty} \int_{k_x=-\infty}^{\infty} S(k_x, k_y, f) dk_x dk_y \dots\dots\dots (2.9)$$

$S(f)$ 是一般所稱的頻譜，有時文獻中也把它稱為能譜(energy spectrum)或變異譜(variance spectrum)。它的單位是 $[m^2/Hz]$ 。根據 Ziemer (1987) 的說法，從「波數－頻率譜」裡可以得到兩個波數譜，它們分則是：

不能分辨出波浪行進方向(180° ambiguity)的二維的波數譜：

$$S(k_x, k_y) = \int_{f=-\infty}^{\infty} S(k_x, k_y, f) df \dots\dots\dots (2.10)$$

以及可以分辨出波浪行進方向的二維的波數譜

$$S_+(k_x, k_y) = 2 \int_{f=0}^{\infty} S(k_x, k_y, f) df \dots\dots\dots (2.11)$$

這兩個二維波數譜的單位都是[m⁴/rad]。另外，也可以用極座標的方式來表示二維波數譜，而構成所謂的波數－方向譜：

$$S(\vec{k}, \theta) = |\vec{k}| S(k_x, k_y) \Big|_{\substack{k_x = |\vec{k}| \cos(\theta) \\ k_y = |\vec{k}| \sin(\theta)}} \dots\dots\dots (2.12)$$

波數－方向譜的單位是[m³/rad]。最後，可以利用『分散關係式』來把二維波數譜或波數－方向譜改寫成一般文獻裡常見的(頻率－行進)方向波譜：

$$S(f, \theta) = \left[|\vec{k}| \left(\frac{d\vec{k}}{df} \right) \right] S_+(k_x, k_y) = \left(\frac{d\vec{k}}{df} \right) S(\vec{k}, \theta) \dots\dots\dots (2.13)$$

方向波譜的單位是[m² sec]。(13)式中的 $\left(\frac{d\vec{k}}{df} \right)$ 可以用(線性)的分散關係式求得。Ziemer (1987)指出，這個項的表達式是：

$$\left(\frac{d\vec{k}}{df} \right) = \frac{2 \sinh(2kh)}{\sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh) [\sinh(2kh) + 2kh]}} \dots\dots\dots (2.14)$$

波數－頻率譜 $S(k_x, k_y, f)$ 的單位則是[m⁴sec/rad]。必需要說明的是，各類的『譜』都是基於一個基本的假設才能利用傅利葉轉換求出來的。這個其本假設就是所考慮的對象－海面的變化，是合乎所謂的『均質』(homogeneous)的假設，對一個均質的海面來說，不論在那一點量測，『單位面積』內所包含的能量應該都是一樣的。也就是由於這個緣故，各種不同形式的『譜』之間的關係才能存在。

2.5 從(雷達)影像計算「波數－頻率譜」

為了要分析(雷達)影像序列，本研究撰寫、組合了一個分析程式。由於實測影像裡含有許多雜訊，因此以模擬的波浪(非影像)來檢驗程式的正確性。模擬和檢驗是分三個階段進行的。現在說明如下：

- 一、檢驗模擬、估算(二維)波數譜的程式。以一個線性的或 Stokes 高階的規則波為例，檢驗二維傅利葉快速轉換法(2D FFT)的正確性。
- 二、檢驗模擬、估算波數－頻率譜的程式之一。藉著模擬符合某種目標頻譜的單方向平面不規則波，檢驗三維傅利葉快速轉換法(3D FFT)的正確性。
- 三、檢驗模擬、估算波數－頻率譜的程式之二。藉著模擬符合某種目標頻譜的多方向平面不規則波，檢驗三維傅利葉快速轉換法(3D FFT)的正確性。

將一個平面分割成 $M(x) \times N(y)$ 個小方格，每個小方格代表一張影像裡的像素(pixel)。那麼，每個節點的值就相對於影像裡的灰階值 $G(x_j, y_k)$ 。對它們進行二維傅立葉轉換：

$$F(k_x, k_y) = (\Delta k_m \times \Delta k_n) \sum_{x_m=1}^M \sum_{y_n=1}^N G(x_m, y_n) \exp \left[-i2\pi \left(\frac{r_m \Delta k_m}{M} + \frac{r_n \Delta k_n}{N} \right) \right] \dots\dots\dots (2.15)$$

其中

$k_x = r_m \Delta k_x$ ($r_m = 1, 2, 3, \dots, M$) 是平面座標橫軸波數

$k_y = r_n \Delta k_y$ ($r_n = 1, 2, 3, \dots, N$) 是平面座縱橫軸波數

$\Delta k_x = \frac{2\pi}{M \Delta x}$ 是橫軸的單位長度

$$\Delta k_y = \frac{2\pi}{N\Delta y} \text{ 是橫軸的單位長度}$$

Δx 和 Δy 分別代表每個像素的實際長度與寬度，而二維波數譜則定義為：

$$S(k_x, k_y) = \frac{1}{(M\Delta x)(N\Delta y)} |F(k_x, k_y)|^2 \dots\dots\dots (2.16)$$

圖 2.4 是為模擬的規則波平面圖。平面的長寬各為 50 公分，波浪振幅是 3 公分，波數 0.64 cm^{-1} ，波浪行進主方向與橫(x)軸夾角是 60° 。圖 2.5 是由規則波平面圖所計算出來的二維波數譜輪廓圖，而圖 2.6 則是它的立體圖。

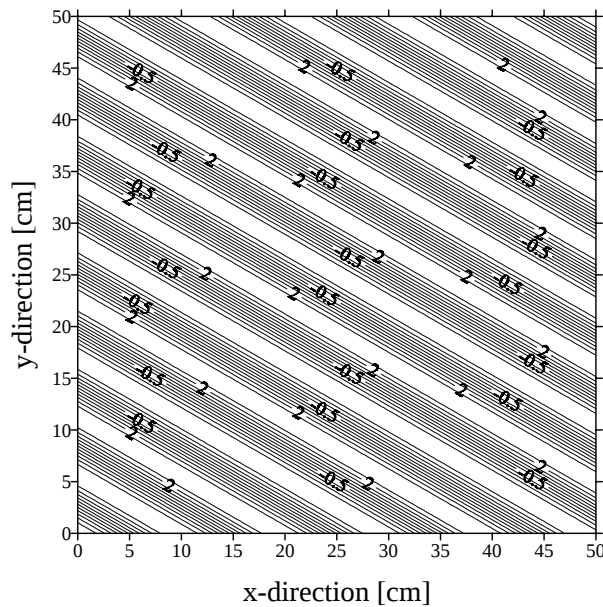


圖 2.4 模擬規則波平面圖

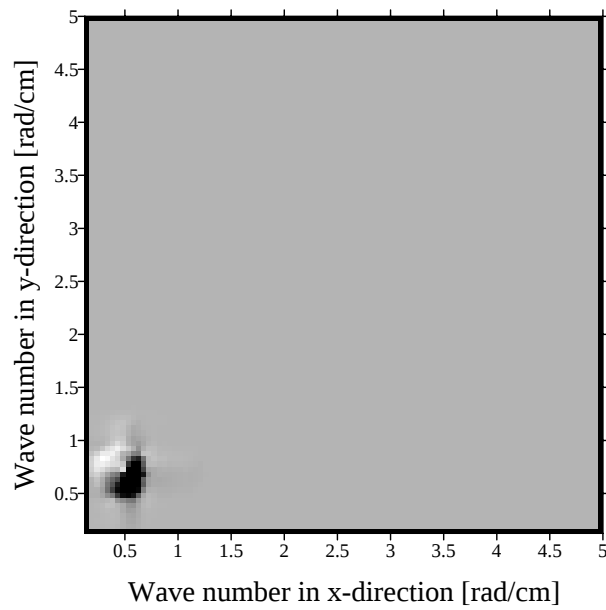


圖 2.5 二維波數譜起伏圖(relief)

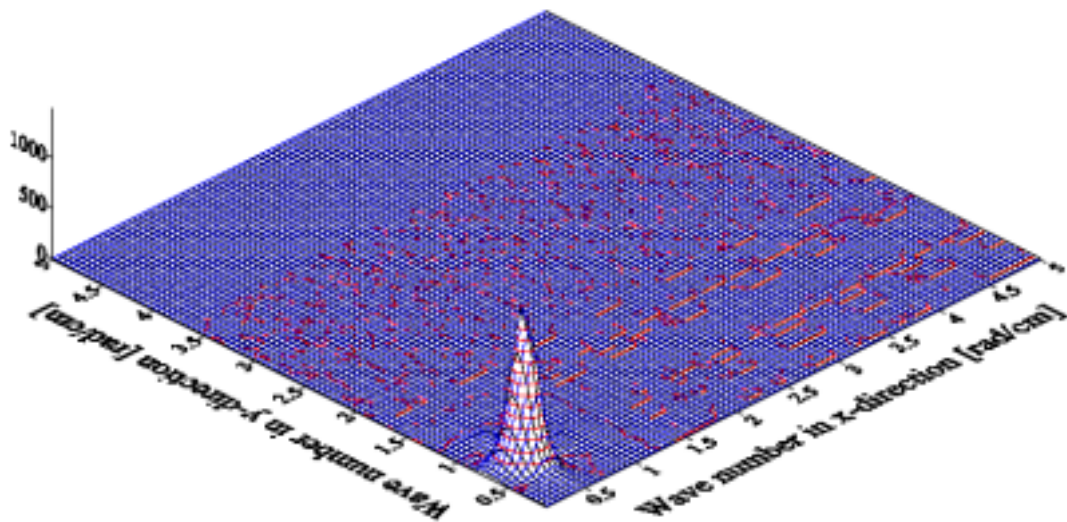


圖 2.6 二維波數譜立體圖

二維規則波可以用：

$$\eta = a_0 \cos[k_0 x \cos(\varphi_0) + k_0 y \sin(\varphi_0) - \omega_0 t] \dots \dots \dots (2.17)$$

來表示。其中下標 0 表示主成份(carrier)。 φ_0 則是波浪行進的方向。

一個有限振幅波通過某個紀錄站的時候，它的倍頻會出現在頻譜上主頻倍數的地方， $2 f_0$ ， $3 f_0 \dots$ 等。為了測試本二維傅利葉轉換及波數譜程式，用了 Stokes 三階波的式子：

$$\begin{aligned} \eta = & a_0 \cos[k_0 x \cos(\varphi_0) + k_0 y \sin(\varphi_0) - \omega_0 t] \\ & + \frac{1}{2} k_0 a_0^2 \cos[2 k_0 x \cos(\varphi_0) + 2 k_0 y \sin(\varphi_0) - 2 \omega_0 t] \dots\dots\dots (2.18) \\ & + \frac{3}{8} k_0^2 a_0^3 \cos[3 k_0 x \cos(\varphi_0) + 3 k_0 y \sin(\varphi_0) - 3 \omega_0 t] \end{aligned}$$

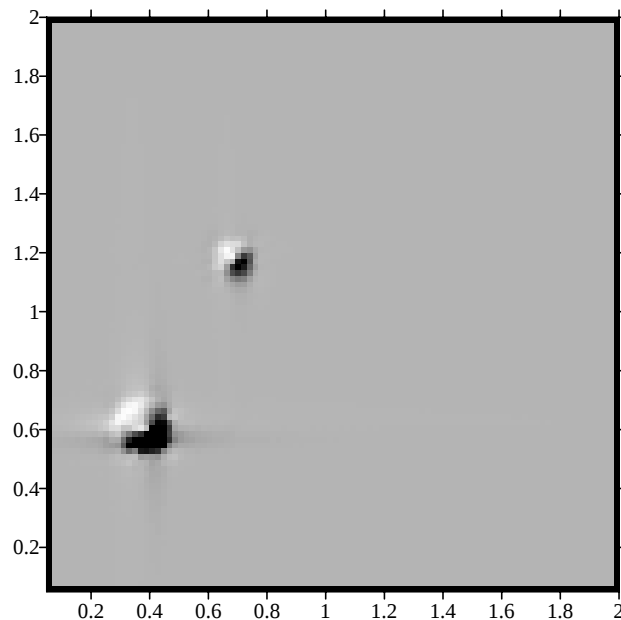


圖 2.7 Stokes 二階有限振幅波二維波數譜起伏圖(relief)

圖 2.7~圖 2.10 分別是 Stokes 二及三階有限振幅波測試結果的起伏及立體圖。從這些圖中可以很清楚地看到有一和兩個小尖峰出現在主頻的倍數地方。由此可以證明目前的程式是合理的。

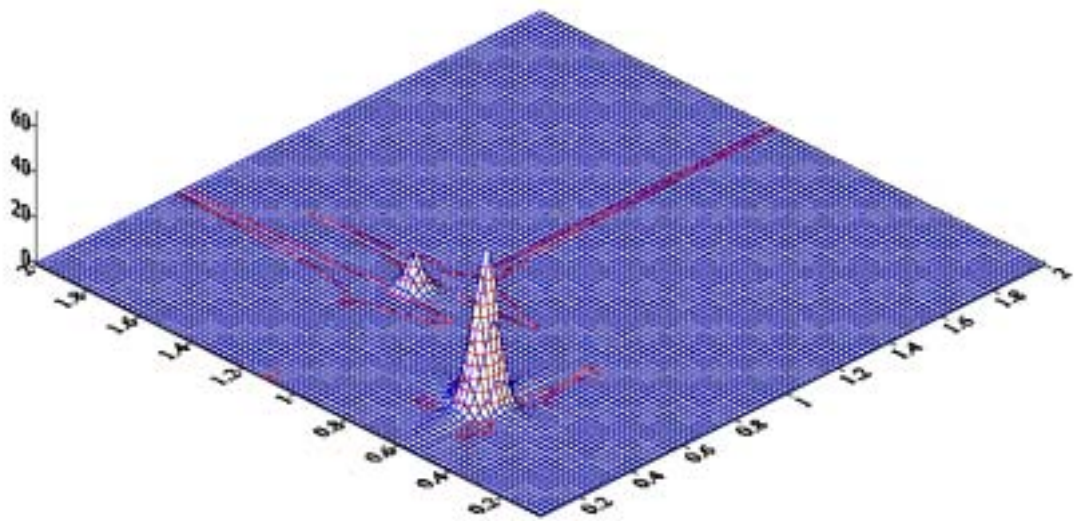


圖 2.8 Stokes 二階有限振幅波二維波數譜立體圖

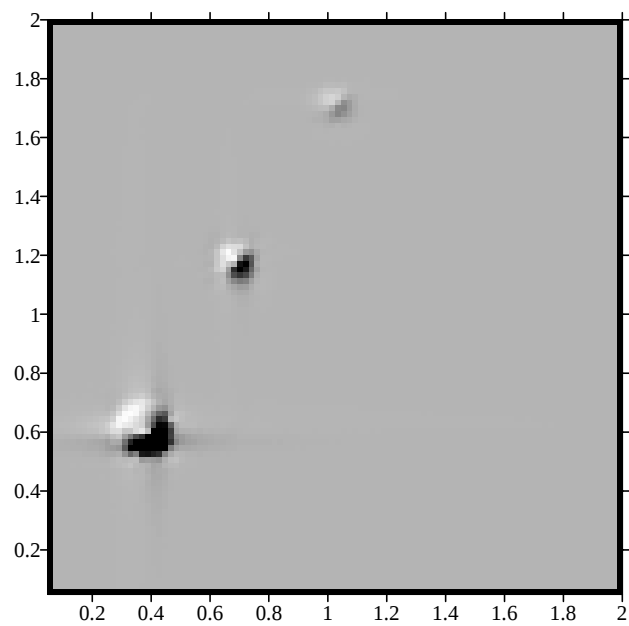


圖 2.9 Stokes 三階有限振幅波二維波數譜起伏圖(relief)

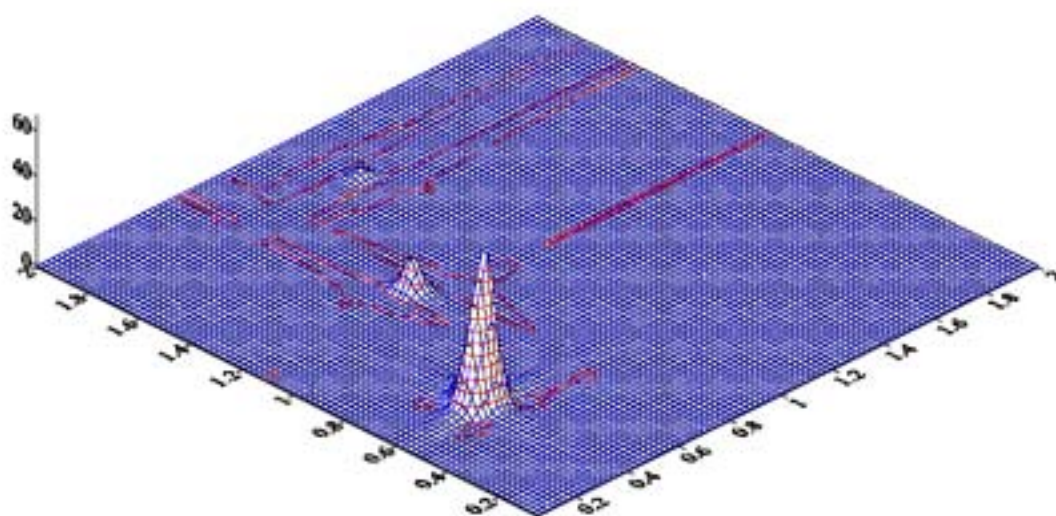


圖 2.10 Stokes 三階有限振幅波二維波數譜立體圖

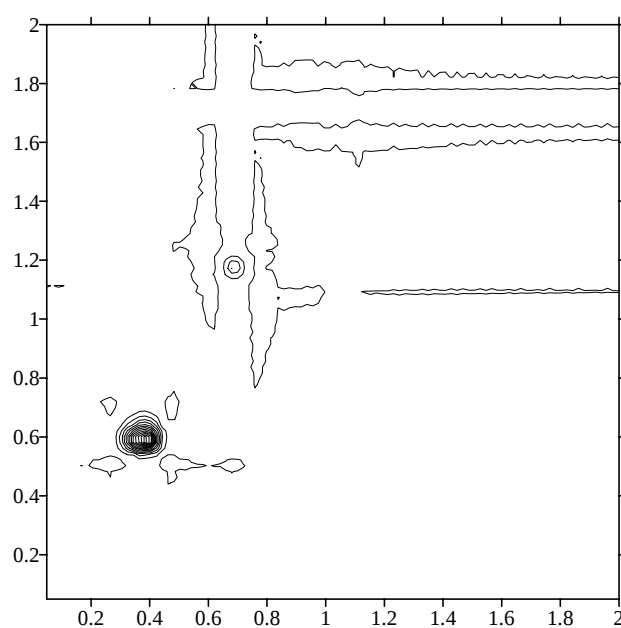


圖 2.11 Stokes 三階有限振幅波二維波數譜輪廓圖

模擬單方向不規波時用了文獻上三種有關頻譜的模式。它們分別是：

1. Bretschneider-Mitsuyasu 頻譜。它的數學形式是(Goda, 2000)：

$$S(f) = 0.257 \frac{H_s^2}{T_s^4 f^5} \exp\left(-\frac{1.03}{T_s^4 f^4}\right) \dots\dots\dots (2.19)$$

其中 H_s 和 T_s 分別是『示性波高』與『有義週期』。

2. Pierson-Moskowitz 頻譜。它的數學形式是(Tucker & Pitt, 2001)：

$$S(f) = \alpha_{PM} \frac{g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp\left[-\beta \left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right] \dots\dots\dots (2.20)$$

其中 α_{PM} 是所謂的 Phillips 常數， $\alpha_{PM} = 0.0081$ ； $\beta = 0.74$ 是一個常數； f_p 是所謂的『頂點頻率』，也就是一個頻譜能量密度最大的地方。

3. JONSWAP 頻譜。它的形式則是(Goda, 2000)：

$$S(f) = \alpha_{PM} \frac{g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(f/f_p\right)^{-4}\right] \gamma^{\exp\left[-\left(\frac{f}{f_p}-1\right)^2 / 2\sigma^2\right]} \dots\dots\dots (2.21)$$

其中 $f_p = 1/1.05T_s$ ； γ ：尖峰集中度係數(peak enhancement factor)， $\gamma = 1 \sim 7$ (mean = 3.3)。 σ ：代表控制頻譜寬度的參數

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & \text{for } f \leq f_p \\ 0.09 & \text{for } f > f_p \end{cases} \dots\dots\dots (2.22)$$

在模擬的時候，除了區域的長度(L_x 和 L_y)、以及分割的寬度(Δx 和 Δy)、波浪行進的角度(θ_0)改變外，『示性波高』($H_s = 0.5m$)與『有義週期』($T_s = 5sec$)，紀錄總時間($T = 128sec$)，時間的分割($\Delta t = 0.5sec$)，以及其它的參數都保持不變。

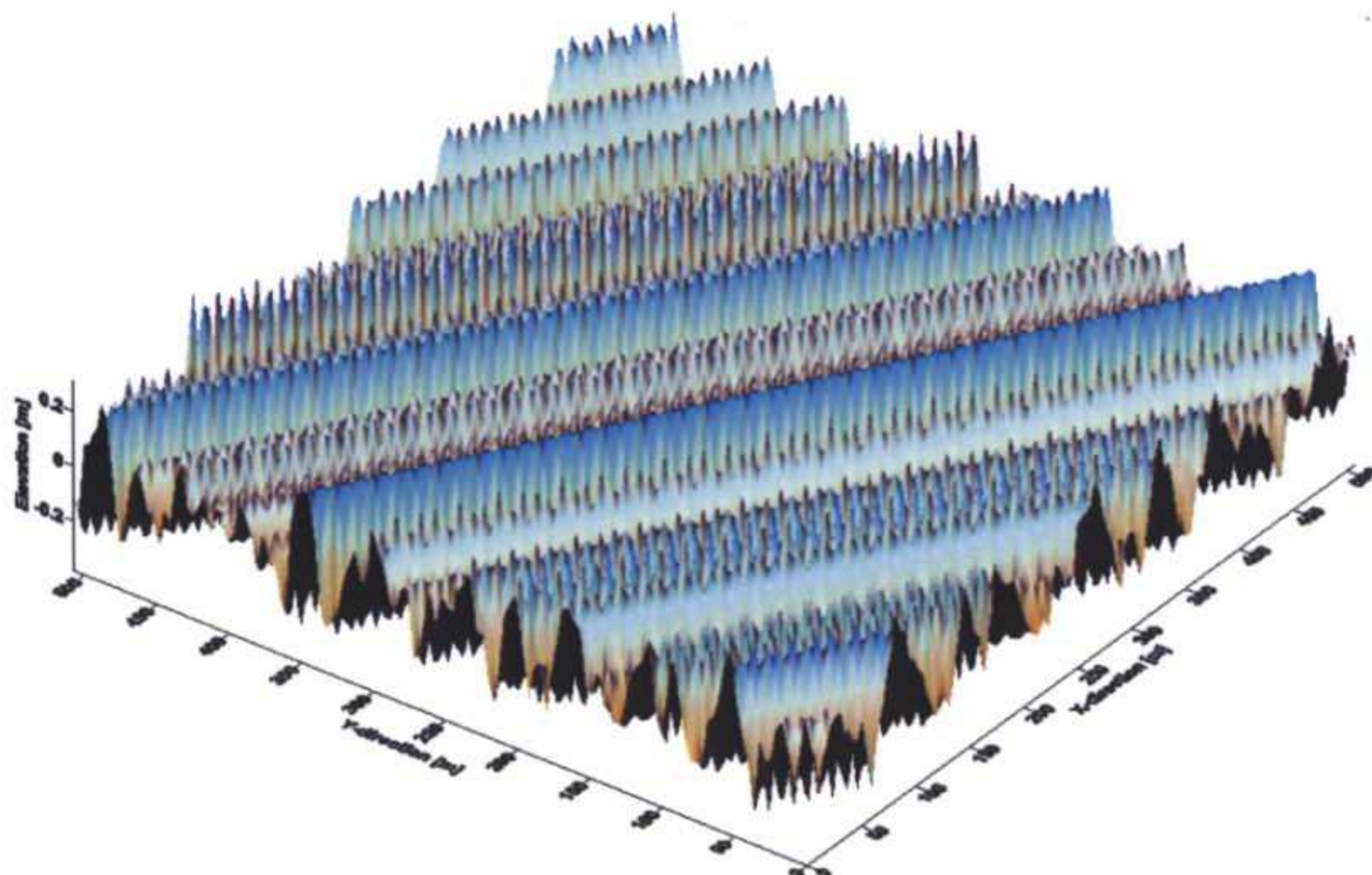


圖 2.12 單方向不規則波水面變化。(模擬條件：Bretschneider-Mitsuyasu 頻譜)

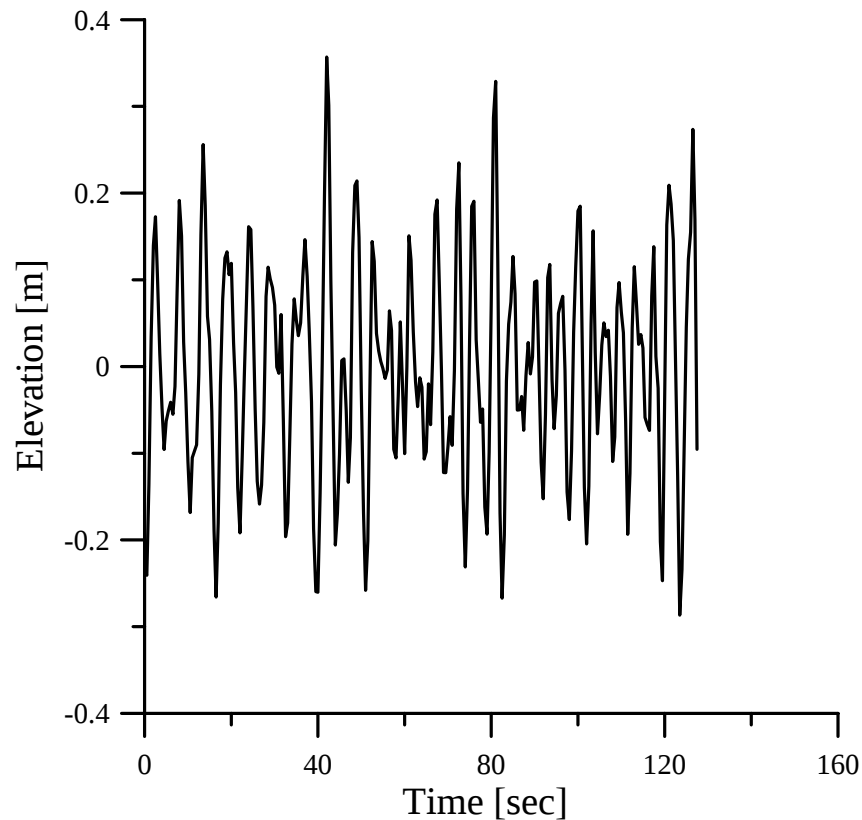


圖 2.13 同圖 2.12。單點採樣結果

圖 2.12 是單方向不規則波水面變化的模擬結果。波浪行進的方向是 $+60^\circ$ 。目標頻譜是 Bretschneider-Mitsuyasu 頻譜。圖 2.13 則是單點採樣的結果。

在這裡應該說明的是，模擬的時候是仿照處理(雷達)影像的方式，對每一個時刻 t 的(平面)水面變化做二維的傅利葉轉換，全部 256 張「影像」全都處理後，就再對時間軸做一次傅利葉轉換，而得到波數－頻率譜。

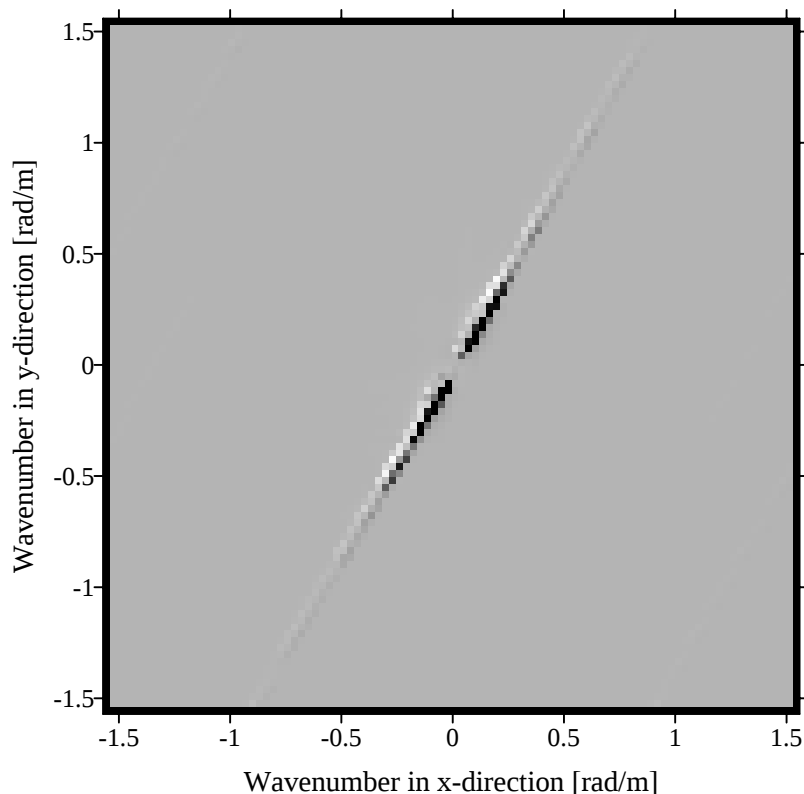


圖 2.14 將波數 – 頻率譜對頻率積分後所得到波數譜的立體圖。模擬條件同圖 2.12。

圖 2.14 是利用(2.11)式，亦即將波數 – 頻率譜對頻率積分後所得到波數譜的立體圖。從圖中可以看到，所有含有能量波的波數都在一條線上。這是因為目前模擬的是單方向不規則波的緣故。圖 2.15 與圖 2.16 則分別是它的輪廓及立體圖。

比較容易辨認模擬、計算結果正確與否得從一維的頻率譜著手。前面也提到過了，對一個均勻的「海面」來說，在平面上任意取一點，然後從它的時間序列所得到的頻譜，應該和整個波數 – 頻率譜對波數積分後的結果與(2.9)式一樣。利用這個方法就應該可以驗證出來所得到的結果正確與否了。

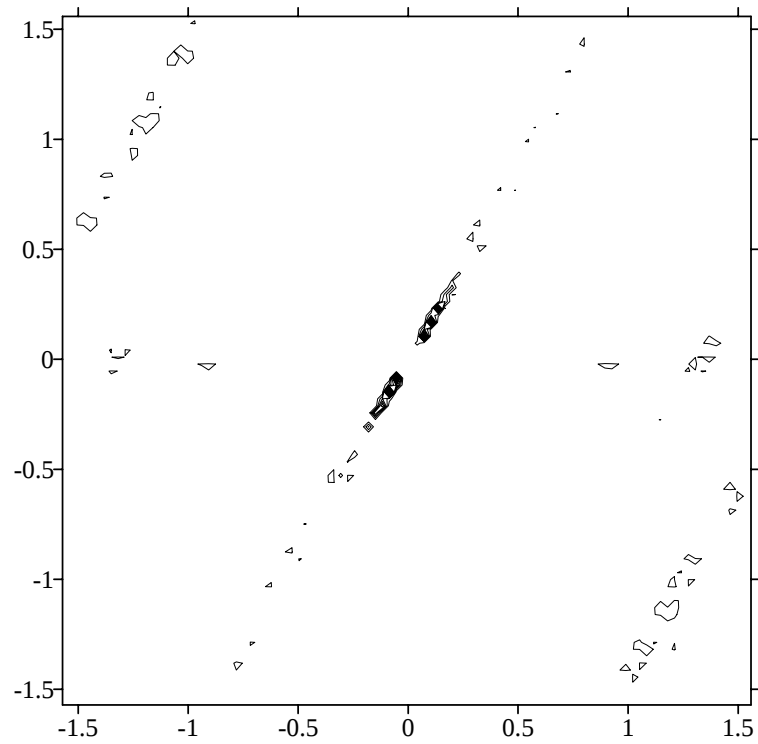


圖 2.15 將波數－頻率譜對頻率積分後所得到波數譜的輪廓圖。模擬條件同圖 2.12。

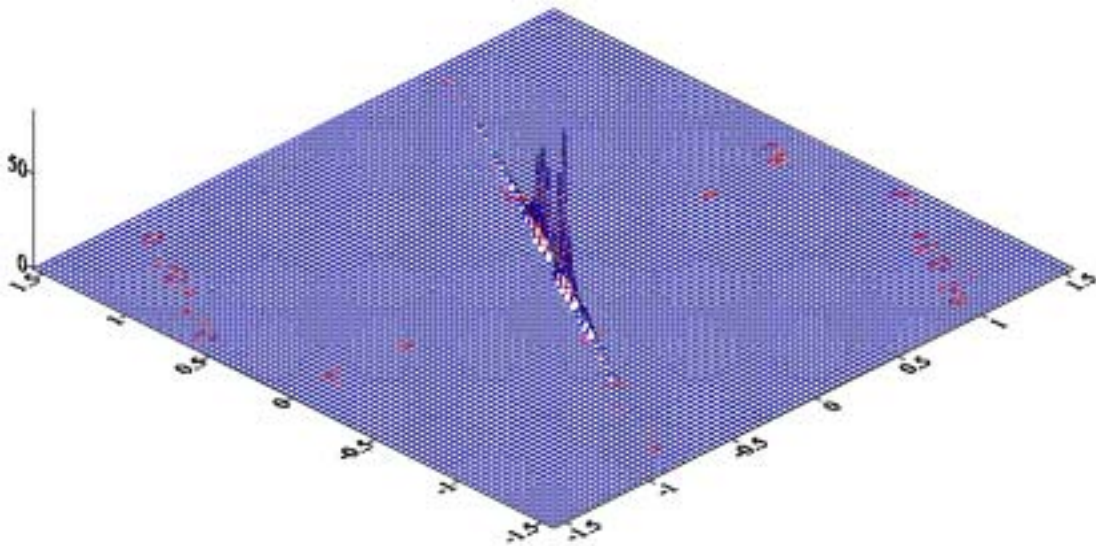


圖 2.16 將波數－頻率譜對頻率積分後所得到波數譜的立體圖。模擬條件同圖 2.12。

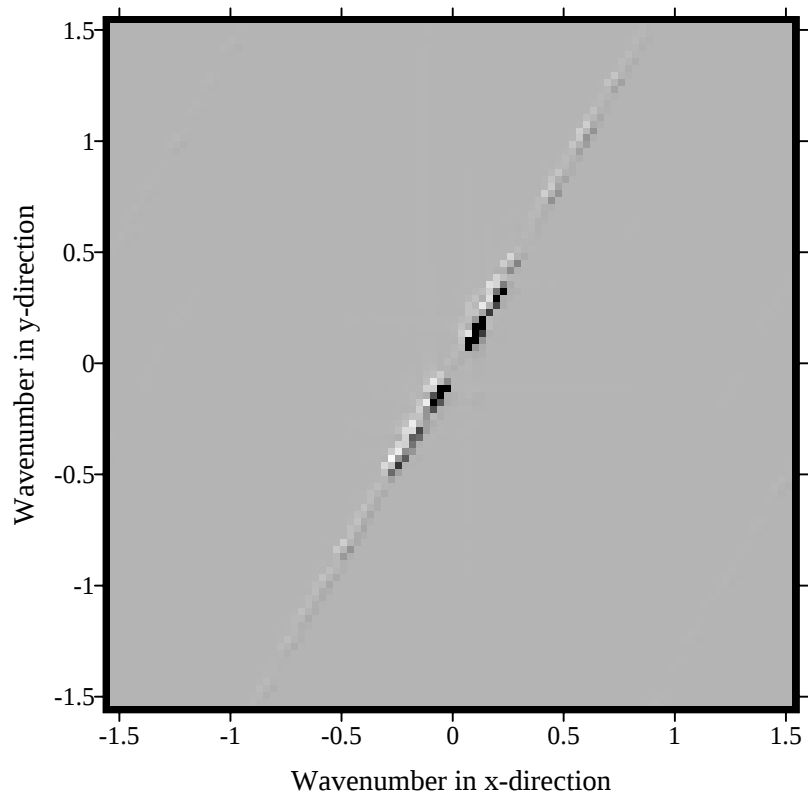


圖 2.17 將波數－頻率譜對頻率積分後所得波數譜的立體圖。
(模擬條件：JONSWAP 頻譜。)

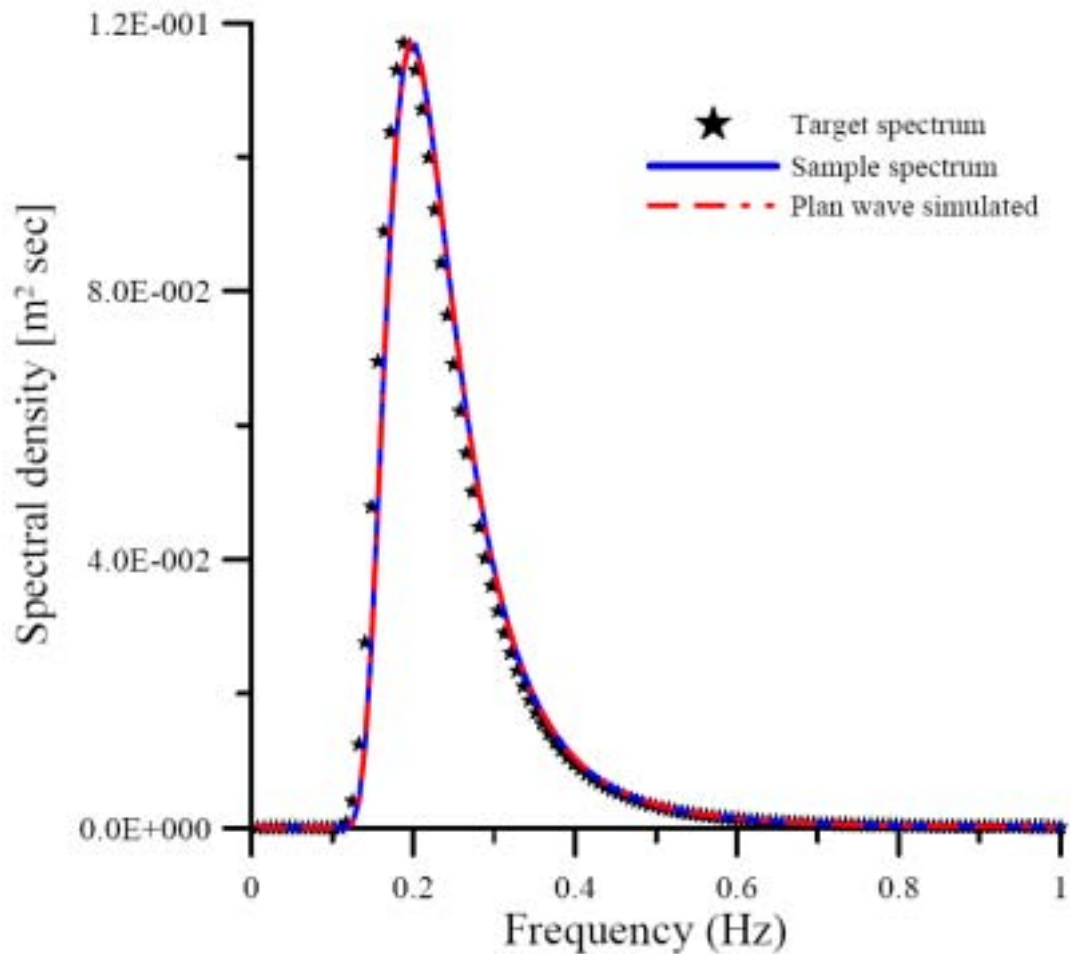


圖 2.18 三種不同方式取得的頻譜(目標、單點取樣、對波數－頻率譜積分頻譜)比對圖。模擬條件同圖 2.12。

圖 2.18 是三種不同方式獲得頻譜的比對圖。其中的目標頻譜是根據(2.19)式~(2.21)式繪製的；所謂的單點取樣(sample spectrum)是在「海面」上取任意一點取樣後所得到的；而平面波模擬結果(plan wave simulated)則是將整個波數－頻率譜對波數積分後得到的。從這張圖中可以看出來，三種不同方式所得到的頻譜完全一致。這是因為目前所採用的模擬方法是所謂的『隨機相位』法(random phase method, Miles, 1990)。Hudspeth 等人(Hudspeth & Borgman, 1979; Hudspeth & Chen, 1979)把它稱做『定性(頻)譜振幅』法(Deterministic Spectral Amplitude, DSA)。簡單地說就是把水面變化寫成：

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos\{\omega_i t - k_i [x \cos(\theta_0) + y \sin(\theta_0)] + \varepsilon_i\} \dots\dots\dots (2.23)$$

其中

$$k_i \tanh(k_i h) = \frac{\omega_i^2}{g}$$

$$k_{x_i} = k_i \cos(\theta_0)$$

$$k_{y_i} = k_i \sin(\theta_0)$$

$$A_i = \sqrt{2S(f_i) \Delta f}$$

$$\varepsilon_i = 2\pi U[0,1]$$

由這種方式模擬出來水面變化的振幅 A_i 是從頻譜密度得來的 – 因而是「定性」的；而相位則是完全隨機的。因為一維的頻譜裡並不包含任何有關相位的訊息，所以模擬後所得到頻譜會和「目標頻譜」完全一樣。從圖 2.18 的結果可以證明目前的程式是合理的。

前面提到過，在模擬的過程中選用了三種不同的頻譜模式。圖 2.19 和圖 2.20 分別是以 Pierson-Moskowitz 和 JONSWAP 為目標頻譜的模擬結果。模擬的條件仍然是同圖 2.14。從這兩張圖可以得到與圖 2.18 同樣的結論。它們的二維波數譜圖則附在圖 2.21 及 2.22 以供參考。

雖然從(一維的)頻譜可以知道程式是否合理，但是卻不能知道有關方向的估算是否正確。為了驗證這個問題，給定了波浪行進角度是 210° ，其他條件則保持不變的新條件。

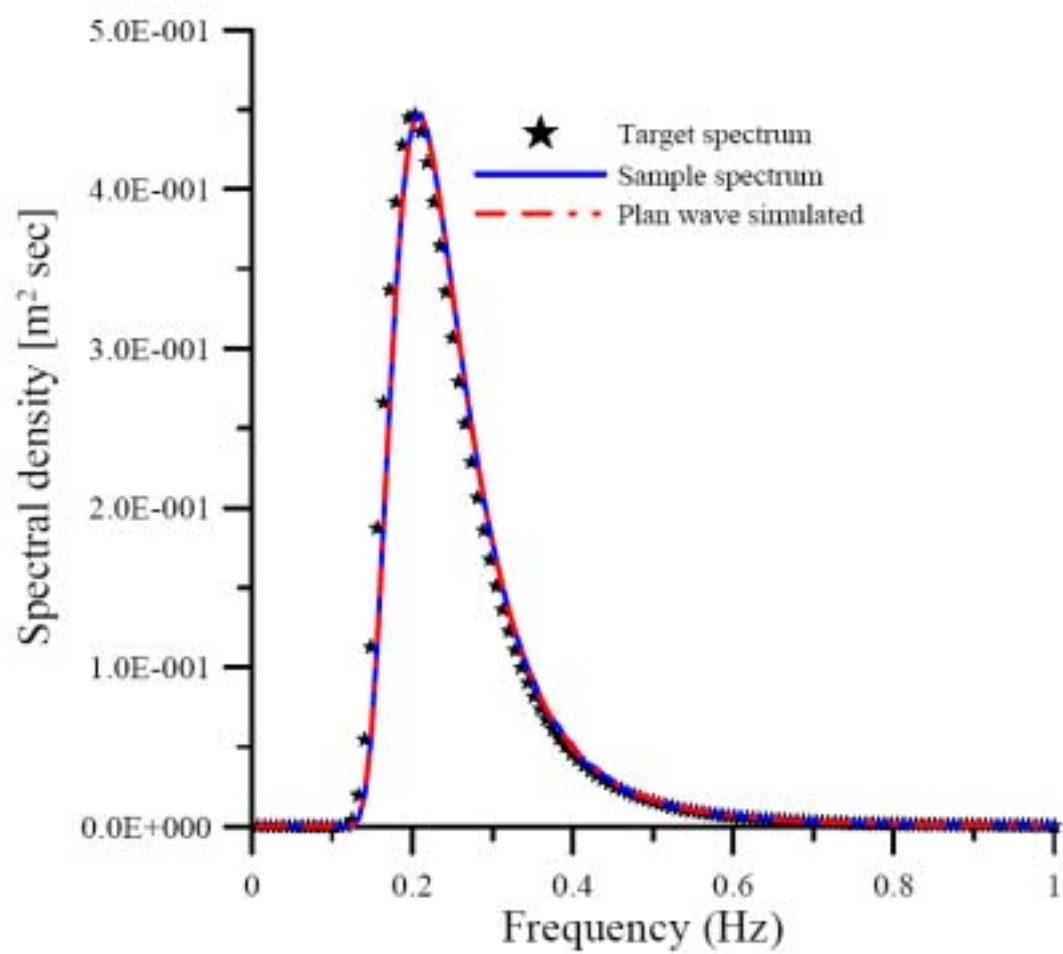


圖 2.19 以 Pierson-Moskowitz 為目標頻譜的模擬結果。其它模擬條件同圖 2.12。

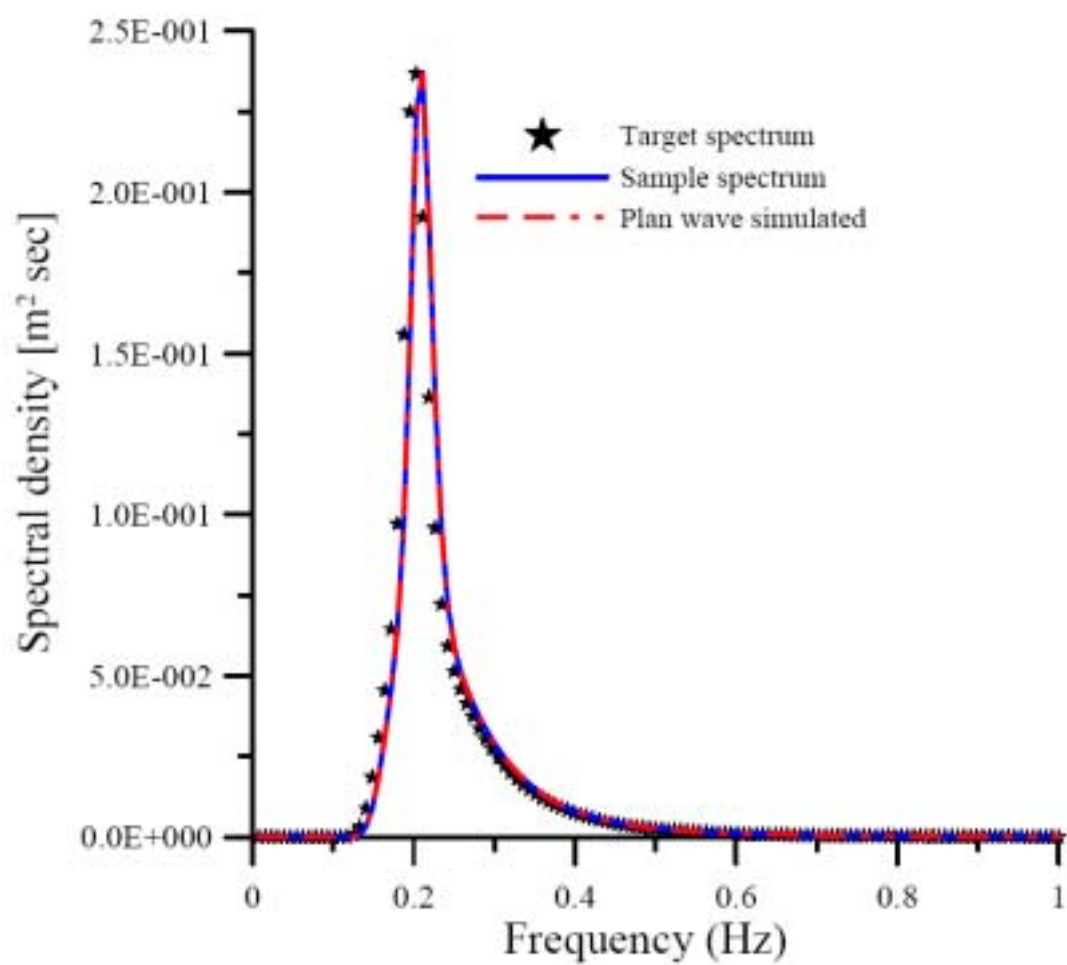


圖 2.20 以 JONSWAP 為目標頻譜的模擬結果。其它模擬條件同圖 2.12。

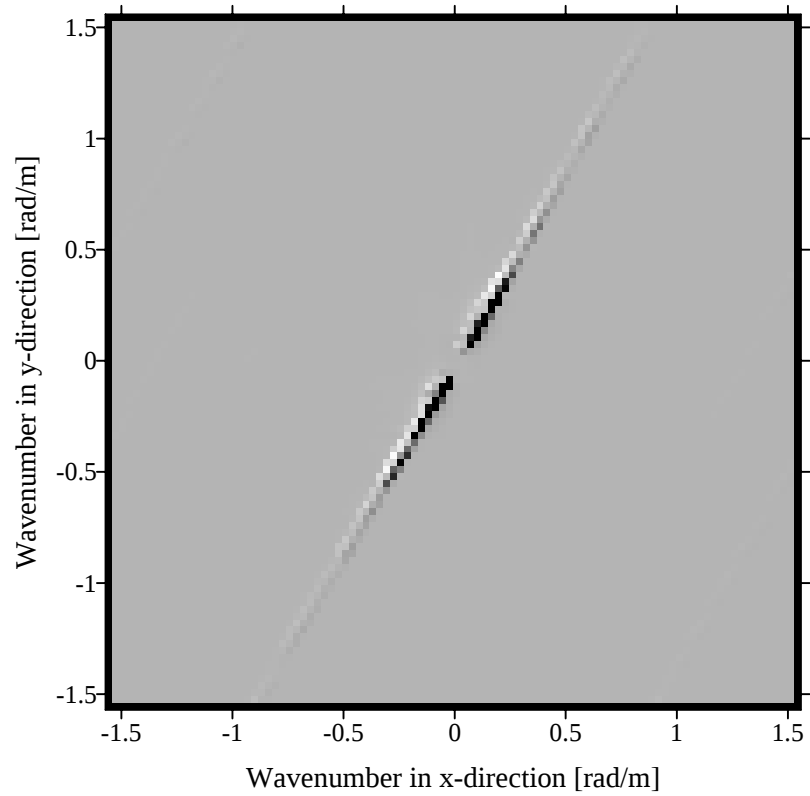


圖 2.21 以 Pierson-Moskowitz 為目標頻譜波數譜的立體圖。其它模擬條件同圖 2.12。

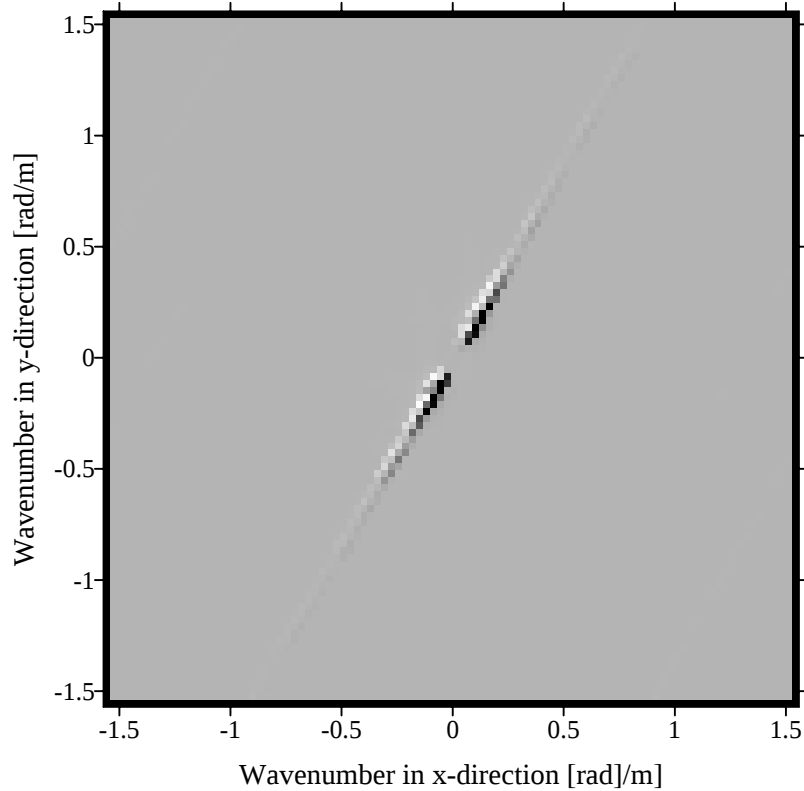


圖 2.22 以 JONSWAP 為目標頻譜波數譜的立體圖。其它模擬條件同圖 2.12。

為了測試空間分割尺寸的大小與波浪進行方向對程式的影響，將原先的 $\Delta x = \Delta y = 1.6m$ ； $L_x = L_y = 409.6m$ 改成 $\Delta x = \Delta y = 3m$ ； $L_x = L_y = 468m$ ，並將入射角改成 210° 。圖 2.23 是 Bretschneider-Mitsuyasu 頻譜模擬的結果。從這張圖裡可以看出來，波浪可以說是與 x -軸成 30° 角正向進行(近岸)；也可以說以 210° 角反向進行(離岸)。這正是前面所提到的『 180° 模糊』的問題。

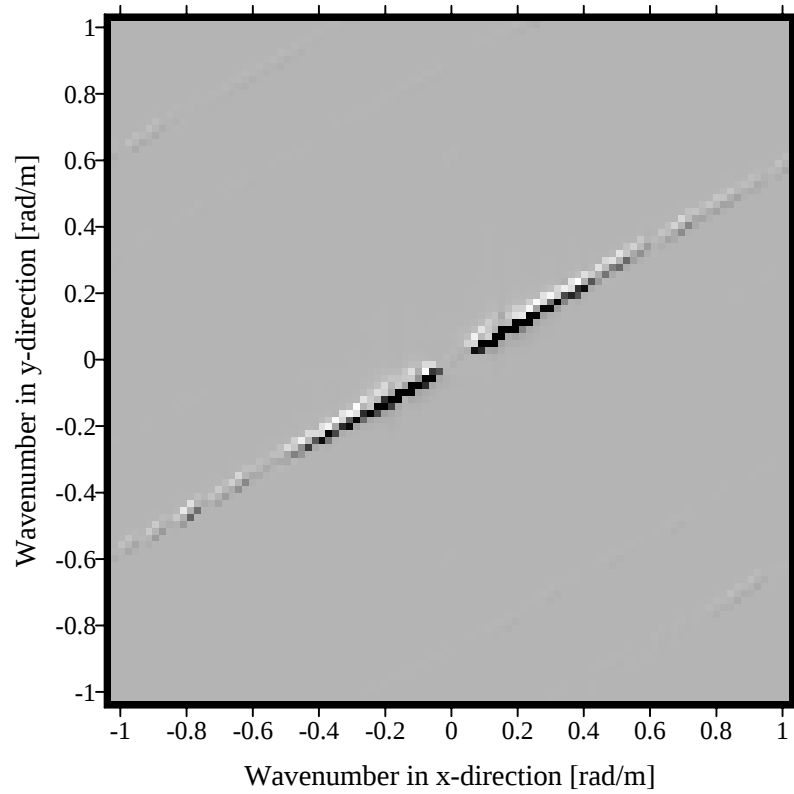


圖 2.23 Bretschneider-Mitsuyasu 頻譜模擬的結果。 $\Delta x = \Delta y = 3m$ ；

$$L_x = L_y = 468m ; \theta_0 = 210^\circ$$

圖 2.24~2.26 則分別以 Bretschneider-Mitsuyasu 、 Pierson-Moskowitz 和 JONSWAP 為目標頻譜模擬後三種頻譜的比對圖。從這幾張圖裡可以證明，空間分割尺寸的大小以及波浪行進方向對目前所使用的程式沒有影響。

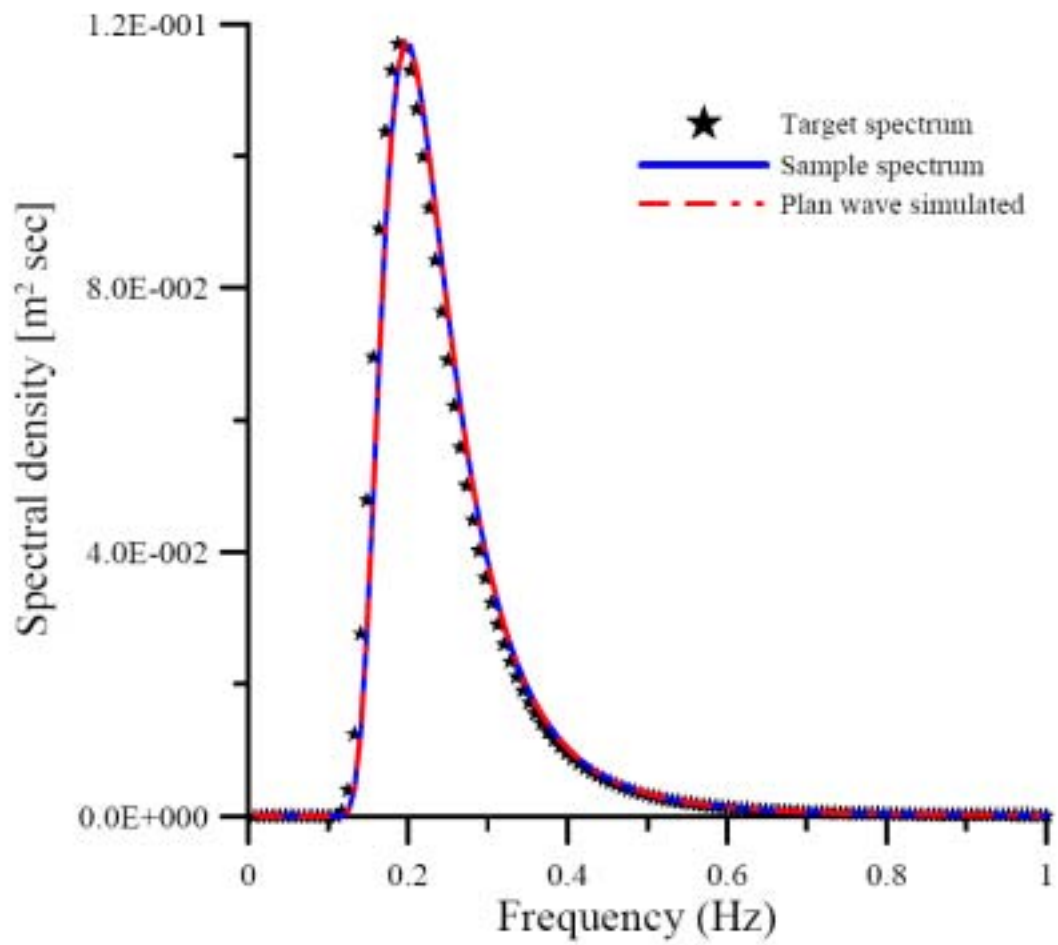


圖 2.24 以 Bretschneider-Mitsuyasu 為目標頻譜模擬後三種頻譜的比對圖。其它模擬條件同圖 2.23。

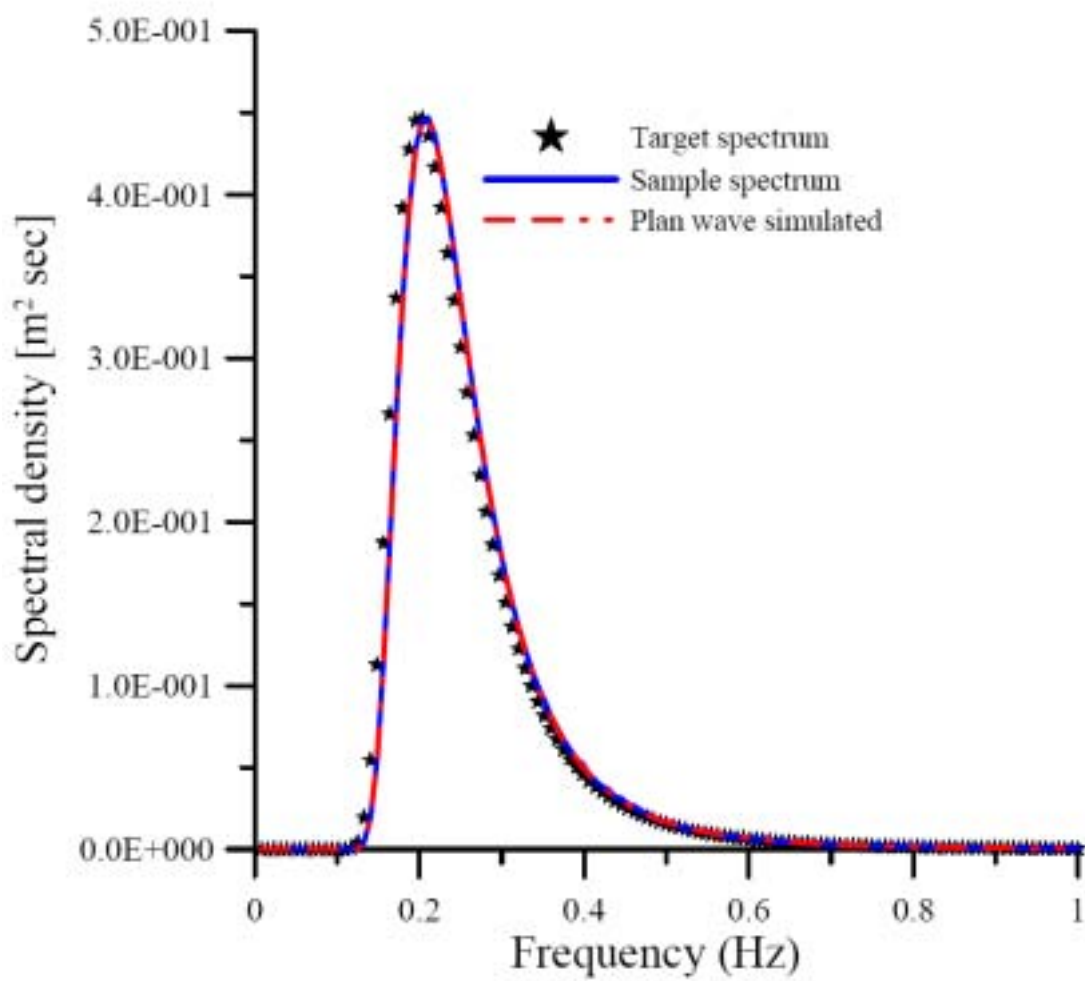


圖 2.25 以 Pierson-Moskowitz 為目標頻譜模擬後三種頻譜的比對圖。
其它模擬條件同圖 2.23。

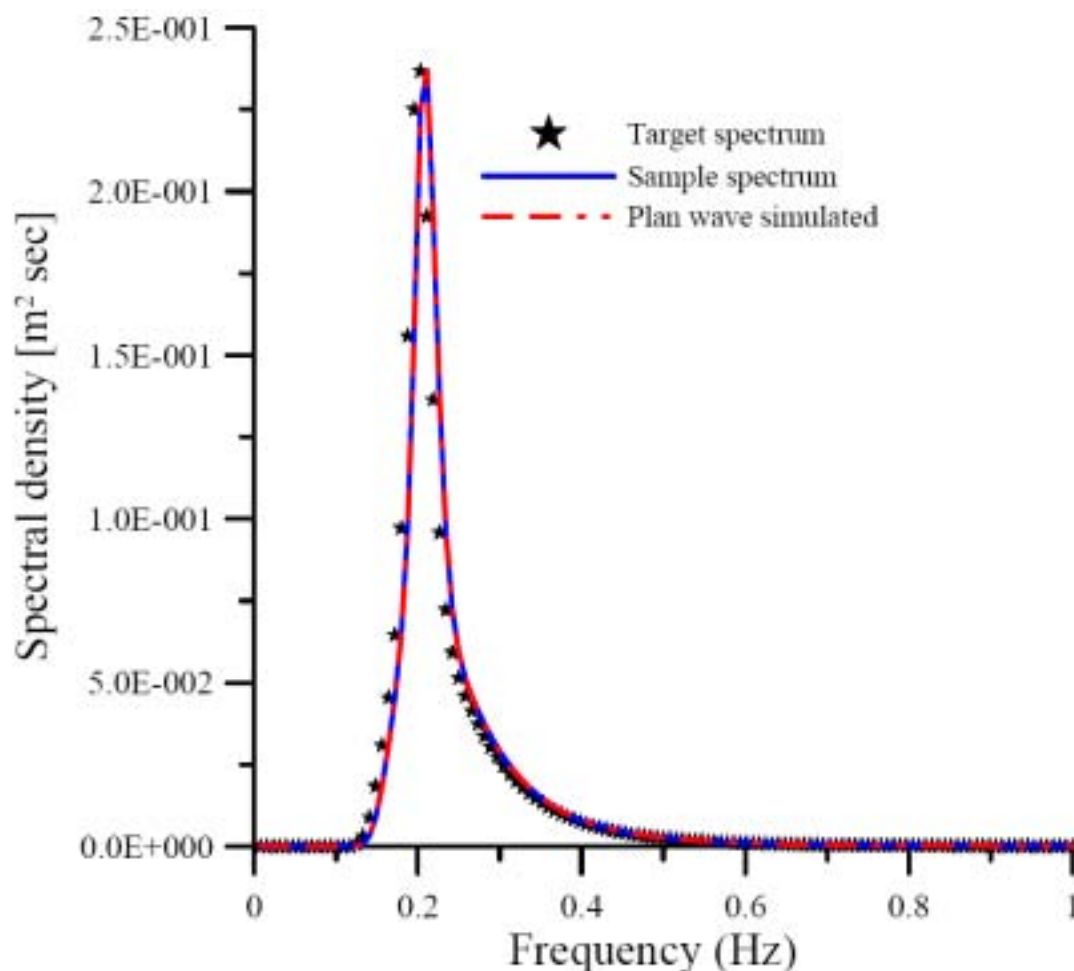


圖 2.26 以 JONSWAP 為目標頻譜模擬後三種頻譜的比對圖。其它模擬條件同圖 2.23。

另外，在多方向不規則波的驗證上，以 Bretschneider-Mitsuyasu 為目標頻譜，方向散佈參數(Spreading index, $S_{\max}$) 為 20，圖 2.27 為水面變化，圖 2.28 為類影像畫面，圖 2.29 為任一點之時間序列，圖 2.30 為目標頻譜模擬後三種頻譜的比對圖，圖 2.31 為二維波數譜圖。

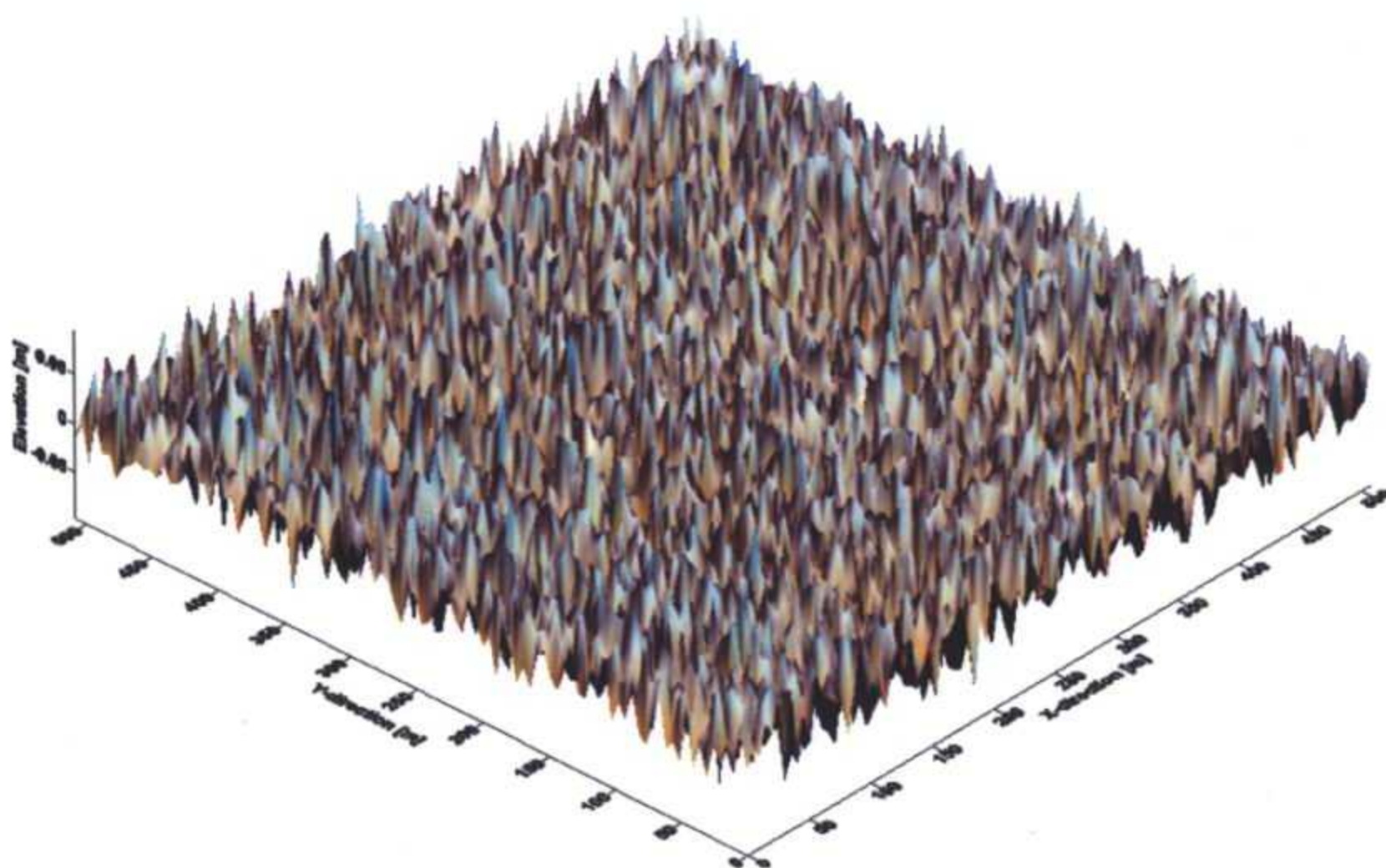


圖 2.27 水面變化

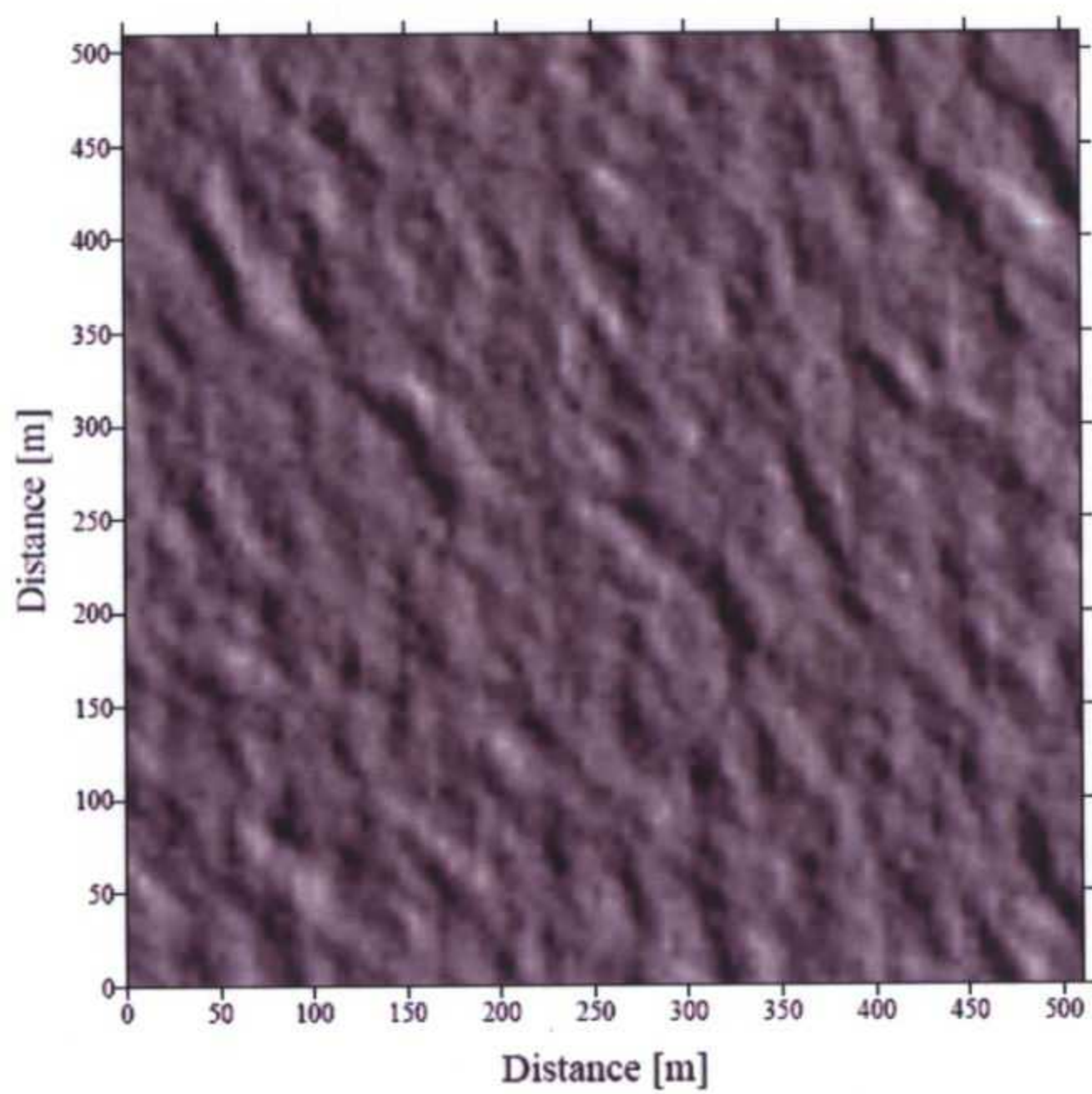


圖 2.28 類影像畫面

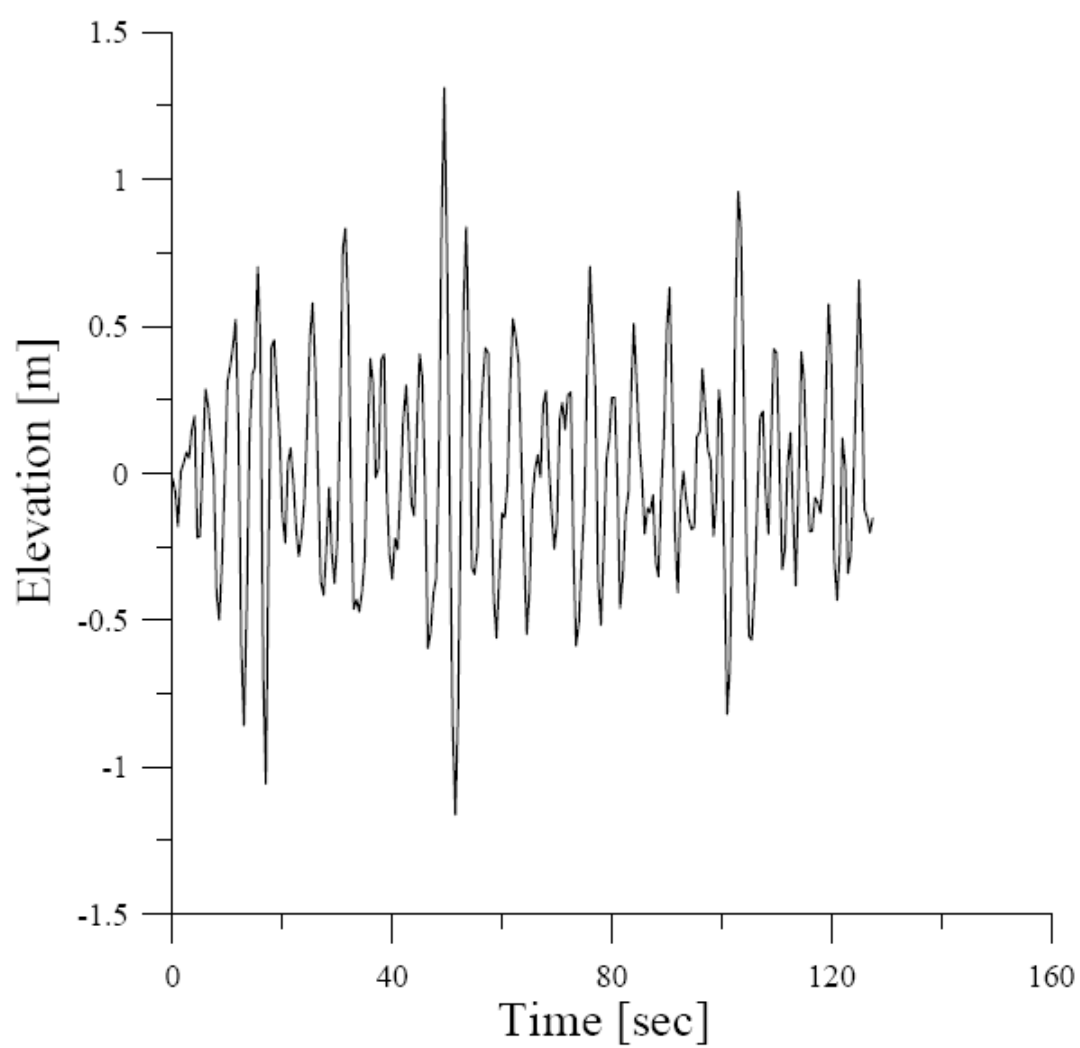


圖 2.29 任一點之時間序列

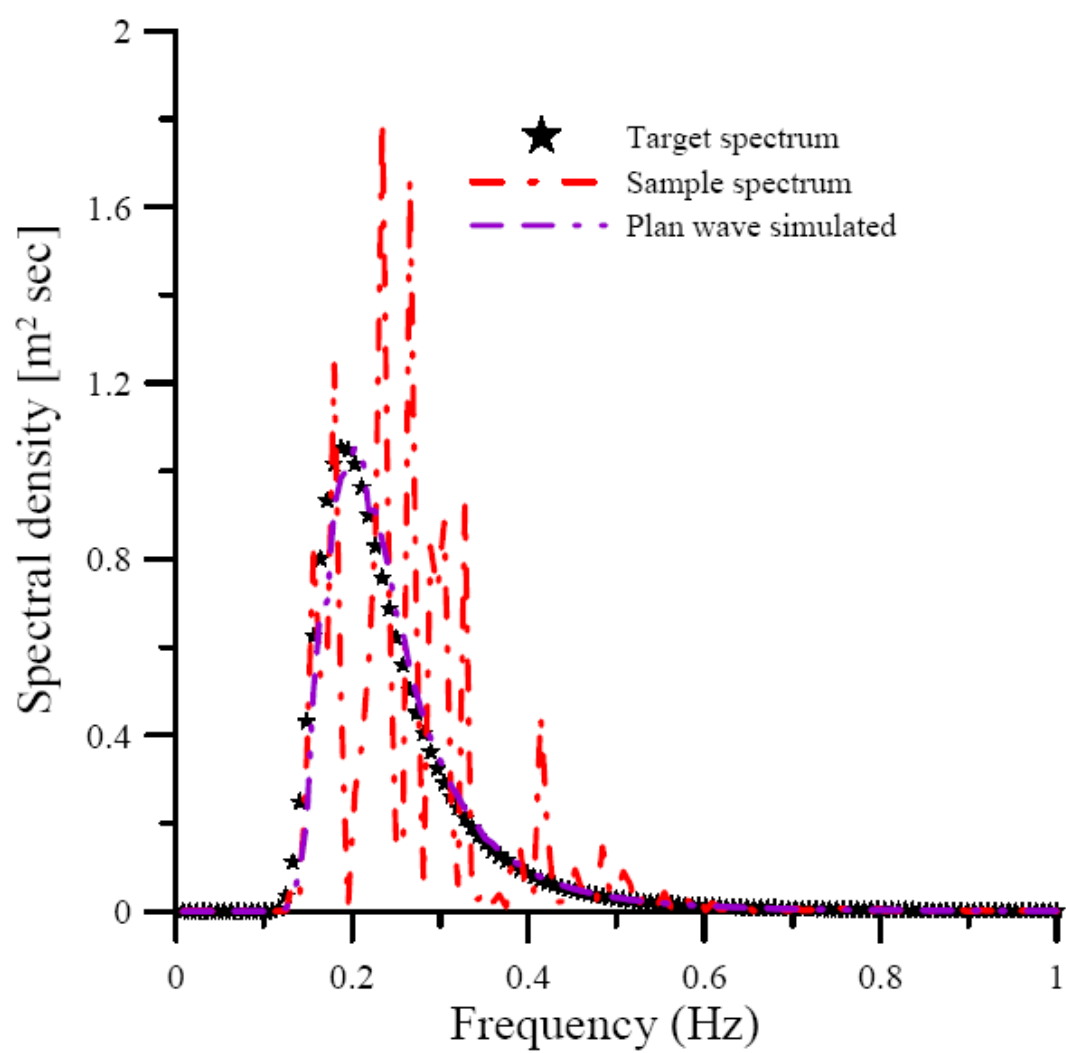


圖 2.30 目標頻譜模擬後三種頻譜的比對圖

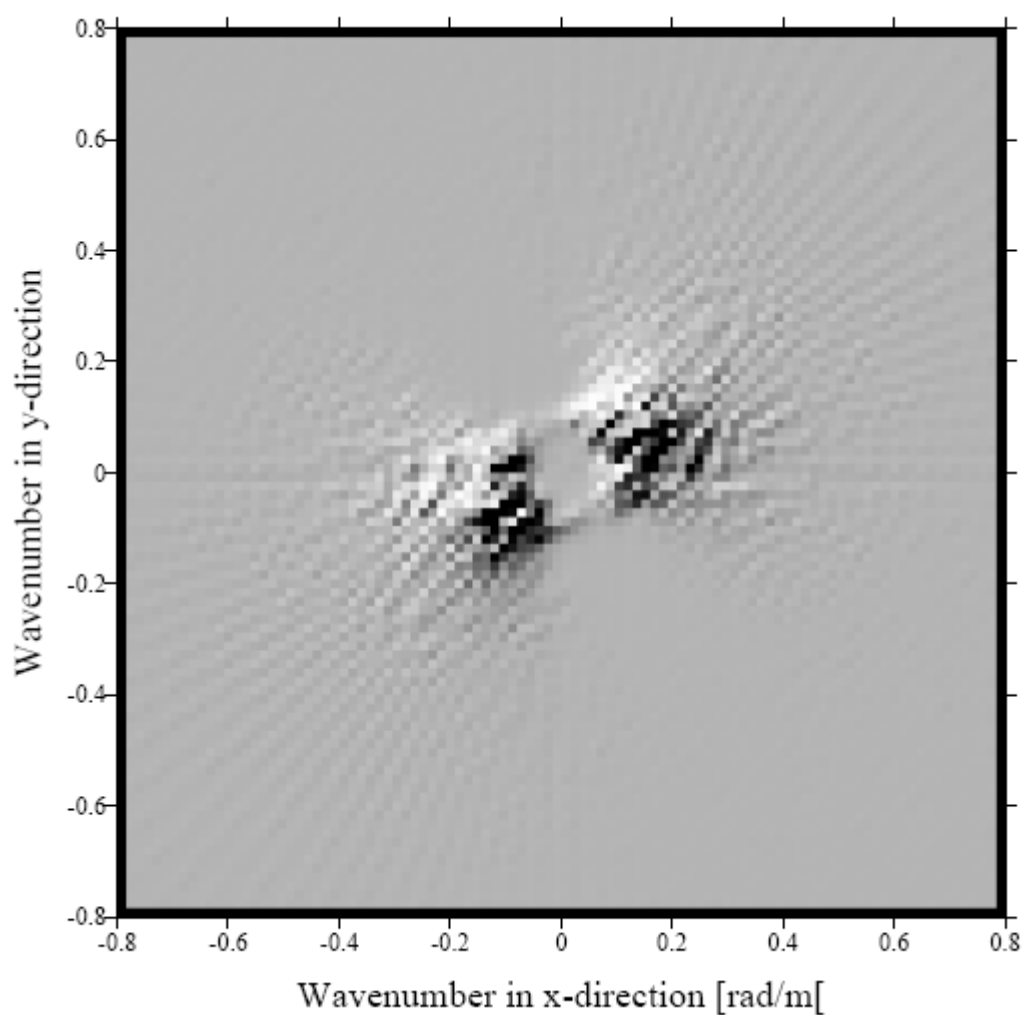


圖 2.31 二維波數譜圖

最後，本報告前面曾提到，相同速度的訊號會座落在一個圓錐的面上(見圖 2.2)。這在波浪裡面就是所謂的『分散關係式』。(Ziemer,1987;Dankert,2003)把它稱做『分散(關係)殼』(dispersion shell)。理論上來說，整個波場的能量都應該座落在這個殼上面(Seemann et al., 1997)。圖 2.32 就是『分散(關係)殼』的示意圖。

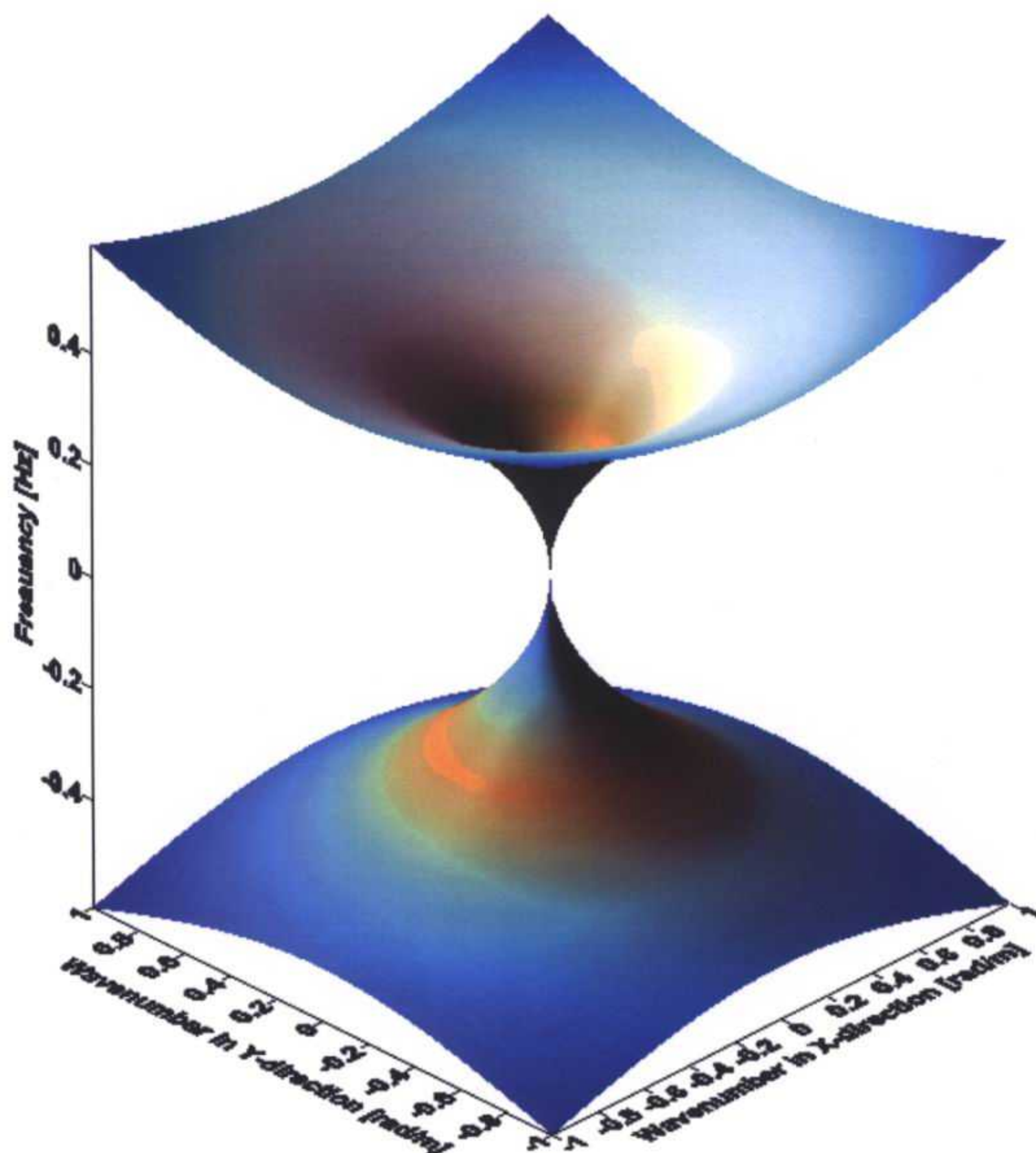


圖 2.32 『分散(關係)殼』的示意圖

要藉著影像找出有關波動的訊息時，一般有兩種作法(Jähne, 1993):

- 一、交譜關係法：利用連續兩張的影像之間的相互關係求出其相位差異；
- 二、波數－頻率譜法：利用多張影像求出其在波數－頻率領域間的分佈情形。

目前大多數學者在藉著分析雷達影像找出有關海面上波場訊息時大都採用第二種方法。這是因為一般認為海面上波場的資訊應該全都包含在波數－頻率譜裡了。

波數－頻率譜是四維的，需要對影像序列做三維的傅利葉轉換。目前有關三維的傅利葉轉換已做完了。藉著對有限振幅波、單方向不規則的測試，可以證明本程式應該是合理的。

2.6 模擬波面求取波向及示性波高

由先前以 JONSWAP 頻譜且依 Mitsuyasu 等人的散佈函數模擬出的理論波面，輸入不同的波高及波向條件。用先前的分析模式計算出的波高及波向與原始的輸入值有多少的誤差，以此來驗證計算模式的可行性。在主波向的求得是將雷達影像以二維傅立葉轉換的方式，由連續影像之相位關係，消除經轉換後所產生的虛像(180° ambiguity)，進而判斷出波浪主要行進方向(平口等, 1989)。示性波高的求得如下式所示。

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \dots\dots\dots (2.24)$$

其中

H_s ：為示性波高

m_0 ：為波數頻率譜上譜密度能量之和

圖 2.33 即是以 -70°、100°及 0°三種不同角度，且各輸入 0.2m、0.8m、1m、1.5m、2.3m、2.8m、3m 及 2.2m 的示性波高條件。結果顯示計算後的誤差相當小，由表 2.1 中更可清楚的看到誤差百分率相當的小，所以在示性波高的求法上是可行的。

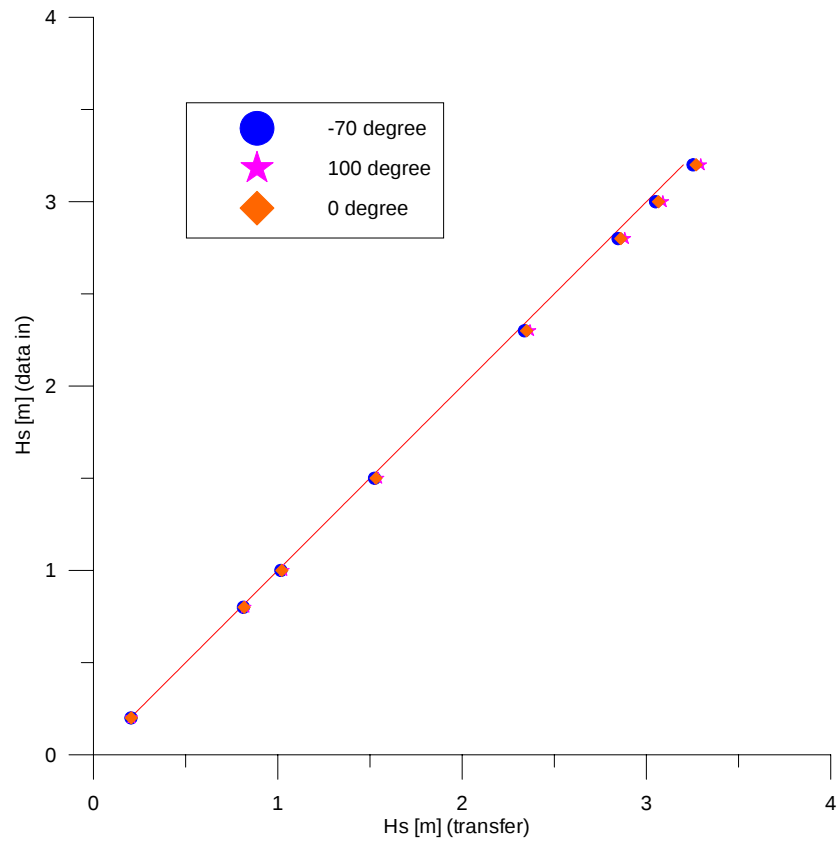


圖 2.33 由理論波面計算示性波高結果比較圖

表 2.1 誤差百分率表

data in (m)	-70 degree		100 degree		0 degree	
	Result (m)	Deviation (%)	Result (m)	Deviation (%)	Result (m)	Deviation (%)
0.2	0.2033	0.016518	0.2059	0.029508	0.20434	0.021702
0.8	0.81321	0.016518	0.82361	0.029508	0.81736	0.021702
1	1.0165	0.016518	1.0295	0.029508	1.0217	0.021702
1.5	1.5248	0.016518	1.5443	0.029508	1.5326	0.021702
2.3	2.338	0.016518	2.3679	0.029508	2.3499	0.021702
2.8	2.8463	0.016518	2.8826	0.029508	2.8608	0.021702
3	2.0496	0.016518	2.0885	0.029508	2.0651	0.021702
2.2	2.2529	0.016518	2.2944	0.029508	2.2694	0.021702

圖 2.34 即是固定示性波高輸入不同的主波向值模擬出理論波面，以所建立的分析模式進行分析出來的結果圖，結果顯示所求出的主波向點皆相當靠近 1:1 的假設線，故可證明該模式在分析波向上確實可行。

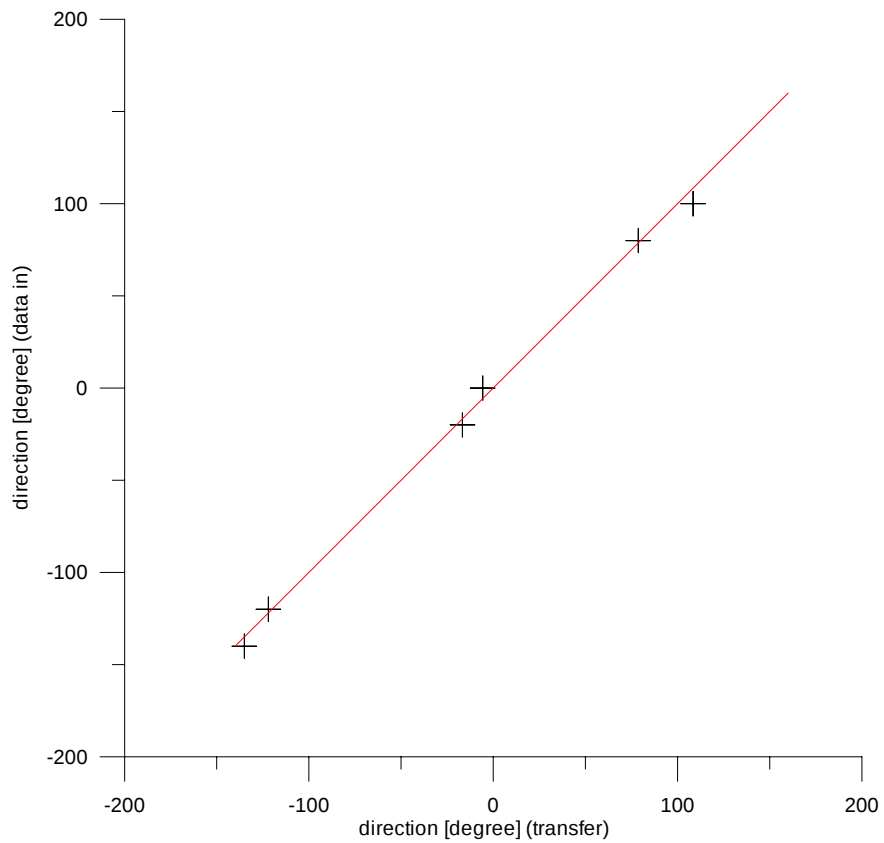


圖 2.34 由理論波面計算主波向結果比較圖

綜合以上所述，已經驗證出該計算模式的可行性，故可開始對實際雷達影像進行分析。

第三章 雷達影像分析

3.1 前言

由前章節結果可知波數頻率譜的可行性。然而在影像處理前由於取得的雷達影像所包含的雜訊可能影響判讀得結果，必須藉由一些影像處理的手法，如灰階化及低通濾波等，來改善影像的視覺效果。最後，除了比較雷達影像所求出之波向及觀測樁之波向外，並以迴歸方式求出雷達像素變化資料與觀測樁資料比對，求得迴歸公式做為後續雷達影像轉換為實際示性波高之用，其詳細作業流程如流程圖 3.1 所示。

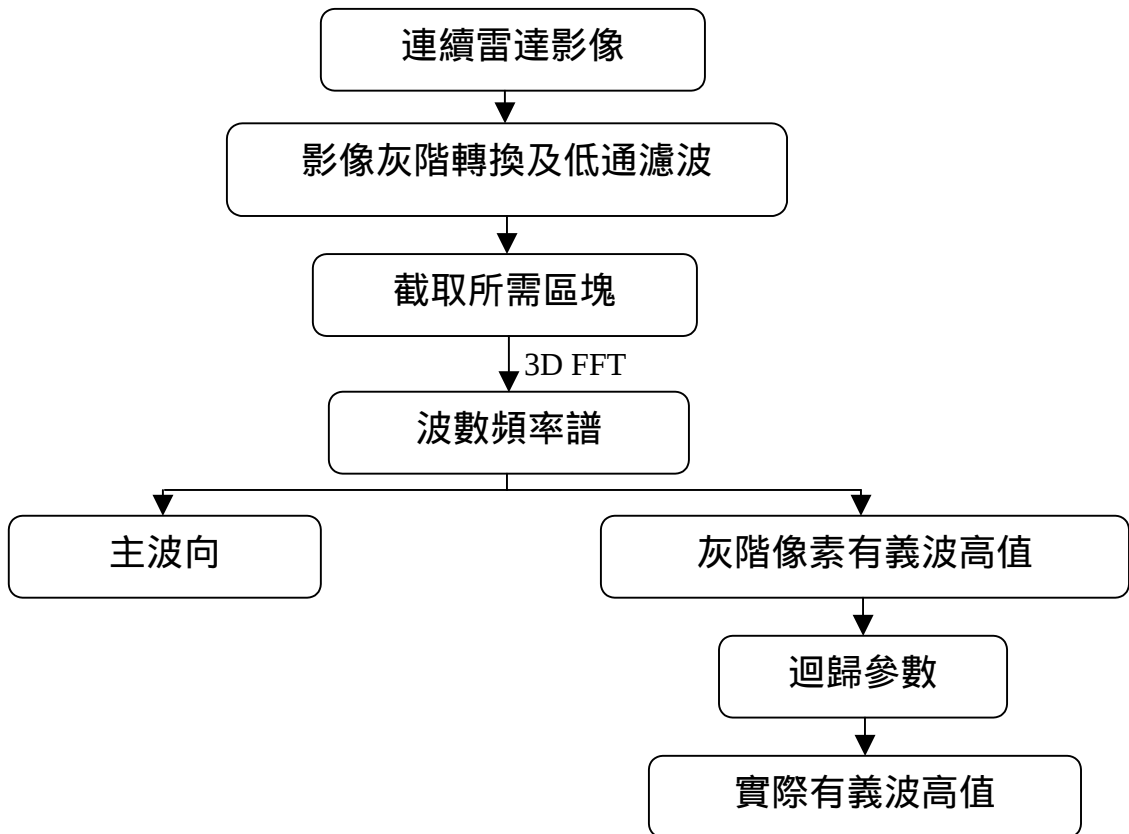


圖 3.1 雷達影像分析作業流程圖

3.2 灰階化

本文所使用的雷達影像是以紅綠藍(RGB)三元色組合而成的色階變化，在雷達影像下方有一條代表雷達回波強弱的顏色尺標。一般所使用的彩色轉灰階的公式採用線性疊加的方式，如下：

$$Gray = \frac{(R + G + B)}{765} \times 255 \dots\dots\dots(3.1)$$

其中

Gray:轉換後的灰階值

R:轉換前的紅色值

G:轉換前的綠色值

B:轉換前的藍色值

此與實際結果有所出入。如圖 3.2 為原始圖，圖 3.3 則是一般轉換公式轉換後的結果。可以發現測站的周圍回波最強，顏色應為的紅色，在轉換後反而變成了灰色，而不是回波強度最強的白色。由圖片底下的顏色尺標也可以發現，原本應該呈現由左而右漸強的狀態，現在反而變成了弱-強-弱（灰-白-灰）的表達型態。這與全彩色板下的強弱不同，如圖 3.4 所示。R、G、B 三顏色的值是先後出現，灰色線是一般轉換公式轉換的結果，呈現近似二次的線性變化，並非近似的線性變化，此線性疊加的方法並不正確。

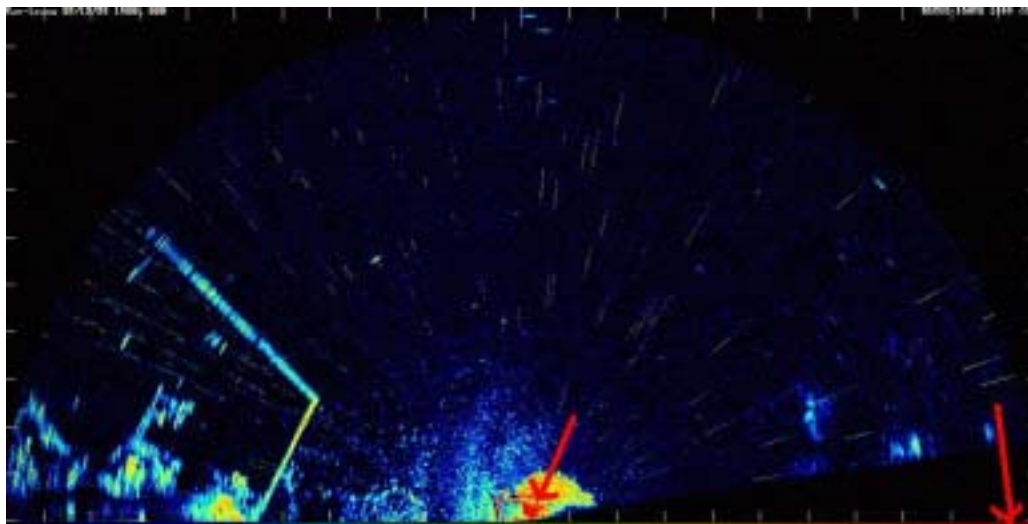


圖 3.2 雷達回波之彩色影像的結果

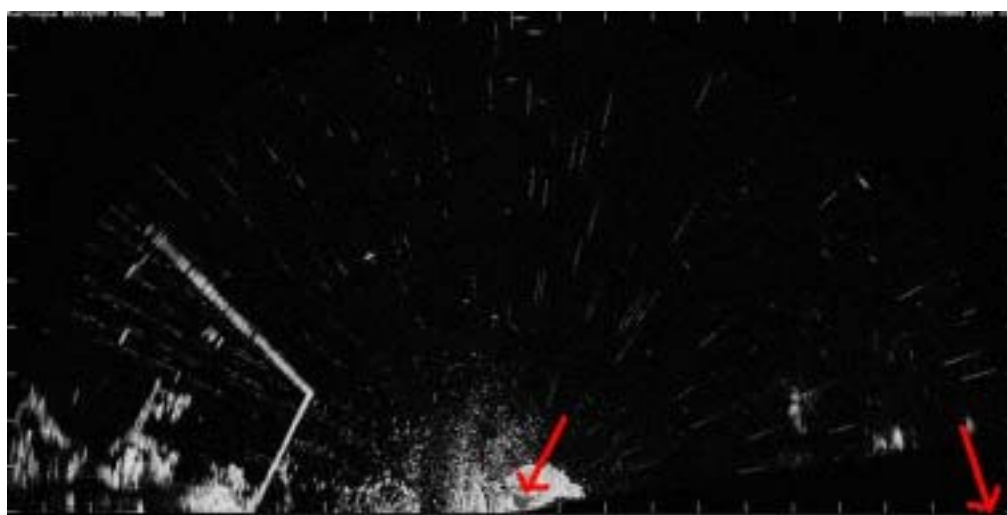


圖 3.3 雷達回波之灰階影像（一般轉換公式）的結果

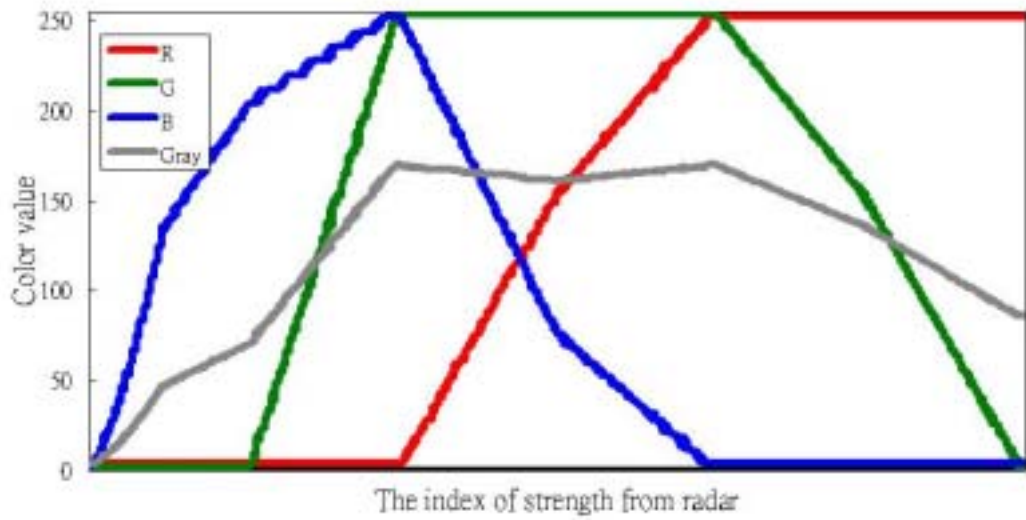


圖 3.4 雷達回波的彩色 RGB 色板及灰階（一般轉換公式）色板變化的結果

經過研究，我們修改了疊加方式。由於三元色的表現時機略有些相位差，當藍色值增加到最大且開始減小時，綠色值才開始增加；而當綠色值增加到最大且開始減小時，紅色值才開始增加；因此將轉換式修改成：

$$B' = \begin{cases} B & (G < 255) \\ 255 + (255 - B) & (G \geq 255 \text{ or } R \geq 255) \end{cases} \quad (3.2)$$

$$G' = \begin{cases} G & (R < 255) \\ 255 + (255 - G) & (R \geq 255) \end{cases} \quad (3.3)$$

$$Gray' = \frac{(R + G' + B')}{1275} \times 255 \quad (3.4)$$

轉換出的灰階圖片(圖 3.5)，於緊臨二號測站附近，轉換前回波最強的部分(紅色)，在轉換後為白色；由圖片底下的顏色尺標也可以發現，尺標也由左而右呈現漸強的狀態。另外在圖 3.6 也可以看到，修正後的灰階變化呈現近似一次的線性變化，而原始模式則呈現近似二次變化線性的形式。

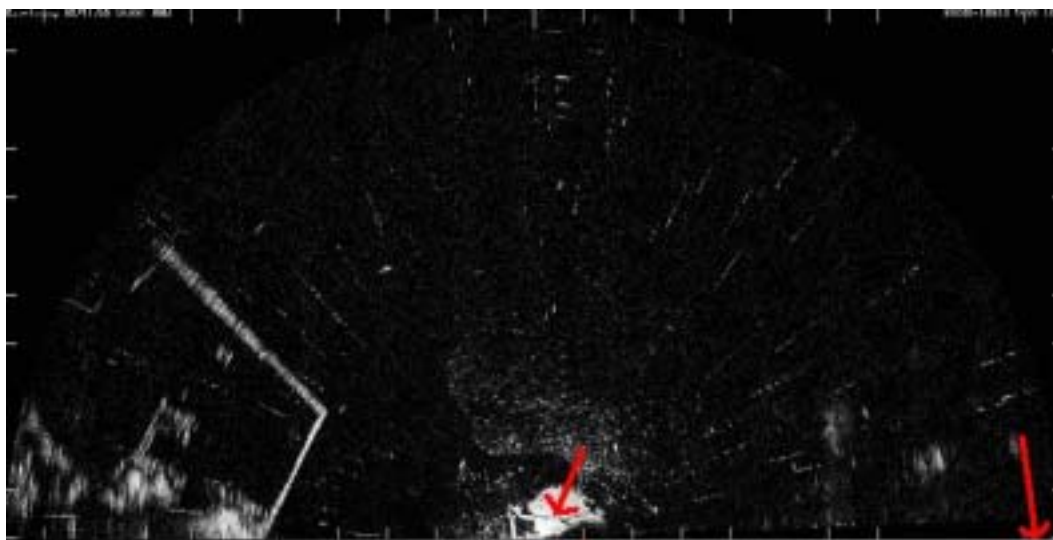


圖 3.5 雷達回波之灰階影像（修正後轉換公式）

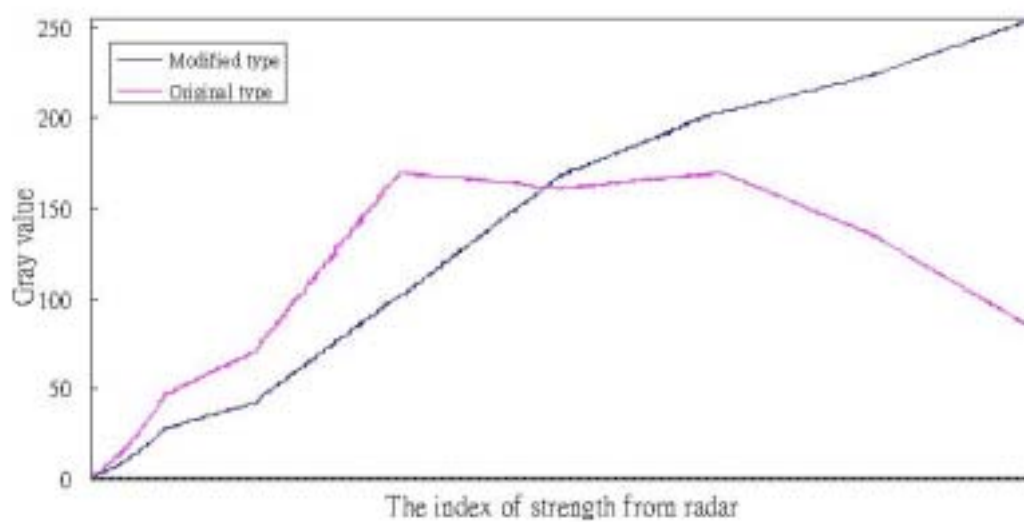


圖 3.6 雷達回波的灰階（一般轉換及修正後轉換公式）色板變化的結果

3.3 影像濾波

影像濾波之功能在於加強或是濾除影像中某些部份之訊號。例如低通濾波主要在於濾除高頻雜訊；高通濾波主要在於濾除影像中之低頻雜訊；於中間值濾波則主要在於去除影像中雪花般之雜訊。而邊緣強化，主要在於強化影像中物體之邊緣軌跡。

空間定義域濾波運作的方式是採罩遮(Mask)來處理每一格素像。本研究採用 3X3 的罩遮來處理，將每一像素及其鄰近八點同時乘上一權重(Weight)，所得之和即為該像素的新灰階值，亦即

$$\begin{aligned} f'(x,y) = & k_{11}f(x-1,y-1) + k_{12}f(x,y-1) + k_{13}f(x+1,y-1) \\ & + k_{21}f(x-1,y) + k_{22}f(x,y) + k_{23}f(x+1,y) \dots\dots\dots(3.5) \\ & + k_{31}f(x-1,y+1) + k_{32}f(x,y+1) + k_{33}f(x+1,y+1) \end{aligned}$$

其中

$f(x,y)$:為原始影像之點 (x,y) 的灰階值

$f'(x,y)$:為運算後為影像之點 (x,y) 的灰階值

k_{ij} :為權重

3.3.1 低通濾波(Low Pass-Filter)

一般影像可能會受到各種雜訊的干擾，透過低通濾波來做影像平滑處理，可以減小這些雜訊。用平均權重的罩遮(Mask)來平滑，每個格子內的值代表 3.5 式中的權重值:

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

3.4 雷達影像分析

3.3.1 示性波高

由於雷達影像之雜訊及電磁波之損耗尚無法排除。故只能以雷達影像像素變化經由第三章 3-24 式直接求取雷達像素的示性波高值，但其值並不會與實際示性波高值相等，可是能藉兩者間的相互關係以迴歸方式求出之間的倍率。所以本文將 2003 年 11 月至 2004 年九月間，以各月所求出的像素示性波高值與觀測樁示性波高值進行迴歸分析，即可得到各月的迴歸線圖及總迴歸線圖(圖 3.7、3.8)，所截取雷達影像的位置及其截取後放大圖如圖 3.9、3.10，而臺北觀測樁之位置座標定位圖如圖 3.11 所示。

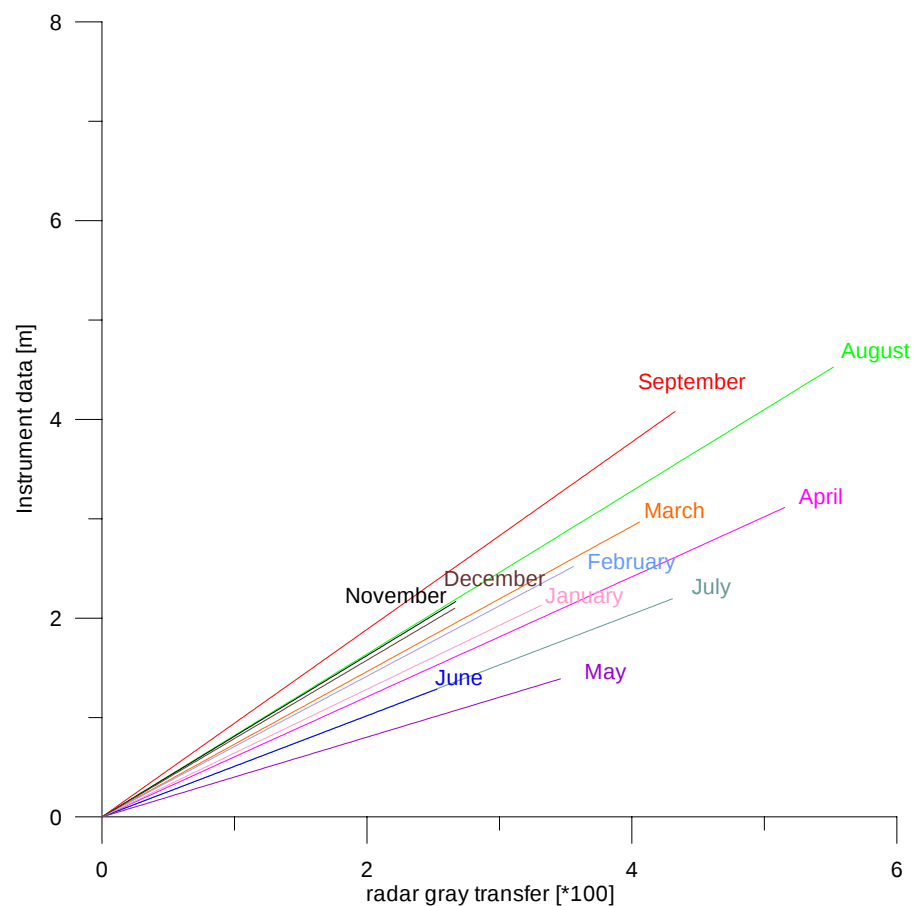


圖 3.7 各月迴歸線圖

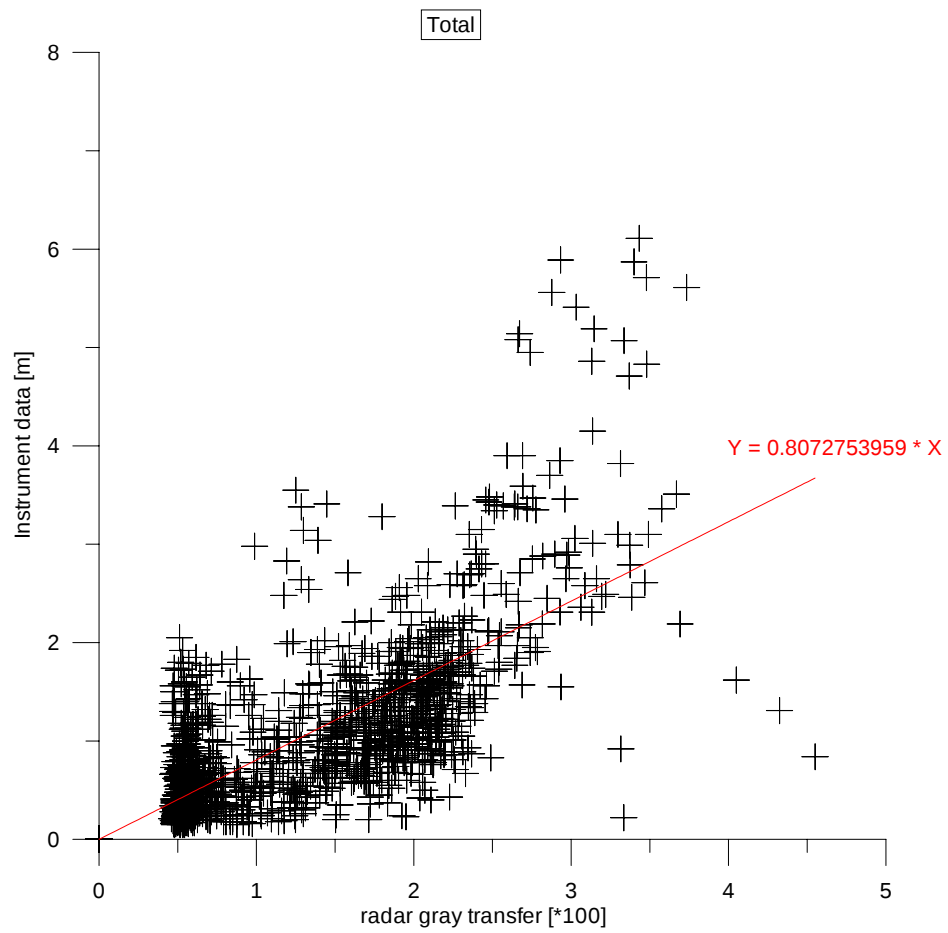


圖 3.8 總迴歸曲線圖

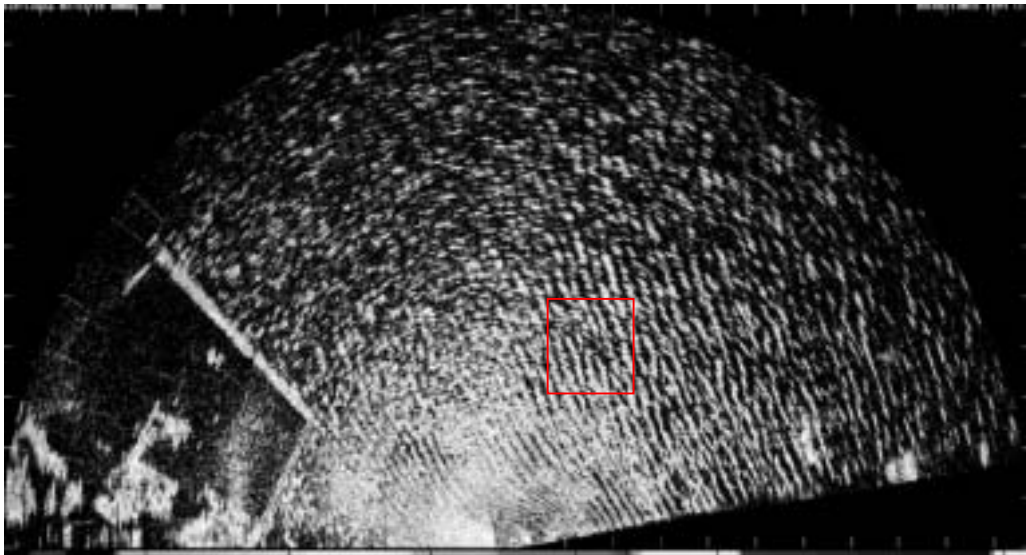


圖 3.9 雷達影像取樣位置圖

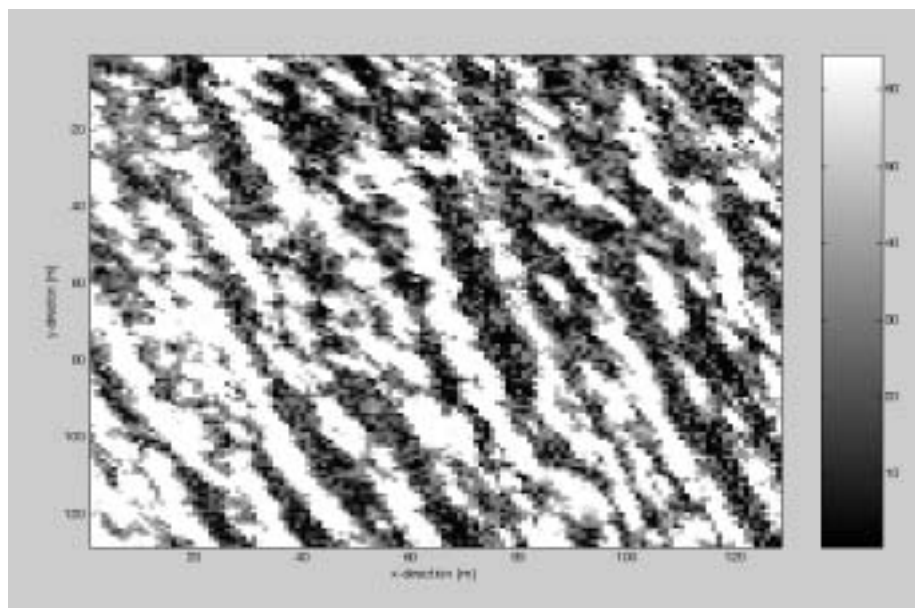


圖 3.10 截取波面放大圖

各月的迴歸圖上有許多散佈於距離迴歸線相當遠的資料點。造成這些資料點的產生，可能是因天氣的影響如下雨等，或是因為雷達影像雜訊所造成的影響，為了去除這些資料點並提高迴歸線的可信度，所以將各月的標準偏差值(表 3.1)平均，假定觀測樁資料與雷達影像所轉換出的像素波高成 1:1 之線性關係(藍線)，平移 2 倍所求得平均標準偏差(粉紅色線)(圖 3.12)，而去除距離迴歸線較遠資料點所剩餘的資料量約有 97%，最後再重新進行一次迴歸(圖 3.13)。所得迴歸公式 $Y=0.785 \cdot X$ 即為用來轉換實際示性波高的轉換倍率，其逐日轉換結果如附錄 A 及 B 所示。

而由圖 3.14 所示即為月平均雷觀影像轉換得的示性波高平均值與觀測樁示性波高平均值群組直條圖，由圖中可發現其各月的平均示性波高值皆相當接近，由此可知所求出的迴歸公式是可信的。

3.1 各月標準偏差及其總平均值

年/月	2003/11	2003/12	2004/1	2004/2	2004/3	2004/4
標準差	0.47	0.52	0.54	0.43	0.48	0.57
年/月	2004/5	2004/6	2004/7	2004/8	2004/9	總平均
標準差	0.50	0.38	0.41	0.67	0.64	0.51



圖 3.11 臺北觀測樁之位置座標定位圖

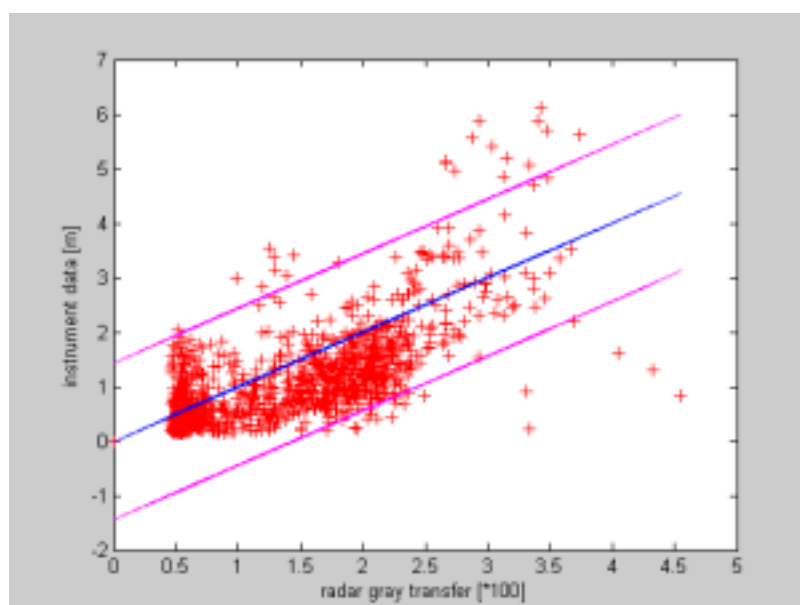


圖 3.12 取二倍標準差截取圖

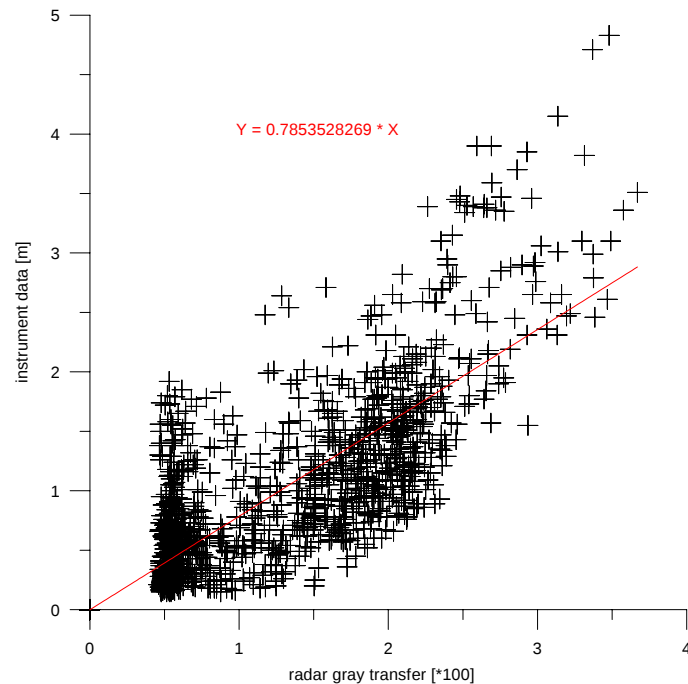


圖 3.13 截取後迴歸曲線圖(二倍標準偏差，資料剩餘 96.93%)

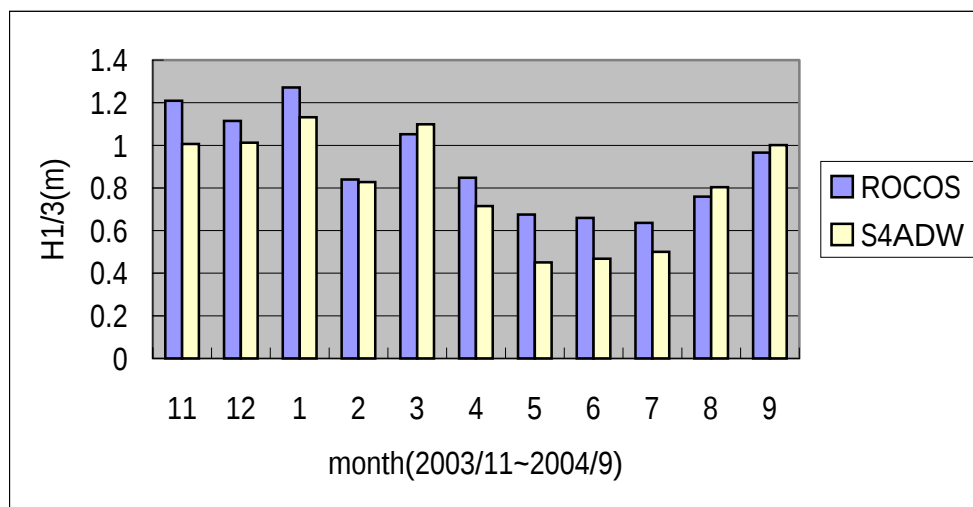


圖 3.14 各月雷觀影像轉換得的示性波高平均值與觀測樁示性波高平均值群組直條圖

3.3.2 主波向

主波向的求得依第三章節所述，是將雷達影像以二維傅立葉轉換的方式，由連續影像之相位關係，消除經轉換後所產生的虛像，進而判斷出波浪主要行進方向。將所有角度分為 16 個方位，各月的主方

向以表列方式表達。表 3.2 所示即為雷達影像經波數頻率譜計算所得的波向分佈，與表 3.3 觀測樁主波向比較，可知有些主方向值差了一個方向，但皆位於容許誤差 10%以內。故可證明以雷達估計波向的可行性。

表 3.2 雷達影像主方向分佈表

月 分	Radar image																Main Direction
	The percentage of wave direction (%)																
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
11	40.48	9.82	5.06	3.27	11.31	0.00	0.00	0.00	0.00	3.87	5.36	1.79	0.30	13.39	0.30	5.06	N
12	53.29	15.06	6.56	1.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.31	8.11	3.48	0.77	6.56	0.00	1.93	N
1	45.47	13.18	3.89	1.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.40	5.14	2.21	0.00	19.55	0.25	2.21	N
2	27.64	30.91	5.46	3.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.28	6.37	2.00	0.00	15.09	0.54	3.27	NNE
3	36.54	30.60	5.45	2.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.05	7.38	3.37	0.00	9.94	0.16	0.96	N
4	17.26	16.92	13.02	5.98	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	6.66	13.19	3.96	0.51	15.90	0.68	2.57	N
5	3.43	30.15	11.84	5.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.35	13.74	3.77	0.19	19.66	0.38	1.33	NNE
6	8.27	32.23	10.19	3.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.61	9.37	5.51	0.28	19.01	0.83	3.30	NNE
7	0.49	18.88	12.11	6.29	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	13.56	13.56	7.50	3.87	19.13	2.42	1.94	WNW
8	15.15	20.50	13.37	3.92	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	3.46	11.40	6.60	1.25	19.97	1.07	2.14	NNE
9	39.86	10.52	13.16	2.25	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	3.76	9.78	3.51	0.00	11.65	0.00	3.14	N

表 3.3 觀測樁主方向分佈表

月 分	S4ADW																Main Direction
	The percentage of wave direction (%)																
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
11	33.93	17.56	5.06	0.60	15.18	0.00	0.30	0.30	0.89	0.89	1.49	2.38	1.79	3.87	3.76	11.01	N
12	27.78	22.22	2.08	0.69	17.36	0.69	0.69	0.69	0.35	0.69	1.74	2.08	1.39	1.74	3.86	13.58	N
1	42.66	22.02	3.56	0.79	0.40	0.40	0.20	0.40	0.60	0.00	0.40	0.79	0.20	0.60	3.77	22.22	N
2	39.90	25.96	3.85	2.40	2.72	0.48	0.48	0.48	0.80	0.64	0.80	0.32	0.80	0.48	3.04	16.51	N
3	45.54	31.25	5.21	1.19	3.61	0.30	0.15	0.30	1.19	0.00	0.15	0.74	1.04	0.89	1.49	5.80	N
4	19.97	38.22	7.18	1.29	3.59	0.43	0.29	0.14	0.00	0.57	1.87	3.16	5.03	5.32	5.03	7.76	NNE
5	12.98	27.89	13.58	3.37	5.93	0.48	0.96	1.28	1.44	1.12	1.28	3.17	5.29	5.45	6.89	6.57	NNE
6	12.50	32.24	15.57	1.75	18.64	0.00	0.22	0.22	0.22	0.66	1.32	3.51	3.82	2.63	2.41	3.29	NNE
7	7.20	5.11	3.22	2.27	6.25	0.38	0.38	0.38	0.57	1.33	5.68	13.21	17.05	15.91	13.07	6.82	W
8	17.71	23.36	8.48	3.27	1.34	0.89	0.89	0.89	0.74	1.34	1.79	5.80	7.74	8.93	6.55	9.97	NNE
9	33.33	33.38	8.68	1.74	0.35	0.35	0.69	1.04	1.04	0.35	1.39	0.69	2.08	3.17	1.39	7.99	NNE

3.5 結果分析

綜合以上所述，若以季節做為分隔的條件其平均結果如下表所示。夏季的示性波高值顯然與觀測樁資料有所差異，造成此誤差的主因可能是夏季時海面的波浪較小引起雷達電磁波回波時產生誤差。而在主波向上大致皆於合理範圍中，故以雷達遙測確實可得出合理的海象資料。表 3.5 即為 2004 年 11 月至 2005 年 7 月之季平均主波向及示性波高值表。

表 3.4 雷達及觀測樁主波向及示性波高季平均比較表

	冬季		春季		夏季		秋季	
項目	主波向 (°)	示性波高 (m)	主波向 (°)	示性波高 (m)	主波向 (°)	示性波高 (m)	主波向 (°)	示性波高 (m)
ROCOS	N	1.19	N	0.91	NNE	0.66	N	0.86
S4ADW	N	1.05	N	0.88	NNE	0.47	NNE	0.90

表 3.5 雷達主波向及示性波高季平均表

	冬季		春季		夏季	
項目	主波向 (°)	示性波高 (m)	主波向 (°)	示性波高 (m)	主波向 (°)	示性波高 (m)
ROCOS	N	1.12	NNE	0.93	N	0.74

第四章 利用『主成份分析』擷取雷達影像資訊

4.1 前言

『主成份分析』(principal Component Analysis, PCA)在海洋學裡稱做『經驗正交函數』(empirical orthogonal function, 簡稱 EOF)。它是多元統計分析(或稱『多參數統計』, multivariate statistical analysis)裡的一種方法。在社會科學領域裡一般把這種方法稱做『因素分析』(factor analysis)。簡單地說,主成份分析就是『把一些具有複雜關係的因子(樣本或變量)歸結為少數幾個主要綜合因子,使分析方法大為簡化,而又使所丟失的信息達到最小限度』(陳和馬, 1991)。本文裡將『主成份分析』與『經驗正交函數』互用,不特別做區分。一般來說,利用主成份分析的目的是,希望藉能著這個方法:

- 減少變量的個數(variable reduction);
- 找出各個變量之間的關係(structure detection; variables classification)。

從統計數學的角度來說,找出主成份就是轉動原來的座標而使得變異成為極大值(variance maximizing rotation, varimax rotation)。一般來說,一個(物理)現象往往並不是單一一個因素所引起,而是許多因素交互作用的結果。因此,僅用一個主成份並不能就代表整個實驗(量測)的結果。在主成份分析中,就試著再找出另一個『成份』來,使剩下的變異成為極大值;接著再找第三個成份……。因為每個『成份』都只是要使前一個『成份』沒有處理到的變異變成極大值,所以每個『成份』都是各不相干的(uncorrelated)。換句話說,每個『成份』都是正交(orthogonal)。

不論是在海洋科學及氣象科學裡,都常用『主成份分析』來探討量測的結果(請參考 Emery 和 Thomson, 1998; von Storch & Zwiers, 1999)。很多學者也用它來分析衛星影像(Schowengerdt, 1997)。奇怪的是,據筆者所知,似乎並沒有學者用這個方法來分析雷達影像裡的波浪。本文就是試著應用這個方法從雷達影像裡分析波場初步結果的

報告。以下將本報告再分成三個部份。第一部份是理論敘述；在這裡要簡單地描述一下所用的理論及數學方法。第二部份則是有關目前結果的討論；藉著一個理論的波場來探討目前程式分析結果所代表的意義。最後一部份則是結論。在這裡要就目前的結果討論分析雷達影像裡波場的可能性。

4.2 理論敘述

4.2.1 一些有關數學的部份

前前面提過了，『經驗正交函數』(EOF)分析是用數學的方法在量測資料裡找出某種(些)組合方式，並希望能用這種組合方式涵括量測資料最多變異的(variance)。一般來說，可以把量測結果寫成一個二維的矩陣。在海洋學裡，因為要量測海洋某些特性、成份等在某個海域的組成方式(或變化)，所以其中的一維多半是量測的地點；一般把它看成是組成結構(structure)的變化。另一維則多半是時間。這可以看成取樣(sampling)的結果。Hartmann (2005)指出，在分析這樣的量測結果時，會得到二套相關的結果。其中一個是描述量測對象隨地點的變化；另一個則是隨時間的變化。Hartmann 把前者叫做『經驗正交函數』；而把描述隨時間變化的稱做『主成份』(Principal Components, PC)。這兩者之間有個一對一的關係。

對一個二維的矩陣 X

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1N} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{M1} & \cdots & x_{MN} \end{bmatrix} = x_{i,j} \quad i=1,\dots,M; \quad j=1,\dots,N \quad \text{.....(4.1)}$$

來說，可以藉著矩陣的乘法得到兩個矩陣。在(4.1)式中， x 是量測的結果。其中下標 i 指的是位置， j 指的是時間。因此， $x_{i,j}$ 就表示是編號 i 的地點在 j 時所量測到的結果。這兩個矩陣分別是：

$$\mathbf{C}' = \mathbf{X}\mathbf{X}^T = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1N} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{M1} & \cdots & x_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1M} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{1N} & \cdots & x_{MN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1M} \\ \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{M1} & z_{M2} & \cdots & z_{MM} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

以及

$$\mathbf{C} = \mathbf{X}^T \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1M} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{1N} & \cdots & x_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1N} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{M1} & \cdots & x_{MN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z'_{11} & \cdots & z'_{1N} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ z'_{N1} & \cdots & z'_{NN} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

這兩個矩陣描述的都是實驗數據“分散”(dispersion)情形。所不同的只是前者是有關的量測對象在空間上的關係；而(3)式則是描述每次取樣間的相關性而已。

式(4.2)和式(4.3)都是所謂的『相互關係矩陣』(covariance matrices)。因此，它們是對稱的(symmetric)。

根據理論，任何一個對稱的矩陣 $\mathbf{R}$ 都可以化解成下列的形式：

$$\mathbf{R}\bar{\mathbf{e}}_i = \lambda_i \bar{\mathbf{e}}_i \quad \mathbf{R}\mathbf{E} = \mathbf{E}\mathbf{L} \quad (4.4)$$

其中 $\mathbf{E}$ 是含(單位)『特徵向量』(eigenvectors) $\bar{\mathbf{e}}_i$ 的矩陣，它的每一列都是一個特徵向量；矩陣 $\mathbf{L}$ 的對角元素是所謂的『特徵值』(eigenvalue) λ_i ，其它元素的值則都是零。

可以把特徵向量 $\bar{\mathbf{e}}_i$ 以及它所屬的特徵值 λ_i 看成對原來矩陣 $\mathbf{R}$ 的座標轉換。藉著這個轉換，矩陣 $\mathbf{R}$ 變成了一個對角矩陣。這樣一來，所有的變數都變成互不相關了。因此，沿著特徵向量所定出的新『方向』可以「找到」極多的變異，而賸下的變異則由於每個特徵向量正交的緣故與它無關。特徵值則表示有多少成份(百分比)的變異是與這個特徵向量有關的。

很多學者(請參考如 Wall 等人, 2003; Bjornsson & Venegas, 1997)都指出，可以用『奇異值分解』(Singular Value Decomposition, SVD)

的方法從量測的資料矩陣(data Matrix, X)裡直接得到與『經驗正交函數』及『主成份』有關的結果。Emery 和 Thomson (1998)更認為，在處理例如衛星影像序列等大量資料時利用這種方法應該會較節省時間。

假設用 X 來表示一個 $m \times n$ 的矩陣，則由矩陣的理論可以得知(參考如 Press 等人，1992)可以求得可以得一個 $m \times m$ 的正交矩陣 (orthogonal matrix) U ，一個 $n \times n$ 的正交矩陣 V ，以及一個 $m \times n$ 的矩陣 S ：

$$X = USV^T \quad \text{.....(4.5)}$$

一般對雷達影像序列來說，採樣的地點 - 影像上每個光點 (pixel) - 會比採樣的次數多很多， $m \gg n$ 。¹因此，(4.5)式可以改寫成：

$$X = [U' | 0] \begin{bmatrix} S' \\ 0 \end{bmatrix} V^T \quad \text{.....(4.6)}$$

其中 S' 是個 $n \times n$ 的對角矩陣 (diagonal matrix)：

$$S' = \begin{pmatrix} s_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & s_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & s_n \end{pmatrix} \quad \text{.....(4.7)}$$

(4.6)式就是 X 的奇異值分解形式，純量 $s_1, s_2, \dots, s_n$ 為 X 的奇異值， U 的行向量是 X 的左奇異向量(left singular vector)， V 的行向量則是 X 的右奇異向量。Hartmann (2005)指出， U ($m \times m$)的行是 XX^T 的特徵向量；而 V ($n \times n$)的行則是 XTX 的特徵向量； S ($m \times n$)的值 s_i 是 XX^T 和 XTX 特徵值的方根。雖然在數學上並沒有很大的區別，不過由於 XX^T 是各個量測點之間(在取樣時間內的)相互關係，因此，一般把 U 的行向量就是經驗正交函數的『特徵向量』(eigenvectors)，而 V 的行向量就是經驗正交函數的正規化『特徵值』(eigenvalues, 『主

¹在本文裡假設資料矩陣 X 的列代表取樣的地點，而行則為取樣的次數。

成份』)；而 S 的純量 s_i 則反應了所對應各個特徵向量與特徵值的大小幅度。

一但得到了特徵向量和特徵值之後，就可以藉著：

$$\mathbf{D}_j^i = \mathbf{U}_{ij} \Lambda_{ii} \dots\dots\dots (4.8)$$

(4.8)表示，矩陣 $\mathbf{U}$ 的每一行都乘上它所對應的特徵值。 $\mathbf{D}_j^i$ 是個 $m \times n$ 的矩陣，它的第 j 行所代表向量是第 j 個特徵向量在資料矩陣 $\mathbf{X}$ 中所佔的『成份』。(4.8)中的矩陣 Λ 是：

$$\Lambda = \frac{\mathbf{S}\mathbf{S}^T}{n} \dots\dots\dots (4.9)$$

藉著主成份分析可以找到(量測)資料裡面的波動成份。舉個例來說，如果資料裡含有一個波：

$$\phi(x, t) = f(x) \cos(\omega t) \dots\dots\dots (4.10)$$

那麼藉由主成份分析可以一個經驗正交函數 $f(x)$ ，而它的主成份則以 $\square$ 的頻率隨時間而變化。不過，從(4.10)式可以看出，這是一個所謂的『駐波』。

從上面所談到的可以知道，『主成份』的大小與所謂的『變異』成正比－事實上，比較正確的說法是與『變異』的平方根成正比。對一個『均質』的海面來說，由於波浪的能量也與『變異』有關，因此，(理論上來說)可以把各個『主成份』看成是海面上不同波長、波高的自由波。正因為這些波是所謂的自由波，因此它們是相互獨立－不相干－的。就數學上來說，兩個完全不相關的函數就構成了所謂的『正交函數』。正因為這個緣故，筆者認為，利用『主成份分析』海面變化的量測資料時，可以把所得到結果當成是與各個自由波振幅(能量)成正比的資訊。第一個主成份因為所含的能量(變異)最大，所以它應該與頻譜裡『頂點頻率』(peak frequency)所代表的波成正比；而第二

個主成份則與(頻譜中)次一個含最多能量的波有關；其餘類推。在物理上來說，就像是把一個變化多端的海面看成由這幾個大的自由波，以及一些能量不大的波，所構成的一樣。而藉著『主成份分析』就把這些能量不大的波給『過濾』掉了。因此，只會得到由少數幾個『主成份』(大波)所代表的海面。

Preisendorfer 和 Mobley (1988)就指出，一般常用的主成份分析方法並不能分辨移動的訊息(propagating signal)。Horel (1984)在他的文章裡介紹了一個修正的方法 - 『複數經驗正交函數』(complex empirical orthogonal function, 簡稱 CEOF)來解決這個問題。Stockdon 和 Holman (2000)利用『複數經驗正交函數』探討了從影像中測定波浪相位速度的問題。Ruessink 等人(2000)也使用這種技巧探討海邊沙洲(sand bar)的移動情形。

4.2.2 複數經驗正交函數

Horel (1984)建議，把原先的時間序列加上它們的 Hilbert 轉換來探討(量測)資料裡面的行進波成份。對每一個 $x(y,t)$ 序列來說，可以藉著 Hilbert 轉換而得到一個與原先序列相差 $\frac{\pi}{2}$ 的序列 $x^H(y,t)$ 。譬如說，(根據理論)可以把序列 $x(y,t)$ 展成：

$$x(y,t) = \sum_{\omega} [a_m(y,\omega) \cos(\omega t) + b_m(y,\omega) \sin(\omega t)] \dots (4.11)$$

式(11)中的 y 暫時視為定常數。它的 Hilbert 轉換則可寫成：

$$x_m^H(y,t) = \sum_{\omega} [b_m(y,\omega) \cos(\omega t) - a_m(y,\omega) \sin(\omega t)] \dots (4.12)$$

將這兩個序列組合起來可得：

$$X(y,t) = x(y,t) + ix^H(y,t) \dots (4.13)$$

得到了序列 $X(y,t)$ 之後，就可以照一般的作法進行主成份分析了。Emery 和 Thomson (1998) 在他們的書中詳盡地矩陣或奇異值分解估算特徵向量和特徵值的步驟。

4.3 解析及討論

4.3.1 理論波場的解析結果

模擬多方向不規波的時候所採用的是最常見的雙重加法(double summation, Miles & Funke, 1987, 1988):

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M A_{ij} \cos \left\{ \omega_i t - k_i \left[x \cos(\theta_j) + y \sin(\theta_j) \right] + \varepsilon_{ij} \right\} \quad (4.14)$$

其中 $\omega_i = i(2\pi\Delta f)$ 是第 i 個波的頻率， $\omega_i = \frac{2\pi}{T_i}$ ， T 則是周期； k_i 是第 i 個的波數， $k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}$ ， λ_i 是波長； θ 是波進行的方向與 x -軸的夾角， θ_0 則是主方向， $\theta_j = \theta_0 + j\Delta\theta$ ； η 是水深；(4.14) 式中的波長與周期之中有著(線性的)『分散關係』：

$$\tanh(kih) = \frac{w_i^2}{g} \quad (4.15)$$

最後，(4.14) 式中的波浪振幅， A_{ij} ，與隨機相位， ε_{ij} 's，則是由：

$$A_{ij} = \sqrt{2S(\omega_i, \theta_j) \Delta\omega \Delta\theta} \quad \text{and} \quad \varepsilon_{ij} = 2\pi U[0,1] \quad (4.16)$$

$S(\omega_i, \theta_j)$ 是『目標頻譜』。通常都是用一個經驗頻譜 - 如 Pierson-Moskowitz、JONSWAP 或 Bretschneider-Mitsuyasu 等 - 再乘上一個散佈函數：

$$S(f, \theta) = S(f) \cdot G(f, \theta) \quad (4.17)$$

$$G(f, \theta) = G_0 \cos^{2s}(\frac{\theta}{2}) \dots\dots\dots (4.18)$$

其中：

$$G_0 = [\int_0^{2\pi} \cos^{2s}(\frac{\theta}{2}) d\theta]^{-1} \dots\dots\dots (4.19)$$

$$s = \begin{cases} S_{\max} \cdot (f / f_p)^{-2.5} & f \geq f_p \\ S_{\max} \cdot (f / f_p)^5 & f \leq f_p \end{cases} \dots\dots\dots (4.20)$$

Goda (2000)在書中對方向頻譜做了相當詳細的討論。模擬時所採用的目標頻譜是 JONSWAP 頻譜。它的主頻是 $f_p = 0.2$ Hz；散佈指標 (spreading index) $S_{\max} = 50$ ；有義波高 $H_s = 1.5$ [m]；而主入射方向則是 $\theta_0 = 25^\circ$ 。圖 4.1 是目標頻譜的立體圖。

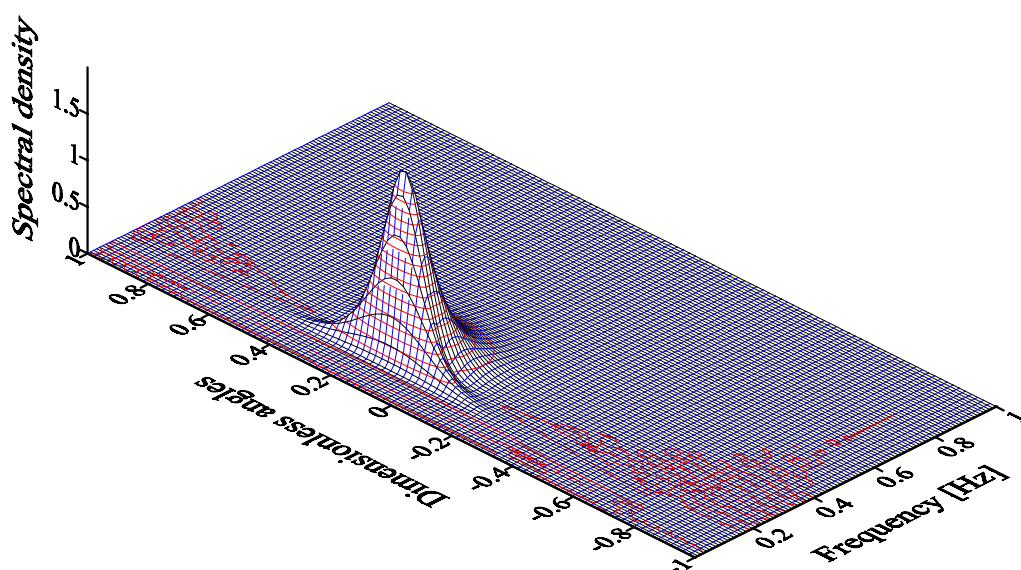


圖 4.1 目標頻譜的立體圖

在數值模擬時，用了一個 $X = Y = 768 \times 768$ [m]的正方形區塊；再分割成 $\Delta x = \Delta y = 3$ 米間隔的小塊。每隔 $\Delta t = 0.5$ 秒模擬一次水面變化，一共模擬了 256 次，這也就是說整個時間 $T = 128$ [sec]。圖 4.2 是 $T = 64$ 秒時的水面變化。

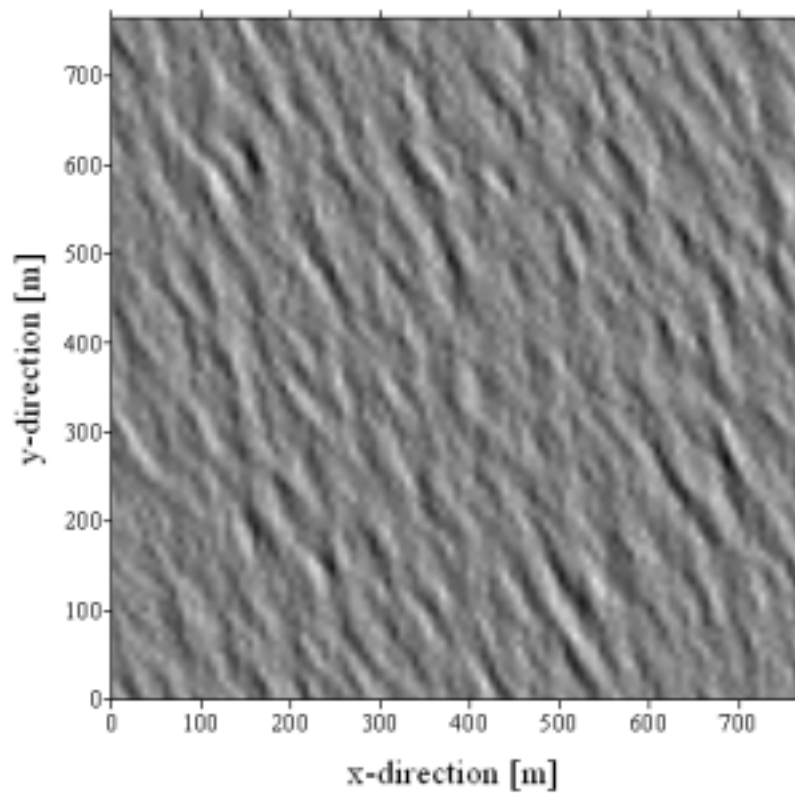


圖 4.2 $T = 64$ 秒時的水面變化

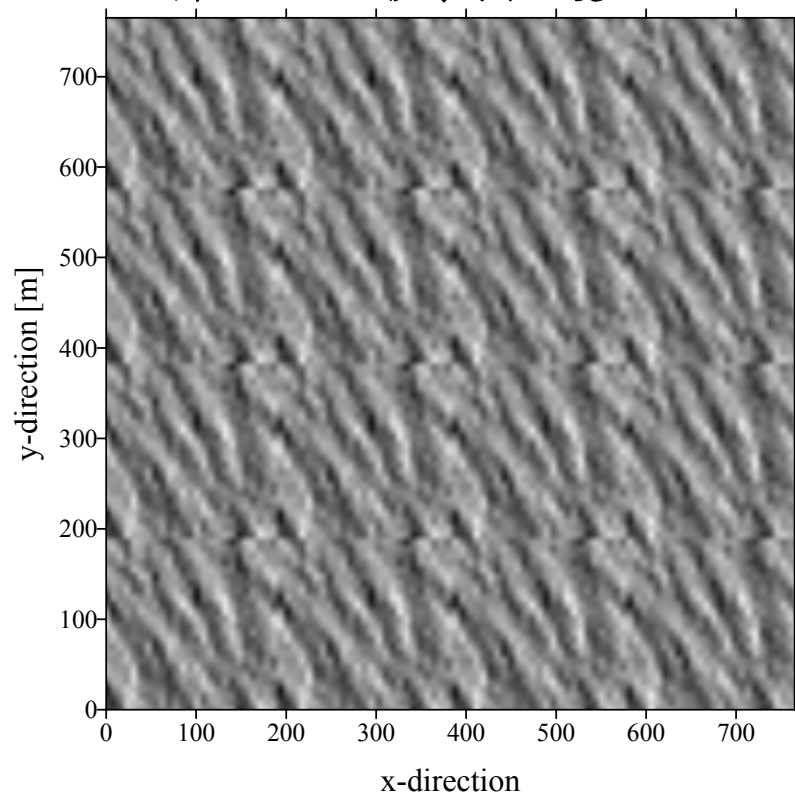


圖 4.3 由第一個『主成份』所構成的海面變化

圖 4.3 所顯示的是由第一個『主成份』所構成的海面變化。從圖中可以看出來，這時候海面上的『波浪』是由一個單一頻率的波所構

成的。從圖 4.3 中也可以看出，這張圖是十六張小圖的組合結果。這是因為在做主成份分析的時候是把『影像』分割成 64×64 的小塊再做計算。否則的話，矩陣就會變成太大－目前已經需要用到 4096×4096 的矩陣－而無法執行了。目前不確定，圖 4.3 中各個小塊間的波不連續到底是真實的現象，還是先分割再組合的結果。

圖 4.4 是第二個『主成份』所構成的海面變化。同圖 4.3 一樣，這時波的波長相當均勻，同時也大都朝一個方向前進。然而，從第三個『主成份』開始，海面上的『波浪』就變得不那麼均勻一致了(圖 4.5)。而隨著『主成份』的序秩愈大，海面就變得愈不規則。圖 4.6 和圖 4.7 分別是第十和第十八個『主成份』所構成的海面變化。

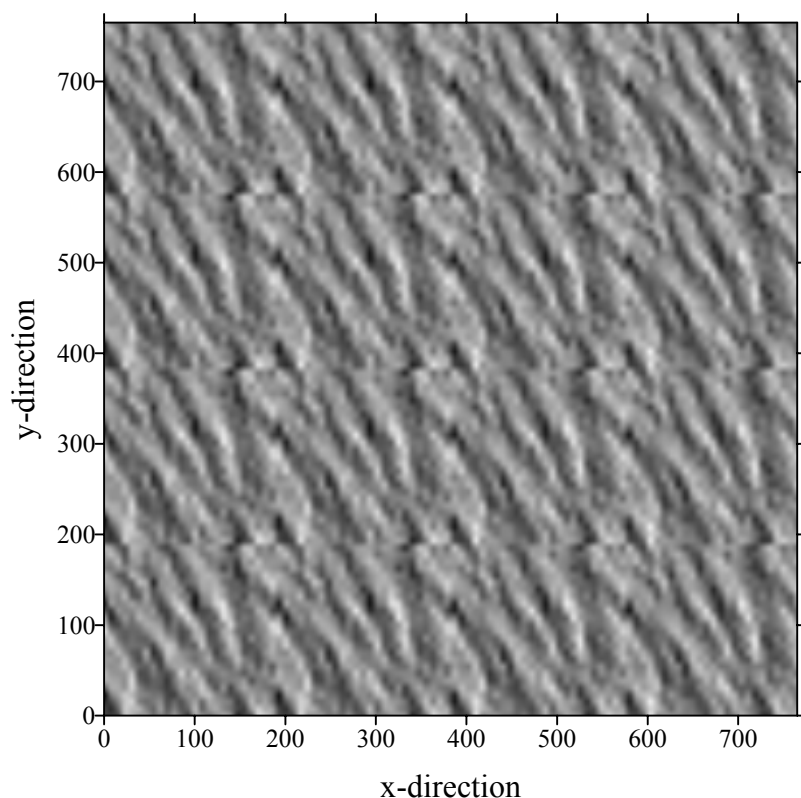


圖 4.4 由第二個『主成份』所構成的海面變化

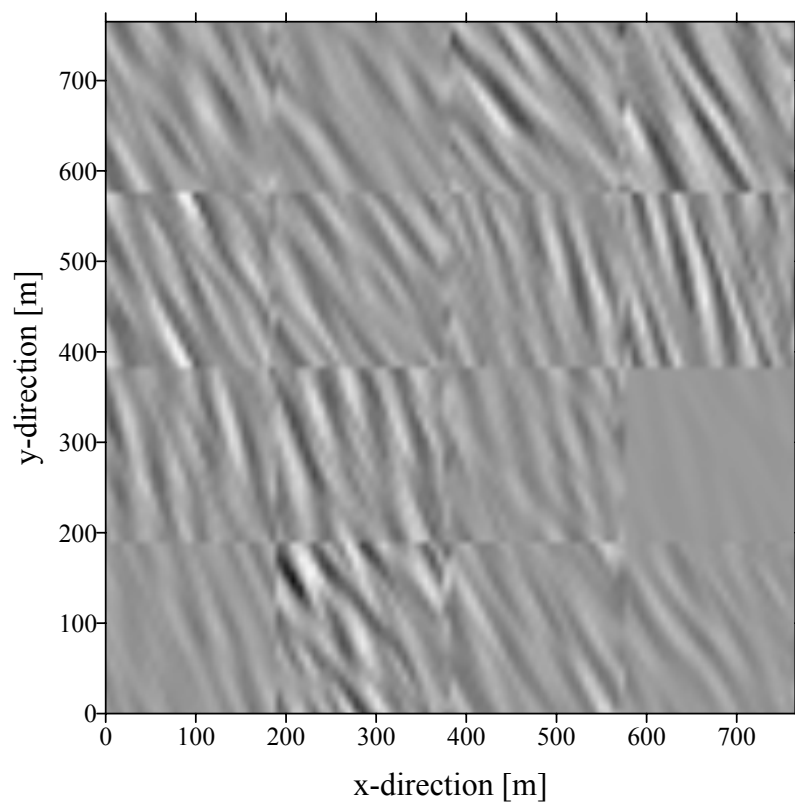


圖 4.5 由第三個『主成份』所構成的海面變化

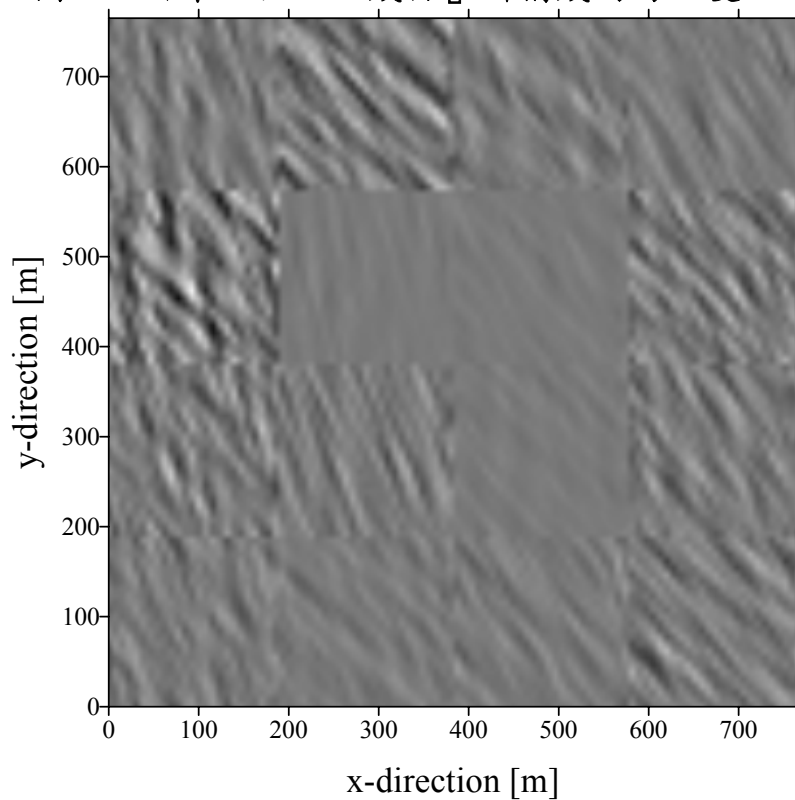


圖 4.6 由第十個『主成份』所構成的海面變化

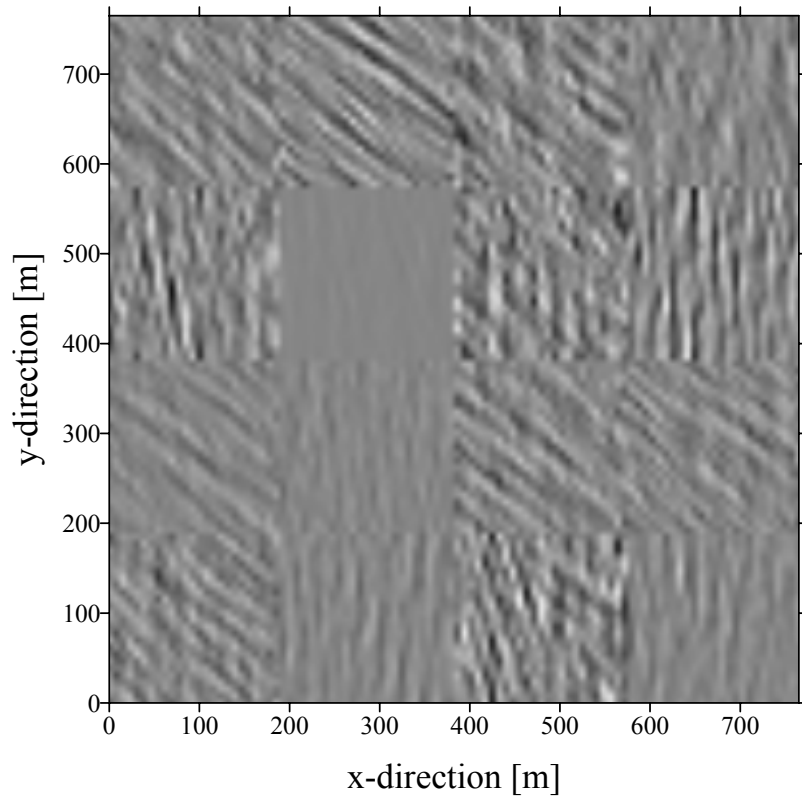


圖 4.7 由第十八個『主成份』所構成的海面變化

4.3.2 討論

許多學者都指出，『主成份』分析的好處是能在紛擾的訊息中找到少數幾個訊號－成份。用這幾個成份就可以勾畫出整個資料的大致輪廓。另外，根據 Jolliffe (2002) 的說法，在決定主成份的個數時，可以採用：

$$t_m = \frac{\sum_{k=1}^m \lambda_k}{\sum_{j=1}^P \lambda_j} \times 100\% \quad (4.21)$$

的標準來決定要保留的個數。(4.21)式中的是 t_m 是 m 個主成份所佔全部 P 個主成份的百分比。Jolliffe 並認為， t_m 的大小可以選在 70~90 之間。不過，在做數值實驗時，雖然將 t_m 的大小定在 80 – 即 80% 的變異量 –，卻得保留 18~20 個主成份纔能達到要求。表 1 是 18 個主成份的年均變異和它們所佔總變異量的百分比。

表 4.1 各個主成份序秩、所含變異量、以及佔全部變異量百分比

主成份序 秩	所含變異量 (Variance explained)	佔全部變異量 百分比 (%)
1	502.12	4.07
2	434.47	3.52
3	379.72	3.08
4	342.32	2.78
5	313.28	2.54
6	290.34	2.35
7	271.32	2.20
8	254.89	2.07
9	240.40	1.95
10	226.04	1.83
11	212.99	1.73
12	204.58	1.66
13	193.73	1.57
14	184.10	1.50
15	174.39	1.42
16	167.00	1.35
17	158.88	1.29
18	151.29	1.23

從表 4.1 可以看出來，各個主成份所括的變異並不多。這應該是當初在做主成份分析的時候，把每個時間序列都『正規化』

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{\sigma_i} \quad (4.22)$$

了的原因。(4.22)式中的 $\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij}}{N}$ 是第 i 列(時間)序列的平均值，

$\sigma_i = \frac{\sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{N-1}$ 則是它的變異。雖然這是一般正規的作法 - 參考 Emery 和 Thomson (1998)，不過卻可能並不能在處理海面上波浪(影像)資料時使用。

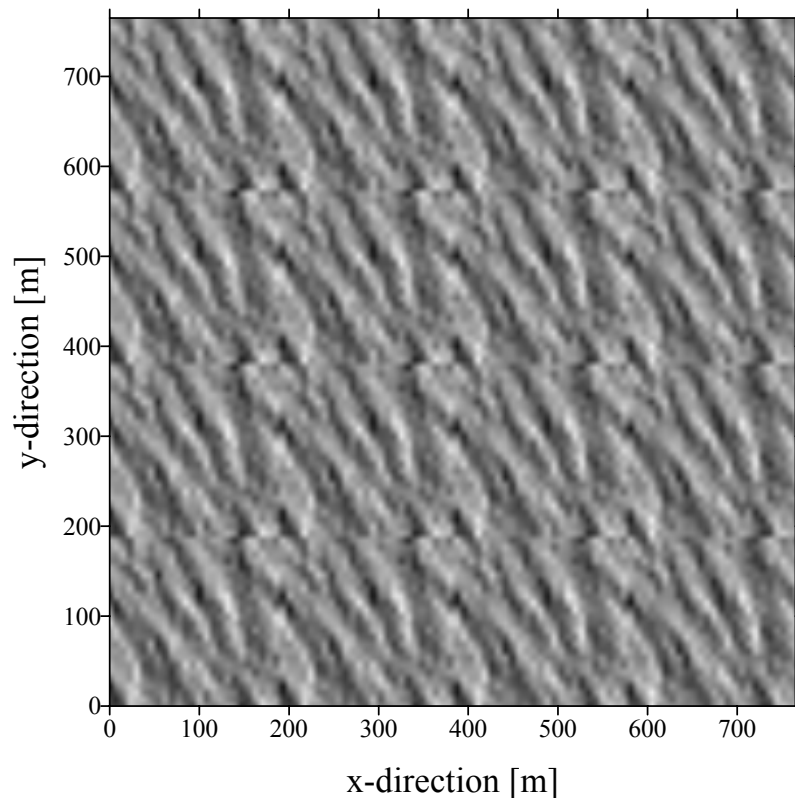


圖 4.8 保留各個時間序列本身變異後第一個『主成份』所構成的海面變化

Hartmann (2005)認為，在做主成份分析時，如果有關的資料是對某一個變數－譬如說在本文裡的水面變化－在許多點的量測結果的話，那麼，有時候不要把序列正規化會比較好一點。他指出，這樣的話，如果有些成份的變異比較大的話，就會有比較大的權重。Hartmann認為，這是因為一旦做了正規化的處理後，所有成份所得的權重就變得都相同了。這樣一來，主成份分析突顯出來的結果將只會是『結構』上的差異，而不是變化大小(振幅)的差異。對海面上的波場來說，所謂的『變異』是與波浪所含的能量有關的，它與波浪振幅的平方成正比。對同一波長(周期)的波來說，振幅小的波浪在頻譜中所佔的份量就要比振幅大的波浪小很多。因此，在分析海面上的波場時，不應該將波浪的時間序列正規化。

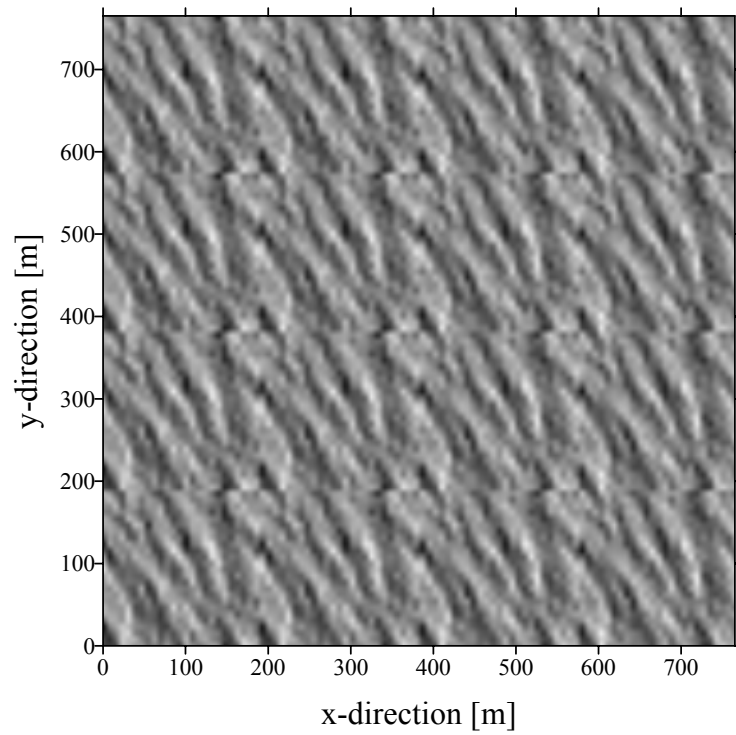


圖 4.9 保留各個時間序列本身變異後第二個『主成份』所構成的海面變化

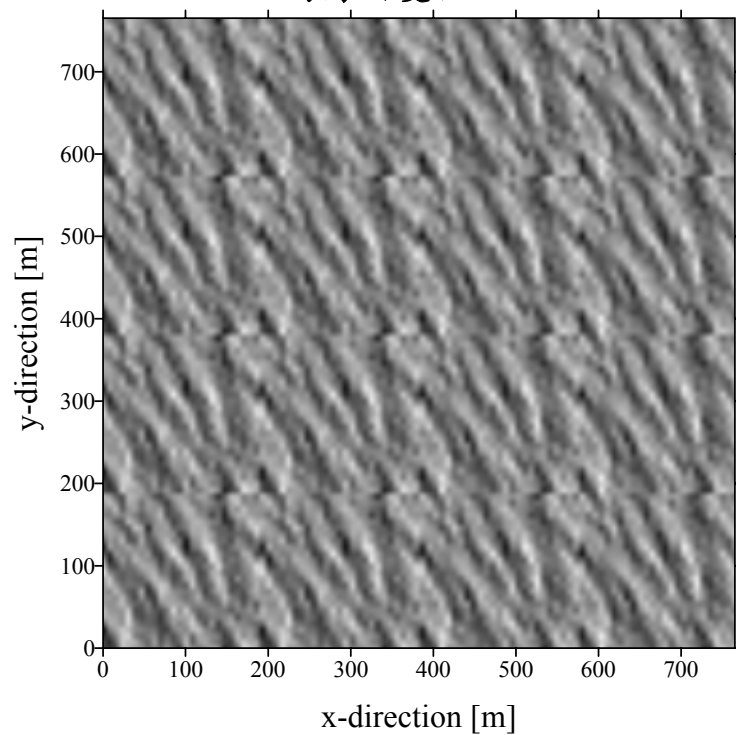


圖 4.10 保留各個時間序列本身變異後第四個『主成份』所構成的海面變化

圖 4.8~圖 4.10 分別是保留各個時間序列本身變異後第一、第二、

及第四個『主成份』所構成的海面變化。從這些圖裡可以看出來，不將波浪的時間序列正規化的結果要比正規化後的結果好得多。不過，從表 2 可以看出來，各個主成份所含括的變異仍然不多。這和學者分析其它資料所得到的結果不同 - 參考如 Emery & Thomson (1998); Von Storch. & Zwiers (1999); Ruessink et al. (2000)以及 Stockdon & Holman (2000)等。目前不能確定問題到底是出在那裡。

表 4.2 各個主成份序秩、所含變異量、以及佔全部變異量百分比 (保留各個時間序列本身變異後的結果)

主成份序 秩	所含變異量 (Variance explained)	佔全部變異量 百分比 (%)
1	189.82	4.14
2	164.44	3.59
3	143.32	3.13
4	129.20	2.82
5	117.84	2.57
6	108.69	2.37
7	101.91	2.22
8	94.27	2.08
9	90.01	1.96
10	84.70	1.85
11	79.50	1.73
12	76.52	1.67
13	72.31	1.58
14	69.15	1.51
15	64.18	1.42
16	61.98	1.35
17	59.21	1.29

如果配合雷達影像採取 $X = Y = 1011.20 \times 1011.20$ [m]的正方形區塊；分割成 $\Delta x = \Delta y = 7.9$ 米間隔的小塊。再每隔 $\Delta t = 2.5$ 秒模擬一次水面變化，一共模擬 128 次。這也就是說整個時間 $T = 320$ [sec]的話，那麼，就可以把整個『海面』只分割成四張小圖。再把主頻定成 $f_p = 0.1$ Hz；散佈指標 $S_{max} = 30$ ；有義波高 $H_s = 2.50$ [m]；而主入射方向則是 $\theta_0 = 35^\circ$ 以驗證分析程式。圖 4.11 是目標頻譜的立體圖，圖 4.12 則是第一個『主成份』所構成的海面變化圖。

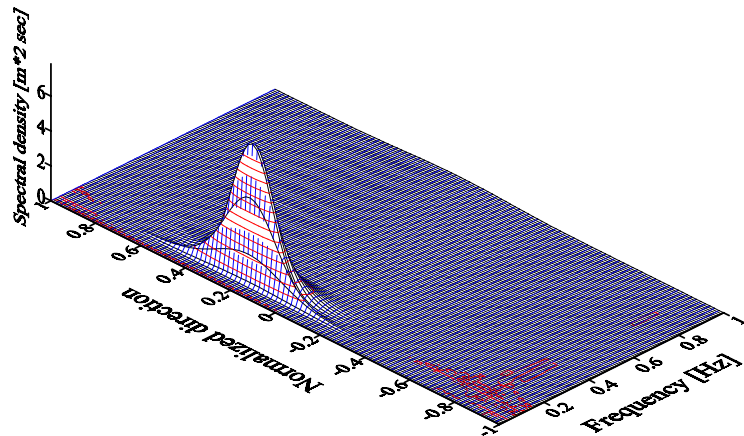


圖 4.11 目標頻譜的立體圖(JONSWAP, $f_p = 0.1$ Hz, $S_{max} = 30$, $H_s = 2.50$ m)

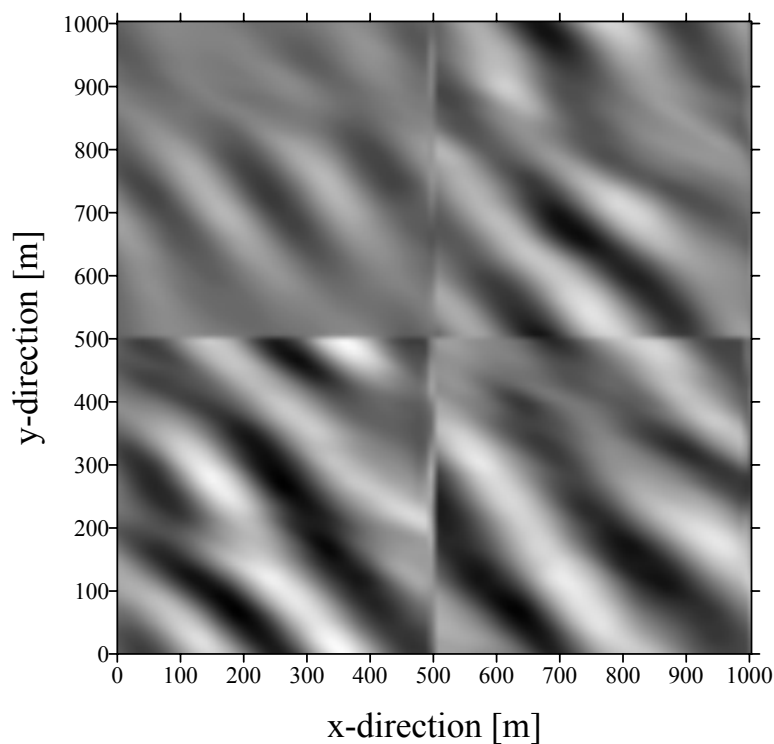


圖 4.12 由第一個『主成份』所構成的海面變化圖($\Delta x = \Delta y = 7.9$ m)。

圖 4.13 和圖 4.14 分別是由第四和第七個『主成份』所構成的海面變化圖。從這些圖裡可以看出來，隨著主成份『階數』愈高，海面就愈不規則。另外，從圖 4.12~4.14 也可以看出來，各個主成份的『振幅』也似乎變得愈來愈小了。這是因為各個主成份所佔的變異隨著主

成份的『階數』而愈來愈小，而各個『波』的『振幅』則與變異的根方成正比。表 4.3 是各個主成份序秩、所含變異量、以及佔全部變異量百分比。

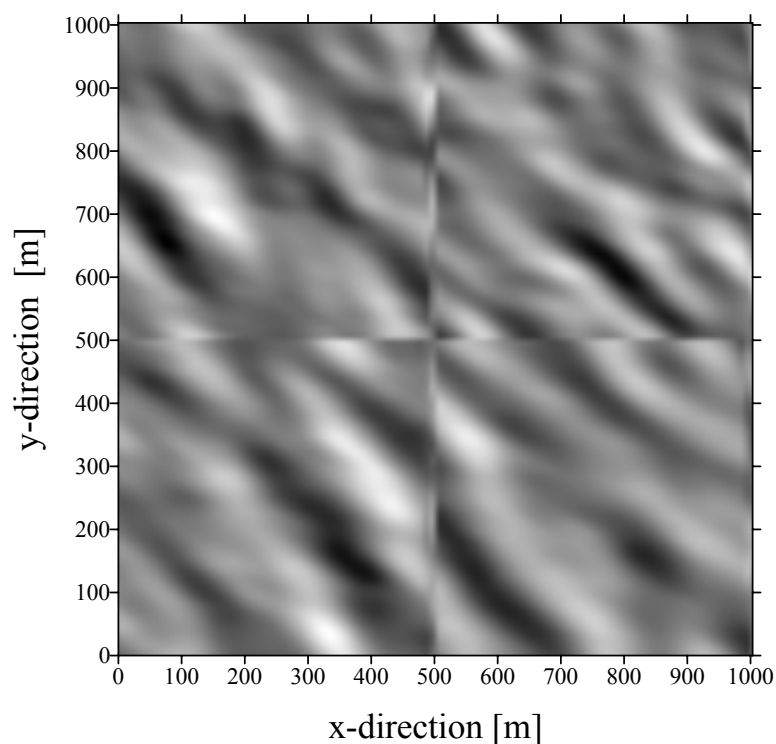


圖 4.13 由第四個『主成份』所構成的海面變化圖($\Delta x = \Delta y = 7.9$ m)。

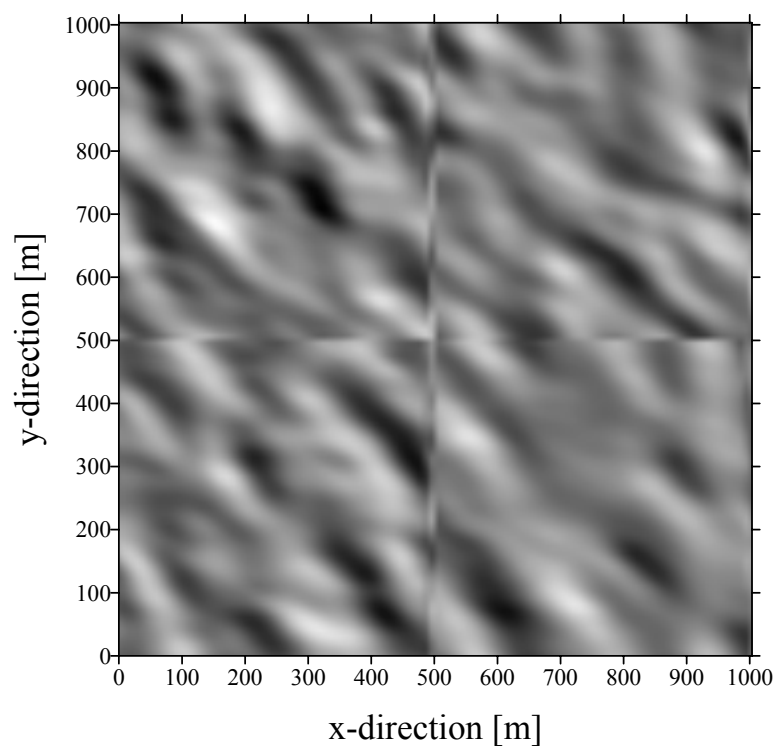


圖 4.14 由第七個『主成份』所構成的海面變化圖($\Delta x = \Delta y = 7.9$ m)。

表 4.3 各個主成份序秩、所含變異量、以及佔全部變異量百分比

主成份序 秩	所含變異量 (Variance explained)	佔全部變異量 百分比 (%)
1	401.55	6.78
2	321.54	4.43
3	274.91	4.66
4	253.15	4.28
5	234.72	3.96
6	214.26	3.64
7	200.39	3.39
8	189.59	3.20
9	176.08	2.97
10	167.13	2.82
11	154.81	2.62
12	144.89	2.45

除了由平面，如圖 4.12~4.14，『觀察』某個主成份所引起的整個海面變化外，也可以藉著觀察它們在時間上的變化來判斷它們是否是屬於『波動』。圖 4.15~4.17 是圖裡三個主成份的相位在時間領域的演變。從這幾張圖裡可以看出來，各個主成份的相位都是以相當規律的方式在 -2π 到 $+2\pi$ 之間變化。因此，可以斷定它們是波動。

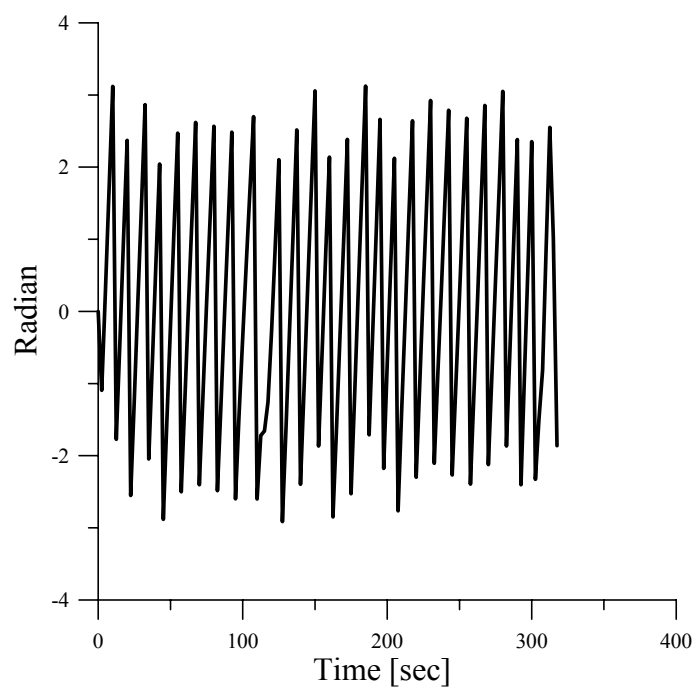


圖 4.15 第一個『主成份』的相位在時間領域的演變

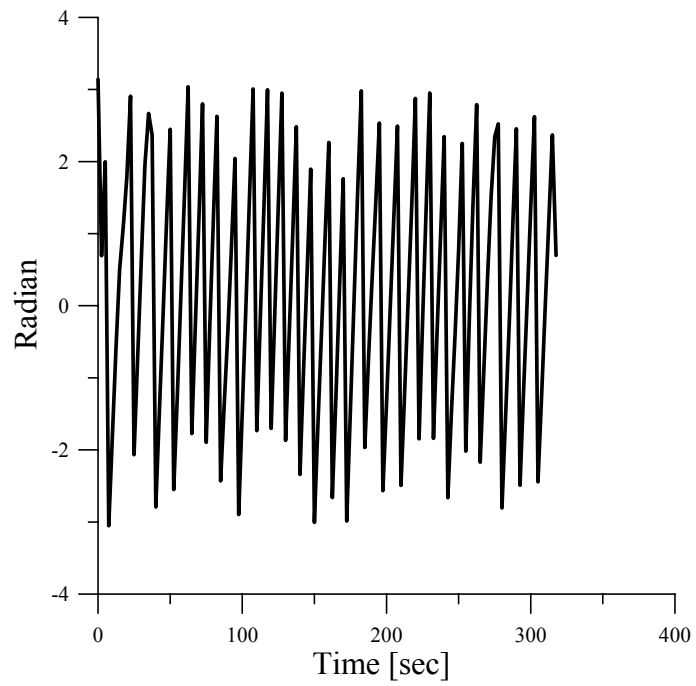


圖 4.16 第四個『主成份』的相位在時間領域的演變

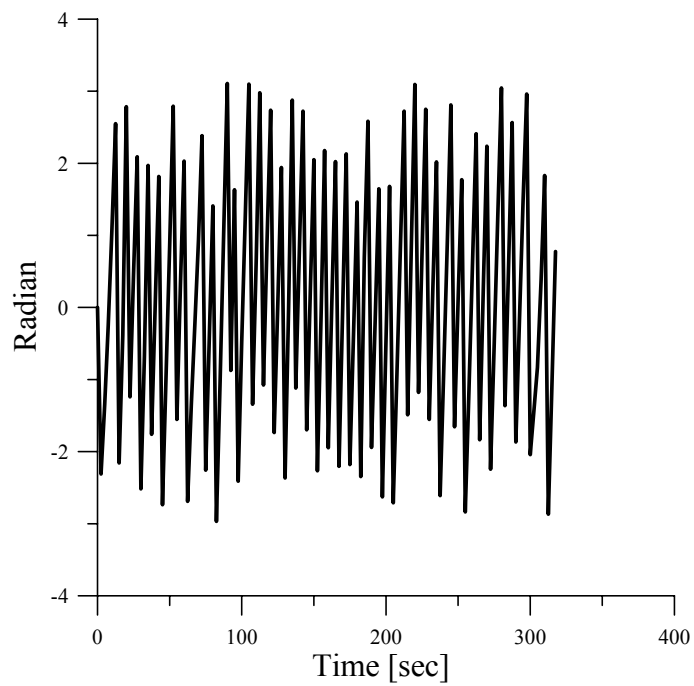


圖 4.17 第七個『主成份』的相位在時間領域的演變

4.4 結論

雖然筆者尚未見到有關利用『主成份分析』來探討海面上波場的相關文獻，不過，從這個方法在許多領域應用的例子來看，筆者相信它應該是可以解析出譬如說『有義波高、周期』等重要參數來的。在本文裡，筆者用了一個理想的例子來探討這個方法的可行性。從所附的結果可以看出來，雖然本方法可以解析出一些『波』來，但是目前仍然有一些問題有待解決：

各個『主成份(波)』所含的變異量都不大。這和大多數學者的結果都不同。這可能是在模擬(理論)方向頻譜時用了太多的(切割)頻率的緣故。一般分析雷達影像時，大多只用 32 張圖片而已(Dankert, 2003)。從頻譜分析理論裡可以知道，除非另外再加工－如補零等－否則就只能得到 16 個成份的頻率。筆者在做模擬的時候，則用了 256 個頻率的成份。這表示在分析時，(模擬的)海面上至少有 256 個不同頻率的波存在著。至於是不是由於這個因素造成各個『主成份』所含的變異量都不大則要再進一步做數值實驗纔能知道。

目前還不能直接計算出各個『主成份(波)』的各種參數－譬如說振幅、波長(周期)、行進方向、以及行進速度等。Ruessink 等人(2000)在使用『主成份分析』探討海邊沙洲(sand bar)的移動情形時，提出一些方法計算這些參數。也許可以拿來參考。

目前也尚不明瞭為什麼各個『主成份(波)』在整個海面的變化會有不連續的現象。這個現象在各個小區塊圖的连接處更是明顯。目前正在用間隔取樣－每隔一點取一數據－的方式嘗試縮小數據的總量。

第五章 儀器及網站維護

5.1 維護網頁展示系統

台北港二號測站之網頁即時顯示雷達遙測波浪圖像系統持續維護及更新，其可提供使用者透過電腦網路即能獲得有關即時海況之訊息，本計畫將繼續維護及改進網頁內容，並確保網頁展示系統正常工作。(圖 5.1 至圖 5.3 所示)



圖 5.1 台北港二號測站即時顯示雷達遙測波浪圖像網頁

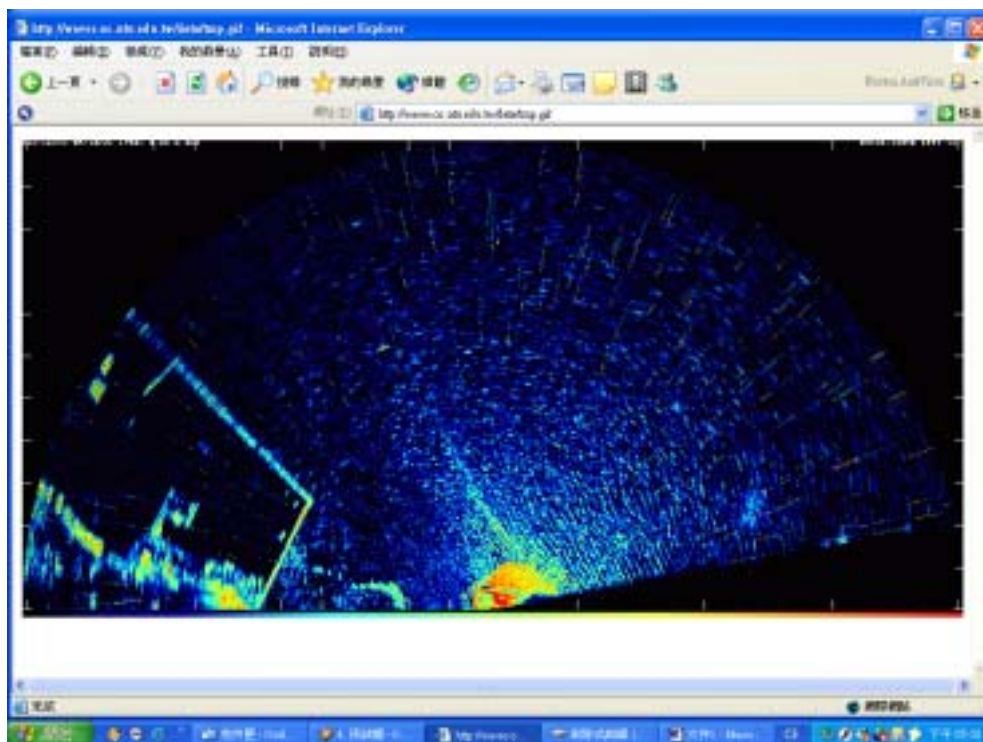


圖 5.2 台北港二號測站即時顯示雷達遙測波浪圖像網頁

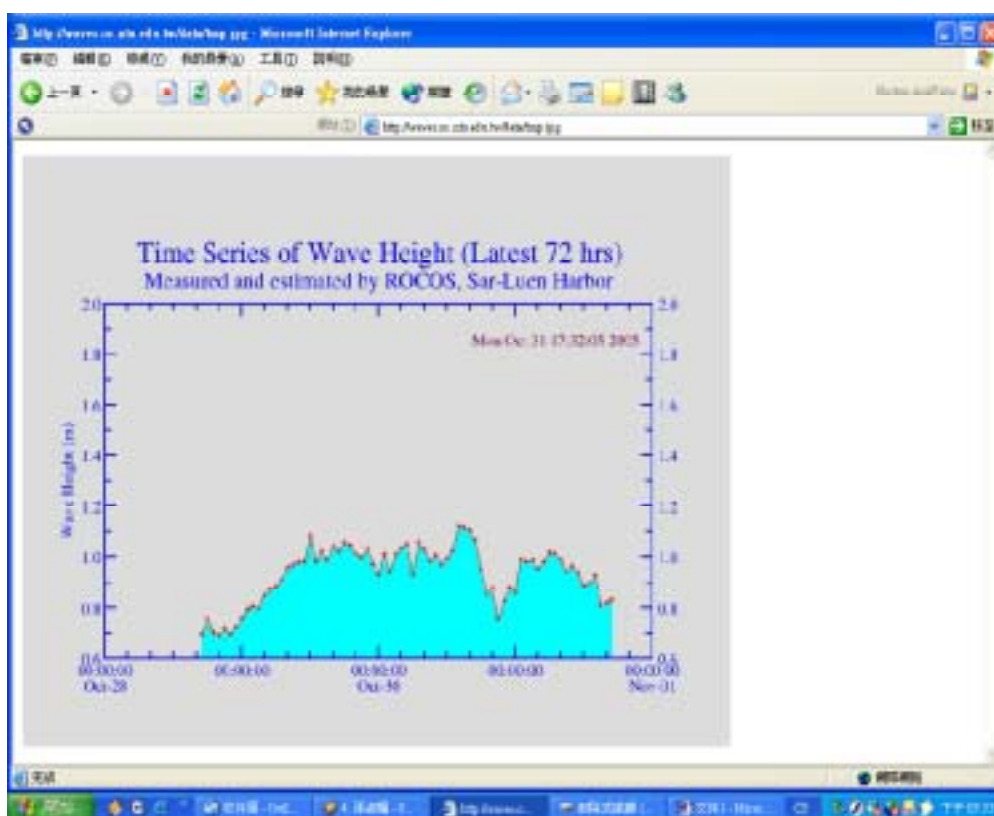


圖 5.3 台北港二號測波站最近 72 小時內逐時波高記錄時序圖

5.2 台北港一號雷達測波站之遷移

原擬將此雷達遷移至港務大樓附近的制高點，但是由於台北港持續擴建，並無適於置放的地點。故將雷達暫時移至國立台灣海洋大學河海工程學系一館頂樓放置，供學術研究之用。詳細拆遷情形如附錄 A 所示。

5.3 雷達測波儀維護保養

維護保養情形如附錄 E 所示，而該雷達已使用了相當的年限，每年皆需要更換許多零件維修。雖然有定期的保養及維護，但其在於遙測精度上將會有所影響。雷達測波儀及截取資料電腦系統之維護保養管理計畫表如下所示。

表 5.1 雷達測波儀及截取資料電腦系統之維護保養管理計畫表

	截取資料電腦系統	雷達測波儀
一般保養及管理	每個月派專人定期接收所截取資料並檢測該系統運作情形，如遇到系統異常或資料存取故障將立即維修。	每年派專人定期維修，更換損壞之零件。
緊急處理的保養及管理	於特殊天候狀況前後(如颱風等)，檢測系統是否運作正常。	於特殊天候狀況前後(如颱風)，若雷達有所損壞將立即維修

第六章 結論

6.1 研究計畫三年之結果與討論

綜合這三年計畫的結果而論，第三年與前二年計畫執行上最大不同點在於：

1.前二年所使用的分析方式所分析出的結果在精度上已經無法提升 採用『波數-頻率譜』的方式，則可以由其最根本的方式改善所會產生錯誤的部分。

雖然直到目前為止並未能將所有雷達影像上雜訊的部分去除。但藉由理論波譜驗證的方式，現在已經建立起一套完整的計算模式，只要能改善上述的問題，相信以雷達遙測的可信度將可大大的提升。

6.2 檢討與改進

本年度研擬用『波數譜』及『波數-頻率譜』(『方向頻譜』)求波場的波高及主方向，並採用『主成份分析』提高分析之精度，故目前已將實際雷達影像代入所建立的分析模式中，分析結果於已於第四、五章有所說明。分析結果顯示，若能進一步將雷達影像中的雜訊、電波衰弱及座標校正的問題解決的話，將更能提高分析的精度，而主成份分析還有許多問題等待克服，雖然目前的成果還尚未能達到所預期的目標，但後續將繼續努力克服此等的問題。

參考文獻

1. Barber, N. F. 1963 "The directional resolving power of an array of wave detectors" Proc. "Ocean Wave Spectra", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J. pp. 137-150
2. Benoit, M., Frigaard, P. and Schäffer, H.A., 1997 "Analysing multidirectional wave spectra: A tentative classification of available methods" In: E. P. D. Mansard (ed.), IAHR Seminar Multidirectional waves and their interaction with structures, 27th IAHR Congress, San Francisco, pp. 131-158.
3. Bjornsson, H. & S. A. Venegas 1997 "A manual for EOF and SVD analyses of climate data" McGill University, CCGCR Report No. 97-1, Montréal, Québec, pp. 52
4. Borgman, L. E. 1969 "Directional spectra models for design use" Hydraulic Engineering Laboratory, University California, Technical Report, No. HEL 1-12, pp. 56
5. Borgman, L. E. 1979 "Directional spectra from wave sensors" in "Ocean wave climate" M. D. Earle & A. Malahoff (eds.), Plenum Press, New York, pp. 269-300
6. Briggs, M. J. 1984 "Calculation of directional wave spectra by the Maximum Entropy method of spectral analysis" Proc. 19th Int'l Conf. Coastal Eng. ASCE, pp. 484-500
7. Brissette, F. P. 1992 "Estimation of wave directional spectra and applications to the study of surface gravity water waves" PhD Thesis, Dept. Civil Engineering, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada, pp. 333
8. Brissette, F. P. & I. K. Tsanis 1994 "Estimation of wave directional spectra from pitch-roll buoy data" J. Waterway, Port, Coastal & Ocean Eng. ASCE, Vol. 120, pp. 93-115

9. 陳上及、馬繼瑞 1991 "海洋數據處理分析方法及其應用" 海洋出版社 北京 660 頁
10. Cox, C. & W. Munk 1954 "Statistics of the sea surface derived from sun glitter" J. Marine Res., Vol. 13, pp. 198-227
11. Davis, R. E. & L. Regier 1977 "Methods of estimating directional wave spectra from multi-element arrays" J. Mar. Res., Vol. 35, pp. 453-477
12. Dankert, H. 2003 "Measurement of waves, wave groups and wind fields using nautical radar-image sequences" Dissertation, University Hamburg, Germany, pp. 103
13. Dieter, J. 1998 "Analysis of small ocean wind waves by image sequence analysis of specular reflections" PhD. dissertation, Universität Heidelberg, pp. 120
14. Dudgeon, D. E. & R. M. Mersereau 1984 "Multidimensional digital signal processing" Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 400
15. Emery, W. J. & R. E. Thomson 1998 "Data analysis methods in physical oceanography" Pergamon Press, Kent, pp. 634
16. Goda, Y. 2000 "Random seas and design of maritime structures" 2nd ed., World Scientific, Singapore, pp. 443
17. Hahn, G. J. & S. S. Shapiro 1967 "Statistical models in engineering" John Wiley & Sons, New York, pp. 355
18. Hartmann, D. L. 2005 "Chapter 4: Matrix methods for analysis of structure in data sets", Lecture Notes of "Objective analysis", pp. 51-88,
19. Hashimoto, N., K. Kobune & Y. Kameyama 1988 "Examination of the various directional spectral estimation methods for field wave

- data" Rep. Port & Harbour Res. Inst. Japan, Vol. 27(2), pp. 59-94 (in Japanese)
20. Hashimoto, N., T. Nagai & T. Asai 1994 "Extension of maximum entropy principle methods (MEP) for estimating directional wave spectrum" Proc. 24th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, Vol. 1, pp. 232-246
 21. Hashimoto, N. 1997 "Analysis of the directional wave spectra from field data" in "Advances in Coastal and Ocean Engineering", P. L-F. Liu (ed.), Vol. 3, World Scientific, Singapore, pp. 103-143
 22. 黃偉柏 2002 "離岸堤對波場特性影響之研究" 博士論文，國立臺灣海洋大學，河海工程學系，89 頁
 23. Holland, K. T., R. A. Holman, T. C. Lippmann, J. Stanley & N. Plant 1997 "Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies" IEEE J. Oceanic Eng., Vol. 22 (1), pp. 81-92
 24. Holthuijsen, L. H. 1981 "The directional energy distribution of wind generated waves as inferred from stereophotographic observations of the sea surface" PhD dissertation, Technical University Delft, pp. 193
 25. Horel, J. D. 1984 "Complex principal component analysis: Theory and examples" J. Climate & Appl. Meteorol., Vol. 23, pp. 1660-1673
 26. Hudspeth, R. T. & L. E. Borgman 1979 "Efficient FFT simulation of digital time sequences" J. Engineering Mech. Div. ASCE, Vol. 105, pp. 223-235
 27. Hudspeth, R. T. & M.-C. Chen 1979 "Digital simulation of nonlinear random waves" J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Div. Proc. ASCE, Vol. 105, pp. 67-85
 28. Jackson, F. C., W. T. Walton & P. L. Baker 1985 "Aircraft and satellite measurement of ocean wave directional spectra using

- scanning beam microwave radars" J. Geophys. Res., Vol. C90, pp. 987-1004
29. J?hne, B. 1993 "Spatio-temporal image processing" Lecture Notes on Computer Science, Vol. 751, Springer-Verlag, Berlin, pp. 208
 30. J?hne, B. 1997 "Digital signal processing - Concepts, Algorithms, and Scientific Applications" 4th Ed., Springer-Verlag, Berlin, pp. 555
 31. Jolliffe, I. T. 2002 "Principal component analysis" 2nd ed. Springer-Verlag, New York, pp. 487
 32. Kinsman, B. 1965 "Wind waves, their generation and propagation on the ocean surface" Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 676
 33. Krogstad, H. E. & S. F. Barstow 1999 "Satellite wave measurements for coastal engineering applications" Coastal Eng., Vol.37, pp. 283-307
 34. Longuet-Higgins, M. S., D. E. Cartwright & N. D. Smith 1963 "Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy" in "Ocean Wave Spectra", Prentice-Hall, New Jersey, pp. 111-132
 35. Miles, M. D. & E. R. Funke 1987 "A comparison of method for synthesis of directional seas" Proc. 6th Int. Offshore Mech. & Arctic Engng. Symp. ASME (OMAE) – Vol. II, Offshore Mechanics pp. 247-255
 36. Miles, M. D. & E. R. Funke 1988 "A comparison of methods for synthesis of directional seas" J. Offshore Mech. & Arctic Engng., ASME, Vol. 111, pp. 43-48
 37. Miles, M. D. 1990 "Numerical models for synthesis of directional seas" Technical Report, TR-HY-016, No. NRC No. 31610, Hydr. Lab., National Research Council, Ottawa, Canada, pp. 41

38. Mitsuyasu, H., F. Tasai, T. Suhara, S. Mizuno, M. Ohkusu, T. Honda & K. Rikiishi 1975 "Observations of the directional spectrum of ocean waves using a Cloverleaf buoy" *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 5, pp. 750-760
39. Mobarek, I. E.-S. 1965 "Directional spectra of laboratory wind waves" *J. Waterway & Harbors Div. ASCE*, Vol. 91, pp. 91-116
40. Nwogu, O. 1989a "Analysis of fixed and floating structures in random multi-directional waves" Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, B. C. Canada, pp. 261
41. Nwogu, O. 1989b "Maximum entropy estimation of directional wave spectra from an array of wave probes" *Appl. Ocean Res.*, Vol. 11, pp. 176-182
42. Panicker, N. N. & L. E. Borgman 1970 "Directional spectra from wave gauge arrays" *Proceeding of the 12th International Conference on Coastal Engineering*, Washington, ASCE, New York, Vol. 1, pp. 117-136
43. Paniker, N. N. & L. Borgman 1974 "Enhancement of directional wave spectrum estimates" *Proceeding of the 14th Coastal Engineering Conference*, ASCE, Vol. 1, Chap. 14, pp. 258-279
44. Phillips, O. M. 1988 "Remote sensing of the sea surface" *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 20, pp. 89-109
45. Pierson, Jr. W. J. (ed.) 1960 "The directional spectrum of a wind Observation Project" *Meteor. Papers* vol. 2 Univ. N.Y. pp. 88
46. Preisendorfer, R. W. & C. D. Mobley 1988 "Principal component analysis in meteorology and oceanography", *Developments in Atmospheric Science*, Vol. 17, Elsevier Science Pub. B. V., Amsterdam, pp. 425

47. Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling & B. P. Flannery
1992 "Numerical recipes in Fortran" 2nd Ed. Cambridge Univ. Press,
pp. 963
48. Regier, L. A. & R. E. Davis 1977 "Observations of the power and
directional spectrum of ocean surface waves" J. Marine Res., Vol. 35,
pp. 433-451
49. Ruessink, B. G., I. M. J. van Enckevort, K. S. Kongston & M. A.
Davidson 2000 "Analysis of observed two- and three-dimensional
nearshore bar behaviour" Marine Geology, Vol. 169, pp. 161-183
50. Schowengerdt, R. A. 1997 "Remote sensing. Models and methods for
image processing" 2nd Ed., Academic Press, San Diego, pp. 522
51. Seemann, J., F. Ziemer & C. M. Senet 1997 "A method for
computing calibrated ocean wave spectra from measurements with a
nautical X-band radar" Proceedings MTS/IEEE Conference
OCEANS '97, Vol. 2, pp. 1148-1154
52. Senet, C. M., J. Seemann & F. Ziemer 2000 "Hydrographic
parameter maps deduced from CCD image sequences of the water
surface supplemented by in-situ wave gauges" Proceedings
International IEEE 2000 Geoscience and Remote Sensing
Symposium, 2000.. IGARSS 2000, 24-28 July 2000, Vol. 2, pp. 843-
846
53. Simpson, J. H. 1969 "Observations of the directional characteristics
of sea waves" Geophys. J. R. Astr. Soc., Vol. 17, pp. 93-120
54. Stansberg, C. T. 1998 "On the Fourier series decomposition of
directional wave spectra" Proc. 8th Int'l Offshore & Polar Eng. Conf.,
Montreal, Canada, Vol. III, pp. 227-234
55. Stilwell, D. & R. O. Pilon 1974 "Directional spectra of surface waves
from photographs" J. Geophysical Res., Vol. 79, pp. 1277-1285

56. Stockdon, H. F. & R. A. Holman 2000 "Estimation of wave phase speed and nearshore bathymetry from video imagery" J. Geophys. Res., Vol. 105 (C9), pp. 22015-22033
57. Sugimori, Y. 1975 "A study of the application of the holographic method to the determination of the directional spectrum of ocean waves" Deep-Sea Res., Vol. 22, pp. 339-350
58. Sverdrup, H. U. & W. H. Munk 1947 "Wind, sea and swell: theory of relations for forecasting" H. O. Pub. 601, U. S. Navy Hydrographic Office, Washington, D.C., pp. 44
59. Tucker, M. J. & E. G. Pitt 2001 "Waves in ocean engineering" Elsevier, Amsterdam, pp. 521
60. Von Storch, H. & F. Zwiers 1999 "Statistical analysis in climate research" Cambridge University Press, Cambridge, pp. 484
61. Wall, M. E., A. Rechtsteiner & L. M. Rocha 2003 "Singular value decomposition and principal component analysis" in "A practical approach to microarray data analysis" D. P. Berrar, W. Dubityky & M. Granzow (eds.), Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 91-109
62. Young, I. R., W. Rosenthal & F. Ziemer 1985 "A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents" J. Geophys. Res., Vol. C90, pp. 1049-1059
63. Ziemer, F. 1987 "Untersuchung zur quantitativen Bestimmung zweidimensionaler Seegansspektren aus Messungen mit nautischem Radar" Dissertation, University of Hamburg, GKSS Report No. 87/E/10, pp. 152

台北港雷達搬遷作業

儀器搬遷日期：2005/8/9-19

搬遷儀器設備：ROCOS 雷達測波系統

案 號：

搬 遷 設 備：

1. 雷達系統

雷達天線

30M 傳輸電纜

雷達主機

雷達支架

2. 資料擷取分析控制介面

3. 資料儲存電腦系統

電腦主機

螢幕

不斷電系統

參與搬遷人員：

海洋大學 教 授 翁文凱（男）

台灣大學 教 授 王 冑（男）

技 術 員 王 弼（男）

技 術 員 賴振哲（男）

助 理 蘇國政（男）

助 理 孫漢忠（男）

鎮儀公司 總 經 理 莊貴忠（男）

產品工程師 楊明德（男）

產品工程師 杜恆毅（男）

雷達系統搬遷流程

本次雷達搬遷作業共分三階段進行，於 8 月 9 日先於台北港將原架設在鐵塔平台上之雷達天線與主機拆卸，進行清理工作。於 8 月 19 日再將儀器搬到海洋大學進行雷達架設工作。



照片 1 拆卸雷達天線部分



照片 2 將天線自平台下放到地面

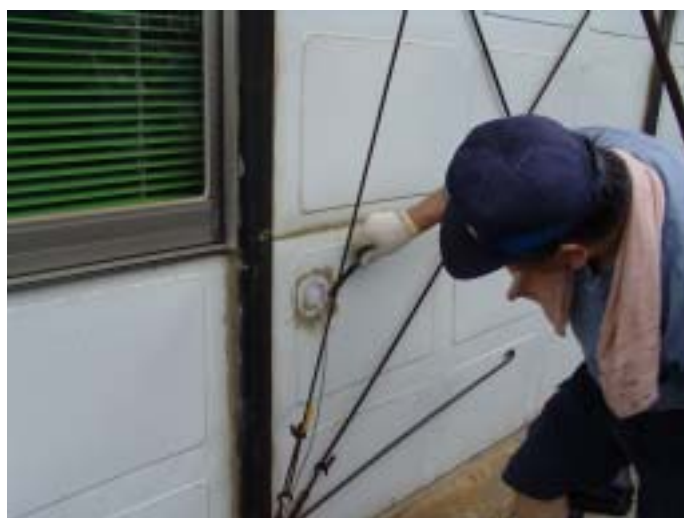
附錄 A 台北港雷達搬遷作業



照片 3 雷達設備



照片 4 雷達天線及電纜



照片 5 封閉原有纜線通道

附錄 A 台北港雷達搬遷作業



照片 6 將儀器帶回整理



照片 7 原有平台已被新建大樓遮蔽



照片 8 原使用之不斷電系統

附錄 A 台北港雷達搬遷作業



照片 9 海洋大學進行雷達支架與天線安裝

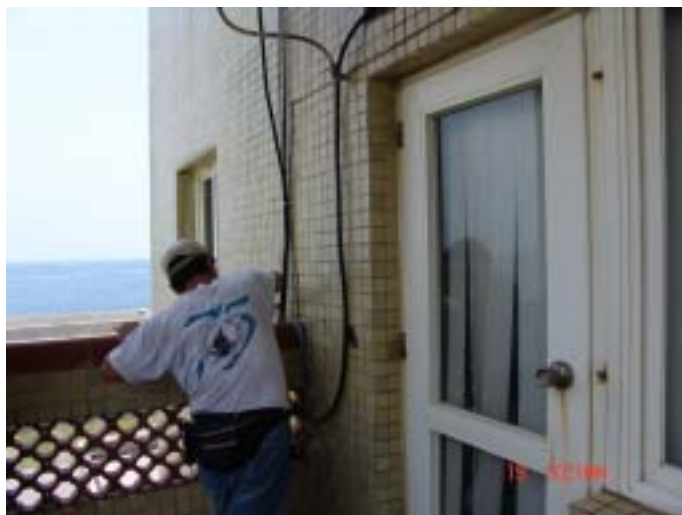


照片 10 進行纜線安裝工作



照片 11 進行雷達與電腦系統安裝

附錄 A 台北港雷達搬遷作業



照片 12 進行纜線雷達固定工作



照片 13 確實固定纜線



照片 14 完成系統安裝

「九十四年台北港雷達波浪監測 — 資料與雷達維修保養及網上資料更新」案 雷達測波儀保養與維修報告 謙儀企業有限公司

壹、台北港雷達波浪監測系統現況

一、前言：

本計畫之雷達波浪監測系統，從裝設使用至今已屆六年。但因台北港港務大樓興建工程完成，原本雷達天線架設地點，面海方向受到建築物阻隔，無法進行波浪監測作業。已於 94 年 8 月 9 日自原台北港工務處所拆除，經詳細檢修、保養各項系統零附件後。於 8 月 19 日再運送至國立台灣海洋大學海洋工程館，重新架設後並繼續執行波浪監測工作。

二、系統各部分元件現況分析：

雷達天線性能

本系統所使用之雷達天線轉速為每分鐘 24 轉，故每次的掃瞄間隔為 2.5 秒，對於週期 5 秒以下的波浪訊號會產生頻移(Aliasing)的情形。此現象會在能譜估算時將短波的能量轉移到長波波段，而造成資料誤判的情形。淡水海域夏季的波浪波長較短，故常會有波浪訊號誤判的情形發生。

現有雷達波浪監測系統已經全面改用轉速為每分鐘 36 轉之天線，每次掃瞄的間格時間為 1.6 秒。對應可解析頻率為 3.2 秒，對於

週期為 4 秒以上的波浪皆有良好的解析度，而 3 秒以下的波浪訊號對於波浪監測並沒有太大的影響。

以雷達的轉速對於波浪的監測而論在 36 到 40 轉之間為合理轉速，轉速太快會造成遠處取樣的區域會有缺失的情形，要改進此一情形則需提升所使用雷達之脈衝波的發射頻率，但如此又會減小雷達監測的距離與範圍。以現有規格而言 36 轉之雷達天線較符合海浪監測作業需求。

電腦系統部分

電腦產品的發展日新月異，根據莫爾定律電腦產品的效能每 18 個月便以倍數成長。所以現今電腦的處理速度、效能與儲存設備的容量跟六年前所使用的電腦設備相比較有長足的進步。

現今所使用的電腦設備的處理效率高，可以同時處理大量的資料，處理的速度更加快速。且大容量的硬碟可以儲存更多的波浪監測資料。配合新型電腦系統的使用可以對於監測區域進行更密集與更連續的波浪監測作業。

且現行電腦作業系統使用的年齡已達六年，各部元件皆容易有故障的情形發生，必需時常進行更換維修。且六年前的電腦零件規格，多與現行電腦使用規格不盡相容。若主要元件部分發生故障恐難找到相容元件進行維修。且電腦老舊也容易造成當機的情形。這方面恐影響波浪監測作業進行，故更換新型的電腦系統為刻不容緩之要務。

天線與電纜部分

天線電纜為天線訊號傳輸的重要元件。而電纜本身為橡膠製品，長期在戶外的環境下使用，有一定的使用年限。而電纜接頭部分經過多次來回拆卸安裝，並經過長久在戶外陽光曝曬下的環境使用也容易產生氧化的情形。而天線轉動部分的重要零件碳刷，因長久的使用已經呈現老舊的狀態。為了波浪監測作業能夠維持長期良好的運作狀態，對於已經長期使用的各部分老舊零件，應考慮進行更換。

貳、系統現況評估與建議事項

(一)、現況評估：

謙儀公司依照合約，固定每月保養和維護雷達監測系統，至正常堪用狀態。對於本波浪監測系統雖然在良好保養與維護下，仍可進行波浪監測作業。但由於現今科技的進步與產品已經經過長期的使用下，若要再繼續使用舊系統進行觀測仍然可行。但必需考量舊有儀器的性能已經不敷使用，且儀器老舊必需進行更多的保養與維護作業，甚至於在部分零件故障時，不易維修的問題。且維護成本增高和部分零組件取得不易。故造成在繼續使用本系統時，所需付出負擔更為沉重，成本也日益增加。

(二)、建議事項：

在雷達天線轉速部分，建議升級使用每分鐘 36 轉的雷達天線，以增加取樣頻率，才能增進波浪監測系統性能。而電腦系統部分也建議更換資料處理的速度更快、儲存的容量更大的新型的電腦，。才能對波浪監測進行更密集與更連續的監測作業。而電纜與碳刷等零件也

附錄 B 雷達測波儀維護保養情形

應該一併換新，以確保觀測作業更順利的進行，以利資料處理與分析工作的進行和研究發展之需要。



照片 15 台北港雷達安裝平台



照片 16 雷達面海方向受到建築物阻隔



照片 17 台北港雷達搬遷作業



照片 18..現行使用之波浪監測主機與電腦系統



照片 19..雷達天線與電纜



照片 20..海洋大學雷達天線安裝情形



照片 21 海洋工程館頂樓之雷達天線

附錄 B 雷達測波儀維護保養情形



照片 22 現行雷達監測系統工作情形

九十四年台北港 雷達遙感波浪監測研究

MOTC-IOT-94-H2EB002

期末報告

計畫主持人：周宗仁

協同主持人：尹 彰

協同主持人：翁文凱

 國立台灣海洋大學

本年度執行項目

第三年度：(94 年度，本年度)

- (一)執行雷達測波及資料分析。
 - (二)維護網頁展示系統。
 - (三)雷達測波儀維護保養。
 - (四)比對雷達測波資料以及其他實測資料。
 - (五)遙測資料方向波譜分析可行性評估。
 - 1.『波數譜』及『波數-頻率譜』求波場的波高及主方向。
 - 2.『主成份分析』法找出波場主要成份波的振幅、波長及方向。
 - (六)台北港一號雷達測波站之遷移。
-

「波數-頻率譜」的基本假設

- 各類的『譜』都是基於海面變化，合乎所謂的『均質』 (homogeneous) 的假設才能利用傅利葉轉換求出。
 - 不論在那一點量測，『單位面積』內所包含的能量應該都是一樣的。也就是由於這個緣故，各種不同形式的『譜』之間的關係才能存在。
-

「波數-頻率譜」數學形式

$$S(\bar{\mathbf{k}}, \omega) = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint R(\bar{\mathbf{r}}, \tau) \exp[-(\bar{\mathbf{k}} \cdot \bar{\mathbf{r}} - \omega\tau)] d\bar{\mathbf{r}} d\tau \quad (3-3)$$

或

$$S(k_x, k_y, \omega) = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint R(\Delta x, \Delta y, \tau) \exp[-(k_x \Delta x + k_y \Delta y - \omega\tau)] dk_x dk_y d\tau \quad (3-4)$$

交譜關係法

因為在進行傅立葉轉換時會形成 180° ambiguity，故本文採用此法解決

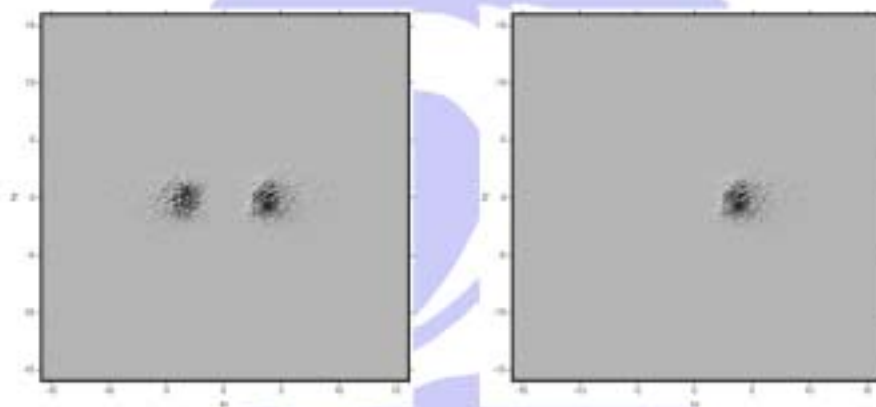


圖3-33 去除180度模糊前後

模式驗證

驗證分為三個階段進行：

- 一、模擬 Stokes 三階的規則波，檢驗二維傅利葉快速轉換法(2D FFT)的正確性。
- 二、模擬三種目標頻譜的單方向平面不規則波，檢驗三維傅利葉快速轉換法(3D FFT)的正確性。
- 三、模擬 JONSWAP 為目標頻譜的多方向平面不規則波，再次檢驗三維傅利葉快速轉換法(3D FFT)的正確性。

第一階段驗證

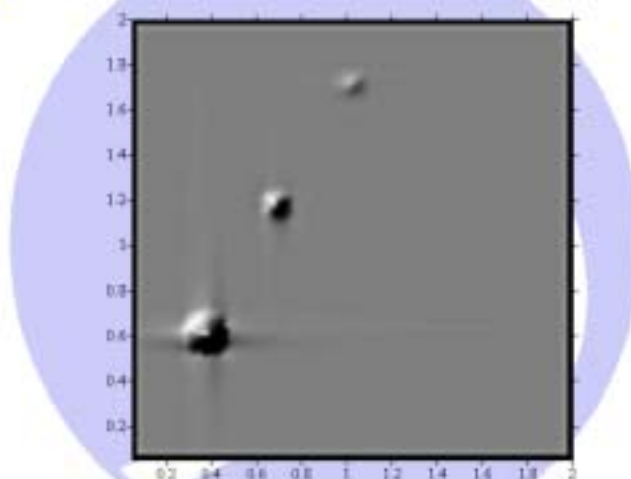


圖 3-9 Stokes 三階有限振幅波二維波數譜起伏圖(relief)

第二階段驗證

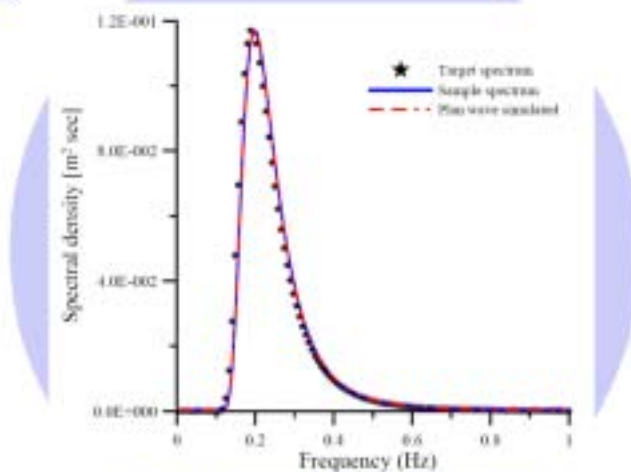


圖 3-24 以 Bretschneider-Mitsuyasu 為目標頻譜模擬，三種頻譜比對圖

第三階段驗證

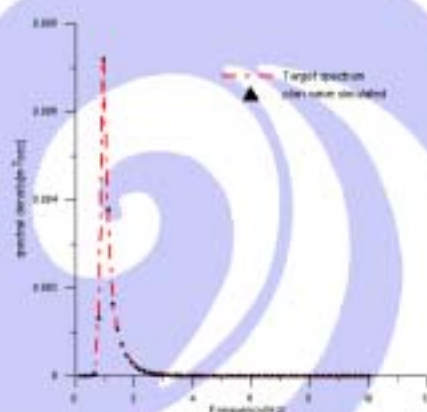


圖 4 以 JONSWAP 為目標頻譜及 Mitsuyasuz 等的方向散佈函數，模擬多方向不規則波二種頻譜比對圖

灰階化及低通濾波

➤ 灰階化

由於取得的雷達影像所包含的雜訊可能影響判讀得結果，必須藉由灰階化及低通濾波等方式，來改善影像的視覺效果。

➤ 低通濾波

將每一像素及其鄰近八點同時乘上一權重(Weight) (本文採用 1/9)，所得之和即為該像素的新灰階值，亦即

$$\begin{aligned} f'(x,y) = & k_{11}f(x-1,y-1) + k_{12}f(x,y-1) + k_{13}f(x+1,y-1) \\ & + k_{21}f(x-1,y) + k_{22}f(x,y) + k_{23}f(x+1,y) \\ & + k_{31}f(x-1,y+1) + k_{32}f(x,y+1) + k_{33}f(x+1,y+1) \end{aligned} \quad (4-5)$$

有義波高迴歸公式的求得

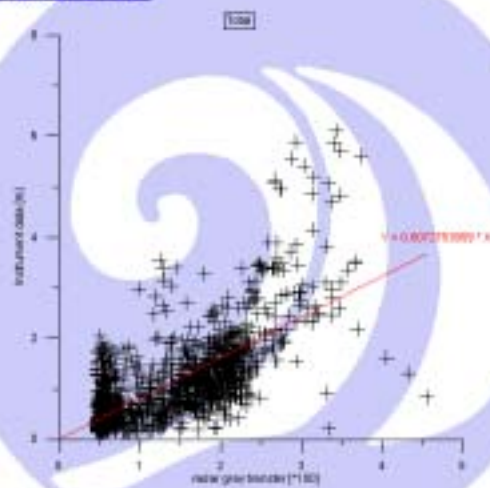


圖 4-7 總迴歸曲線圖

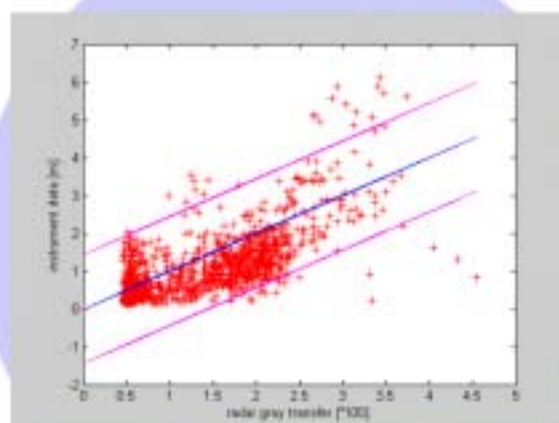


圖 4-10 取二倍標準差截取圖

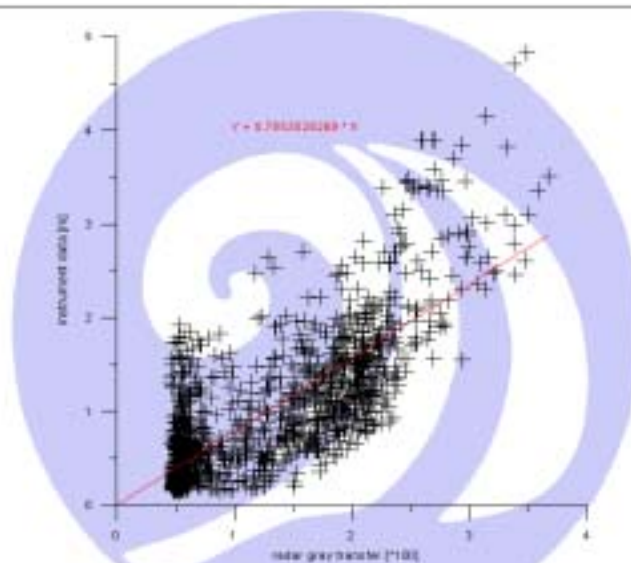


圖 4-11 截取後迴歸曲線圖(二倍標準偏差，資料剩餘 96.93%)

主波向的比對



Radar image (2003/11)玫瑰圖

S4ADW (2003/11)玫瑰圖



Radar image (2004/1)玫瑰圖



S4ADW (2004/1)玫瑰圖



Radar image (2004/6)玫瑰圖



S4ADW (2004/6)玫瑰圖

結果分析

表 4-4 雷達及觀測樁主波向及有義波高季平均比較表(2003/11~2004/9)

項目	冬季		春季		夏季		秋季	
	主波向 (°)	有義 波高 (m)	主波向 (°)	有義 波高 (m)	主波向 (°)	有義 波高 (m)	主波向 (°)	有義 波高 (m)
ROCOS	N	1.19	N	0.91	NNE	0.66	N	0.86
S4ADW	N	1.05	N	0.88	NNE	0.47	NNE	0.90

表 4-5 雷達主波向及有義波高季平均表(2004/11~2005/7)

項目	冬季		春季		夏季	
	主波向 (°)	有義波高 (m)	主波向 (°)	有義波高 (m)	主波向 (°)	有義波高 (m)
ROCOS	N	1.12	NNE	0.93	N	0.74

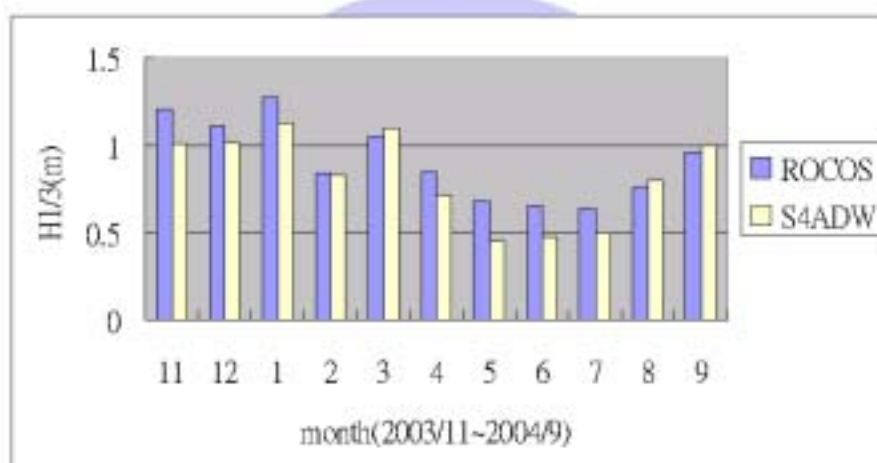


圖 4-12 各月雷觀影像轉換得的有義波高平均值與觀測樁有義波高平均值
群組直條圖

主成份分析

➤ 定義

把一些具有複雜關係的因子(樣本或變量)歸結為少數幾個主要綜合因子，使分析方法大為簡化，而又使所丟失的信息達到最小限度

➤ 目的

- (1) 減少變量的個數(variable reduction)；
- (2) 找出各個變量之間的關係(structure detection, variables classification)。

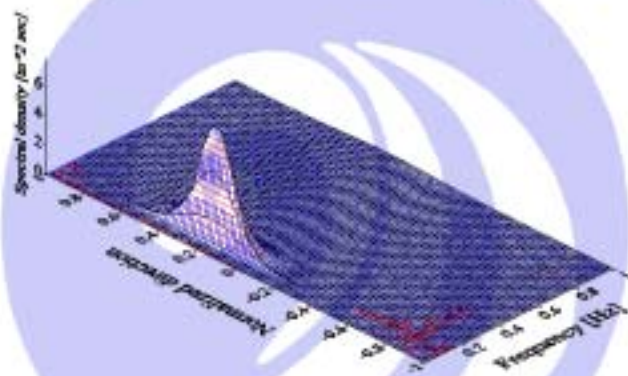


圖 11 目標頻譜的立體圖(JONSWAP, $f_p = 0.1$ Hz, $S_{\max} = 30$, $H_s = 2.50$ m)

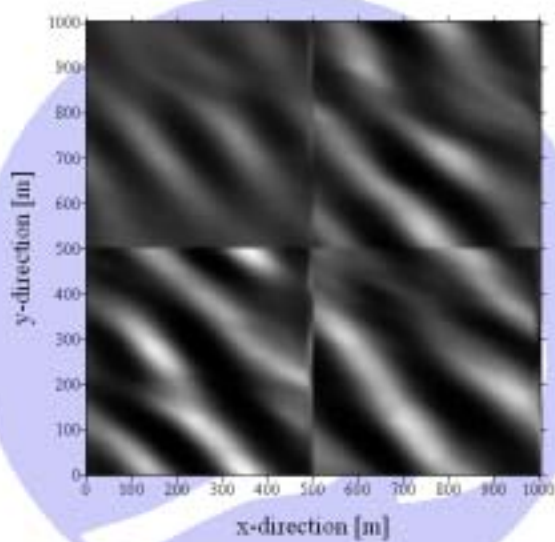


圖 12 由第一個『主成份』所構成的海面變化圖($\Delta x = \Delta y = 7.9$ m)

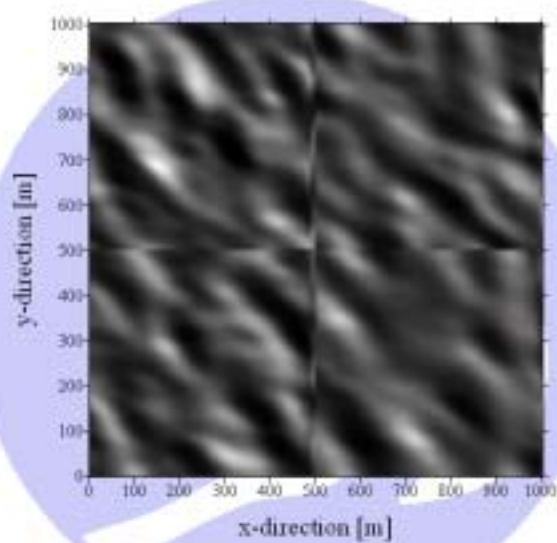


圖 14 由第七個『主成份』所構成的海面變化圖($\Delta x = \Delta y = 7.9 \text{ m}$)

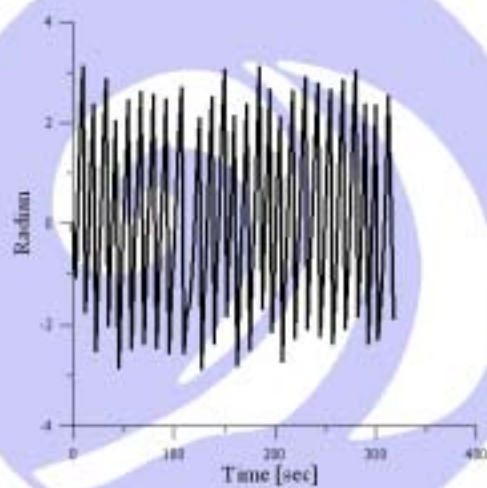


圖 15 第一個『主成份』的相位在時間領域的演變

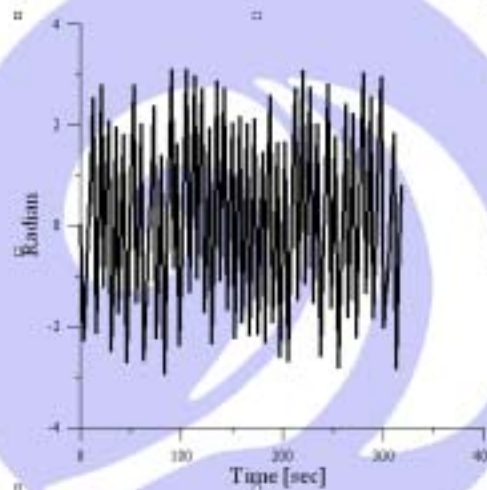


圖 17 第七個『主成份』的相位在時間領域的演變

結果分析

- 各個『主成份(波)』所含的變異量都不大。這和大多數學者的結果都不同。
- 目前尚未對各個『主成份(波)』的各種參數進行計算－譬如說振幅、波長(周期)、行進方向、以及行進速度等。
- 目前因計算容量的不足而分成各個小區塊進行處理，但因此各個『主成份(波)』在整個海面的變化會有不連續的現象。
故以上這些問題都有待進一步地進行及解決。

(1)維護網頁展示系統



圖 6-1 台北港二號測站即時顯示雷達遙測波浪圖像網頁

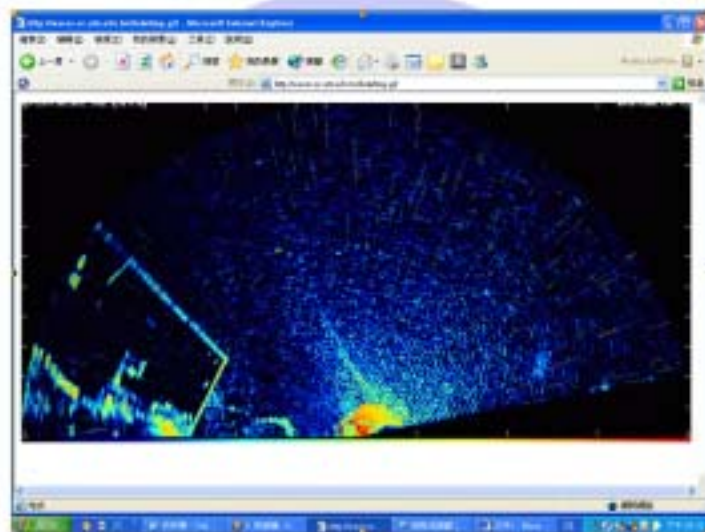


圖 6-2 台北港二號測站即時顯示雷達遙測波浪圖像網頁

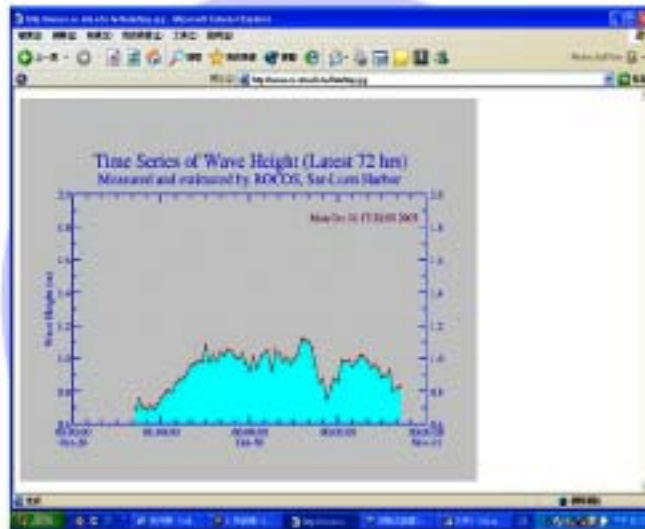


圖 6-3 台北港二號測波站最近 72 小時內逐時波高記錄時序圖

(2)台北港一號雷達測波站之遷移



圖二、未來雷達重置地點



圖一、拆卸雷達天線部分



圖七、將儀器帶回整理



圖十五、完成系統安裝

(3) 雷達測波儀維護保養

雷達測波儀的維修與保養，已經在搬遷之後立即執行，詳細維修報告及結果，於附錄 E 中有所陳述。

結論

- 本計劃共進行了三年，第一年計劃對雷達影像進行了灰階轉換及校正。
 - 在第二年計劃進行時利用灰階變化的關係判斷出主波向，但在求得有義波高值的精度上卻面臨瓶頸。
 - 今年採用了『波數-頻率譜』的方式，使得誤差可以由最根本的部分改善。
 - 雖然直到目前為止並未能將所有雷達影像上雜訊的部分去除。但藉由理論波譜驗證的方式，已經建立起一套完整的計算模式，只要能改善上述的問題，雷達遙測的精度將會更加提升。
-



報告完畢
敬請指教

附錄 D：期中報告審查意見

交通部運輸研究所合作研究計畫
■期中□期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：94 年台北港雷達遙感波浪監測研究

執行單位：國立台灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
楊義忠副總工程司		
1. 遙測範圍最好涵蓋深水、淺水範圍。	1.雷達遙測是屬於間接測量，無法直接得到直接的物理量，必須靠轉換函數轉換，而轉換函數裡的參數是有地域性，必須時加以修正。而目前之測站設置在台北港，水深約在 20 公尺內，故只能針對中間水深至淺水範圍內的波浪做研究。	符合
2. 由報告得知基礎理論分析結果與觀測樁測值比較相符，建議按季節變化用波數譜、波數-頻率譜求台北港外海波場的波高及主方向，做為規劃設計港灣構造物外力來源的依據。	2.期末報告時，將針對所測得之雷達及觀測樁資料做比對整理，並依季節做分析。	符合

二、余進利組長 1. 建議期末報告的撰寫是否按照原先預定的工作項目來敘述。 2. 結論部份只針對波數譜及“波數-頻率譜”的程式設計及驗證作一交待，並未對整體的工作項目的執行成果說明，似乎有所不妥，建議期末報告時改善。 3. 本計畫應是長期的研究計畫，期末報告時也應提出建議未來要執行的工作項目。 4.	1.將於期末報告針對各項工作及成果作逐一系列出及說明。 2.遵照辦理。 3.遵照辦理。	符合
三、莊甲子教授 1. p8 第 3.1 節波譜理論宜改為前言，介紹之名詞。 2. 「波數-頻率譜」的物理意義未完全表示清楚，建議加以補充(3.3 節) 3. 多處圖示之座標名稱及單位未標示，應加補正。 4. 雷達影像取樣位置圖及部份影像圖建議能附加。	1.遵照辦理。 2.遵照辦理。 3.遵照辦理。 4.遵照辦理。	符合

5. 三種頻譜的比對圖(圖 3-30)中 sample spectrum 的差異性原因分析宜加說明。	5.目前時序列的取樣數不足的緣故,但仍不排除其他原因。	
6. 二維波數譜圖(圖 3-31)的意義應加說明。	6.此圖為二維波數譜,縱座標為 k_x, 橫座標為 k_y, 而 $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$, 藉由分散關係式可將波數(k)換得頻率(f), 而 $\theta = \tan^{-1}(k_y / k_x)$, 所以可以換得方向頻率譜,最後可由方向頻率譜得到我們所要的參數($T_{1/3}$、$H_{1/3}$、主方向等)。	
7. 本年度五項主要工作中有關網站維護及雷達站遷移之進度等工作未見說明。	7.雷達站的維護皆按時進行, 每天利用網路監控, 若發生異常現象, 皆立即派員到場處理, 以維持觀測不中斷。一號雷達站於近日將暫時移至基隆海洋大學, 即本研究團隊的所在地進行新系統研究測試, 待年底新的海巡署大樓建造完成, 再遷回台北港, 再此段時間內仍由二號站繼續監測。	

四、涂盛文教授 1. 本年度擬用「波數譜」及「波數頻率譜」求波場之波高及主方向為一可行，值得進行之研究方向，目前工作已完成部份程式設計及驗證，成果良好，惟實務上，雷達回波之強度受距離之影響造成影像上之非均質，如何克服此一困難，仍有待工作團隊下一番功夫。	1.感謝肯定，本研究團隊會繼續努力克服此問題。	符合
五、鍾永明技正 1. 波浪的觀測由過去單點觀測進展到以雷達遙感的面觀測，這個計畫值得去推動，惟用雷達遙感觀測尚屬起步階段，對於觀測資料的準確性要詳加的驗證，這些驗證的過程與結果應在報告中多所著墨。 2. 氣候因素影響雷達觀測的準確性很大，其所需要之惡劣天候的資料，在目前階段尚難以有效的顯示出來，此部份後續應再加努力克服。	1.由於雷達遙測是屬於間接測量，無法直接得到直接的物理量，必須靠轉換函數轉換。初期應該是有較大的誤差，但累積一段長時間及不斷地修正轉換函數後，應該能夠趨近正確值。 2.目前從事雷達研究的世界各國研究團隊也面臨這個問題，本研究團隊也正在研究中。	符合

3. 本計畫成本效益來看，值得繼續去推動，惟目前資料的準確性問題尚需逐一去改進，因此建議出來，以為後續執行之參考。	3.遵照辦理	
六、何良勝科長 1. 本年度工作為本計畫之最後一年(三年)，請於期末報告時，作一總結報告。 2. 於期末報告中應增列理論與實測資料之比對驗證(包括波高、週期)	1.遵照辦理 2.遵照辦理	
七、簡仲璟科長 1. 有關以往學者利用『波數 - 頻率譜』求算波高、波向之研究成果如何？本計畫針對雷達波之分析有何創新或特色？或者需要那些前置工作，請再補充說明。 2. 建議補充雷達測波儀之維修紀錄說明。 3. 報告中部分文意不清及錯置，請查對後修正。例如： (1)pp.2「...皆可能影響等可能影響波浪資料...」，重複字。	1.這個理論並無特別創新之處，不過雷達遙測是屬於間接測量，無法直接得到直接的物理量，必須靠轉換函數轉換，而轉換函數裡的參數是有地域性，必須時加以修正。 2.遵照辦理 3. (1)感謝指正	符合

(2)pp.2 「...價格較為便宜，維修容易亦較為便宜...」，重複字。	(2)感謝指正	
(3)pp.9 「...風多半有一個主要的流向.....」，風向。	(3)感謝指正	
(4)pp.19「...每個節點的值....」，何謂節點？	(4)意指小方格	
(5)pp.20 第 3-15 式之其中說明有誤。	(5)感謝指正，其最後兩式應為 $\Delta k_x = \frac{2\pi}{M\Delta x}$， $\Delta k_y = \frac{2\pi}{N\Delta y}$	
(6)pp.20「...平面的長寬各為 60 公分...」，與圖 3-4 不符。	(6)感謝指正，文中敘述有誤，應為長寬各 50 公分	
(7)pp.21 圖 3-4 中之 2 及 -0.5 是何意？	(7)水面高程的意思	
(8)pp.37 由圖 3-24~圖 3-26 如何證明空間分割大小及波向對程式沒有影響？此外時間的分割大小會不會有影響？	(8)其結果與圖 3-18~3-20 之結果一樣，都與目標波譜 100%吻合，可證明距離的大小與結果無關，而本研究也試過各種不同的方向入射，其結果是一樣的。另外在時間的分割，由於雷達的取樣間隔為 2.5 秒，比一般儀器的取樣間格都還要更長，所以必須進一步確認，結果將會在期末報告呈現。	

(9)pp.40「圖 3-28 為類影像畫面」,此畫面如何得來?又為何稱”類”。 (10)如何由雷達影像經過傅利葉轉換得到波數-頻率譜,應再詳細說明。例如雷達波中之雜訊處理。	(9)此圖是利用繪圖軟體所繪出的,由 2D 顯示 3D 的功能,將垂直軸(z)利用灰階的深淺表示。因為並非實際灰階影像,故稱之。 (10)利用 2D FFT 轉換可得二維波數譜,若將這些時序列的二為波數譜再次用 1D FFT 轉換就可的三維的波數-頻率譜,一般也可以直接做 3D FFT 轉換直接求得。至於雷達影像的問題,目前仍研究中,將於期末報告中詳述	
八、邱永芳主任： 1. 作業化方式與系統設定建置為本計畫重。 2. 雷達之維護或更新應有檢討說明。 3. 文章架構應依本所規定來撰寫。	1.遵照辦理 2.遵照辦理 3.遵照辦理	符合

附錄 E

交通部運輸研究所合作研究計畫 □期中■期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：94 年台北港雷達遙感波浪監測研究

執行單位：國立台灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
一、涂盛文教授： 1. 波數頻率譜經使用理論波譜測試後有良好的成果，說明該處理模式之可行性，但處理雷達訊號時，因雜訊或天氣之影響，在計算主波向時尚可，但計算波高時，成果較差，仍有改善空間。 2. 根據交通部運輸研究所編撰之「港灣工程專門名詞」均使用示性波高，示性週期而非有義波高、有義週期，請改正。 2. P69 圖 5-3 中各個小塊間之波有不連續之情形，不可能是真實的現象，而是人為處理之結果，有待日後研究改善	(1) 利用雷達影像估算波高、波向時，主要是靠著灰階(gray scale)的變化。除了本身的靜電雜訊 (static) 外，從水面反射回來的雷達電磁波還會受到天候－雲、雨，以及海面狀況－碎波－等的影響。這些因素都會改變灰階的值，進而影響對波高、波向的估計。 (2) 利用低通數值濾波器 (low-pass digital filter) 應可消除影像中靜電雜訊的部份干擾，提高估算的結果。目前正參考文獻，設計濾波器。 2. 已於內文中改正。 3.(1) 因為受到軟體－MicroSoft Power Station－本身的限制－每個變數不能超過 214,783,647 bytes－	符合

改善。 4.P79 所列示之三個疑問的確是有待進一步研究，希望工作團隊將來有機會解決此一問題。	因此在做『主成份分析』的時候，必需將一張圖分割成若干張小圖。計算完了之後再將這些結果組合成一整張圖。這可能就造成了波在各個小圖之間會有不連續之情形。 (2)目前正在用間隔取樣－每隔一點取一數據－的方式嚐試縮小數據的總量。這樣雖然會損失一些資訊，不過波在各個小圖之間不連續的情形應該會再出現。 4. 目前已在『期末報告』第五章節的結論中提出若干構想。	
二、余進利委員： 1. 由於採用臺北觀測樁潮波儀波浪資料進行雷達波率定，因此建議報告中將臺北觀測樁之位置座標，定位圖列出。 2.表 4-4 顯示夏季時期示性波高誤差較大，然雷達受天候影響亦是一大因素，建議列出極端天候條件如颱風、東北季風鋒面時期局部最大波高之轉換結果，以供參考。	1.將於報告中第 57 頁補足 2.(1)據筆者所知，目前世界各國學者有關藉由雷達影像估算波高的誤差都在 10%左右。前面曾提到過，從水面反射回來的雷達電磁波會受到天候－雲、雨，以及海面狀況－碎波－等的影響。 (2)為了明瞭這些因素對(波	符合

	高、波向)估算值的影響，本系有意向『中央氣象局』購買量測地區(附近)的逐時氣象資料。未來整理出來後就可以與雷達影像的估算值做一比對。	
三、莊甲子委員 1.目錄中第六章其它工作項目稱宜直接列出。 2.有義波高與波譜能量間關係係數 ($H_s = 4\sqrt{m_0}$) 有加以驗證檢核之必要。 3.第 50 頁有關一次線性變化及二次線性變化之不同意義，第 52 頁之低通濾波處理等建議能加詳細補充。 4.第 53 至 55 頁部份圖號編排錯誤請能更正。 5.第 79 頁提到的瓶頸在日後的後續研究中如何加以克服建議能加補充。 6.第 6 章的項目名稱建議更改，內容建議亦能加以補充。 7.第 7 章總結中結論建議以條列式列出，檢討、改進與建議則應置於結論後。	1.將於目錄及第六章中加以改正 2.因觀測樁所使用的轉換參數是以 $H_s = 4\sqrt{m_0}$，所以此關係係數在以相同條件下比較的情形上視為合理。 3.由於在前二年的報告中已經有加以闡述，故於本文中並未詳述。 4.已於 53 至 55 頁改正 5.已於第五章結論中補充 (p.84) 6.遵照辦理，將於 83 頁改正 7.已經於 86 頁中改正	符合

四、蕭俊賢委員： P59 頁結果分析中，對於夏季的有義波高值雷達遙測與觀測樁資料差異，在文中有解釋原因，至於冬季的差異性原因，能否加以解釋。	因夏季的有義波高值結果已超過一般以雷達測波所公認的誤差 10%以上，而冬季之差異在於 10%左右，故於冬季時的差異性才無探討其原因。	符合
五、何良勝委員： 1.研究結果符合預期工作成果。 2.請修正摘要及結論內容。 3.建議加強說明模式與實測值之驗證結果，並以一實例計算作為驗證說明。	1.感謝委員的認可 2.遵照辦理 3. 一但有了『中央氣象局』的氣象資料之後，本系未來若再執行本計劃將選擇晴天、陰天、雨天、颱風、東北季風鋒面時期等一般以及(較)特殊天候之模式與實測值之比對說明驗證結果與天候之關連。	符合
六、簡仲璟委員： 1.94 年度為本計畫執行最後一年，因此雷達測波站之運轉及維護如何繼續進行？本報告書是年度報告或是計畫總結報告？應有說明。 2.如何由雷達影像像素變化求其有義波高值，應有	1.(1)如果明年度本研究團隊有接續相同的計畫項目，將會繼續進行雷達測波站之運轉及維護。 (2)年度報告 2.將於第 48 頁中補足	符合

較詳細說明(例如處理流程圖),而非第 53 頁之簡略說明,請補充。 3.主成份分析中所謂第一個、第二個、、、「主成份」的涵義及差異可否再詳細說明?如第 79 頁所述主成份分析目前遭遇之瓶頸,未來如何克服?本法後續應用的可行性如何? 4.網頁主機目前放置何處(台大?海大?)?是否有專人維護?即時資料的傳輸方式為何?是否能與本中心之港灣環境資訊網進行整合? 5.附錄 A 之資料請檢核。如雷達測波之波向"WBW"顯然誤植,請修正。"Inf"是代表缺資料?第 147 頁時間 2004-8-20-17 之雷達波高 4.33m 可能有問題。又第 148 頁時間	3.(1)有關『主成份分析』中所謂第一個、第二『主成份』的涵義及差異已在有關『主成份分析』、『一些有關數學的部份』章節中最後一段說明(p.65)。 (2)有關『主成份分析』目前遭遇之瓶頸目前已在『期末報告』有關『主成份分析』章節的結論中提出若干解決構想。(p.84) (3)『主成份分析』在許多應用科學－氣象學、遙測、影像處理－中都有良好的結果。目前雖然並沒有有關『主成份分析』應用在波浪(遙測)資料的分析上的之獻,然而其原理應該是可行的。 4.網頁主機目前放置於台大,有專人維護並將即時資料直接放置於網頁上,後續將會與貴中心之資訊網進行整合。 5.(a)將會於附錄 A 中改正 (b) " Inf"所表示的即為資料缺失。 (c)查對結果是因雷達影像受雜訊影響所造成的明顯差異。	
---	---	--

2004-8-24-18 至 2004-8-25-9 之雷達波高 與 S4 實測波高有明顯差 異也請查對。		
七、邱永芳委員： 1.作業化流程應建立。 2.維護管理計畫應訂出。	1.作業流程已於前期計畫 中建立，本研究亦是延續 此作業流程辦理。 2.將於內文第六章中詳 述。(p.85)	符合