

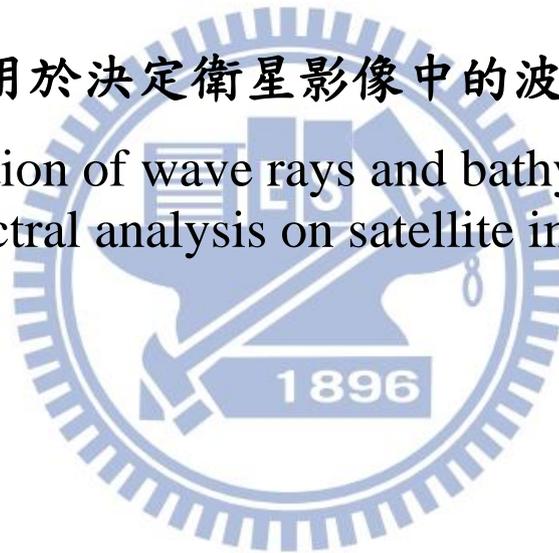
國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

頻譜分析應用於決定衛星影像中的波向及水深推估

Determination of wave rays and bathymetry using
spectral analysis on satellite images



指導教授：張憲國博士

研究生：陳台穎

中華民國一百零二年六月

頻譜分析應用於決定衛星影像中的波向及水深推估

研究生：陳台穎

指導教授：張憲國博士

國立交通大學土木工程學系

摘要

往昔水深資料的獲得方式大多以單波束或多波束測深儀，再經潮位修正至平均水位基準，但因波浪起伏影響測深儀的反射及不同潮水位的修正後處理，量測的水位仍有測量誤差，而且此種方式的測量費用及人力相當高的問題。為解決此問題，本文將快速傅立葉轉換方法判定衛星影像圖中波量的波向及波長，再推估水深。

本文選擇龜山島海域及屏東縣枋寮漁港外側海域作為研究基地。本文首先運用直方圖均化提高影像對比度再採用 Butter Worth 高通濾波濾除雜訊，再由頻譜圖求得波向及波長，並運用波浪理論中的分散關係式估算水深，因衛星影像解析度問題由此初步獲得的水深尚有頗高的誤差。為解決此問題本文考慮波浪由外海平順前進至近岸時會產生折射，由波浪的折射理論，由獲得的波向角，計算出波速後來修正波長，即可獲得修正的水深。

本文利用屏東海岸實測水深資料評估本模式推算水深之精確度，本模式估算於-4m 至-10m 的水深較實測水深高，而-10m 至-12m 間兩者接近，-12m 以下的水深則略低於實測水深。平均而言，每個剖面的估算水深與實測水深的均方根誤差約為 0.49m，若不考慮波紋線較凌亂的部份其均方根誤差則降低至 0.31m。本估算水深方法頗為可行，未來可應用於港灣建設的規劃事前所需的水深資料的參考。

Determination of wave rays and bathymetry using spectral analysis on satellite images

Author : Tai-Ying Chen

Advisor : Dr. Hsien-Kuo Chang

Department of Civil Engineering National Chiao Tung University

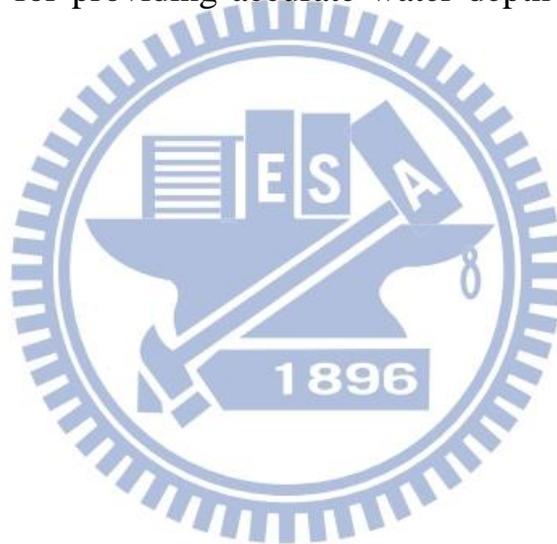
ABSTRACT

Beach bathymetry in the datum of mean water level was commonly obtained using single/multi-beam echo sounder and sequential depth correction due to tidal variation. Some errors on water depth resulting from waves and tides and high measurement cost as well as manpower are disadvantageous. For solving the problem wave rays and wave-lengths are determined from satellite images using the Fast Fourier Transform (FFT) in this thesis. Water depth is first calculated from estimated wave-lengths and then corrected using wave's refraction theory.

Two locations, the Guishan Island and the Fangliao coast in Pingtung, are chosen as for available images and visual wave refraction. Some techniques of image processing are used to obtain wave rays. The techniques include: (1) histogram equalization for increasing image contrast; (2) Butter Worth high-pass filter for filtering out the noise; (3) FFT for determining wave rays and wavelength. Water depth is determined by the dispersion relationship of the small-amplitude wave theory when estimated wave-lengths are given. Fair errors on original depth happen due to error of the estimated wavelengths from pixel resolution of images. The errors of estimated depth are corrected from obtained propagation angle of each wave ray using waves' refraction theory.

Accuracy assessment of the proposed method is examined by comparing

the estimated water depths at the Fangliao coast with those obtained by echo sounder. In general the estimated water depths from -4m to -10m of some profiles by the proposed methods are higher than those by echo sounder. For water depth exceeding -12m, the estimated water depths by the proposed methods are slightly lower than those by the echo sounder. Both results are approximate during the range of water depth from -10m to -12m. The root mean square error between the estimated water depths by the present method and by echo sounder for a beach profile is about 0.49m. Neglecting random wave pattern in some zones, the root mean square error is about 0.31m. The method is examined applicable for providing accurate water depth in marine engineering planning.



誌謝

兩年的碩士生活也接近尾聲了，又準備往新的一個階段邁進，這兩年承蒙恩師 張憲國教授的教導，以刺激思考的訓練方式和舒適的學習環境讓我學習到不少，不管是簡報能力，應答能力都精進許多。論文口試時也特別感謝王順寬教授、張添炮教授、張揚祺博士的指點，讓論文的表達及內容的豐富度能夠更完整。

感謝我的爸媽還有奶奶，儘管高中時期對唸書並沒有興趣，但他們還是一路支持我到大學，也供應我上補習班的經費，讓我能夠順利考上研究所。

感謝碩士班的同學、學弟，時常陪伴我到凌晨，在研究所的期間給了我不少鼓勵，在遇到困難時大家也能互相討論，一起解決問題。



目錄

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目錄.....	V
圖表目錄.....	VII
第一章 緒論.....	1
1-1 研究動機與目的.....	1
1-2 文獻回顧.....	2
1-3 文章架構.....	3
第二章 研究背景.....	5
2-1 研究基地介紹.....	5
2-2 衛星影像圖資料來源.....	5
2-3 快速傅立葉轉換的簡介.....	6
2-3-1 混疊效應.....	7
2-3-2 洩漏效應.....	8
第三章 影像前置處理及決定波向的方法.....	9
3-1 影像前置處理.....	9
3-2 波向推算.....	14
3-3 波向線的繪製.....	19
第四章 波長修正及水深推算.....	22
4-1 波長修正.....	22
4-2 水深估算.....	25
4-3 精確度驗證.....	28
4-4 水深探討.....	29
4-4-1 水深低估.....	29
4-4-2 水深高估.....	30
4-5 水深修正.....	30

第五章 結論與建議.....	37
5-1 結論.....	37
5-2 建議.....	38
參考文獻.....	39



圖表目錄

圖 2-1 研究基地的地理位置圖	5
圖 2-2 組合訊號的時間序列圖	7
圖 2-3 三種不同取樣頻率的能譜圖	8
圖 2-4 洩漏效應的示意圖	8
圖 3-1 直方圖均化的灰階分佈圖	10
圖 3-2 龜山島的部分衛星影像圖	12
圖 3-3 圖 3-2 經高通濾波後的影像	12
圖 3-4 龜山島經 NDWI 及二值化後的灘線位置	13
圖 3-5 人造訊號的影像圖與頻譜等值圖	15
圖 3-6 龜山島的波向線起始區域選定	16
圖 3-7 方框推進示意圖	17
圖 3-8 繪製的波向線示意圖	17
圖 3-9 波向角修正前與修正後的波向線示意圖	18
圖 3-10 龜山島近岸的波向推算方法	18
圖 3-11 近岸波向推算方框加密示意圖	19
圖 3-12 繪製龜山島波向線的示意圖	19
圖 3-13 龜山島海域的部份波向線	20
圖 3-14 枋寮海岸的部份波向線	20
圖 3-15 本文選擇數模推算的波向線(藍色線)的 8 個剖面位置(紅色線)	21
圖 4-1 相對水深與相對波長對應圖	22
圖 4-2 波浪折射示意圖	23
圖 4-3 原始波長與波長修正後的等值圖	24
圖 4-4 計算波長的等值圖	24
圖 4-5 由原始波長及由修正後波長所推算的水深等值圖	27
圖 4-6 實測水深的等值圖	27

圖 4-7 選擇 1 個剖面的位置圖	28
圖 4-8 未修正水深、修正水深及實測水深剖面	29
圖 4-9 波浪傳遞入射角位置示意圖	30
圖 4-9 選擇 9 個剖面的位置圖	31
圖 4-10 各剖面對應之 RMSE 值	31
圖 4-11 實測水深(綠色線)與估算水深(黑色線)的水深比較(剖面 1)	32
圖 4-12 如圖 4-11 的圖說明(剖面 2)	32
圖 4-13 如圖 4-11 的圖說明(剖面 3)	33
圖 4-14 如圖 4-11 的圖說明(剖面 4)	33
圖 4-15 如圖 4-11 的圖說明(剖面 5)	34
圖 4-16 如圖 4-11 的圖說明(剖面 6)	34
圖 4-17 如圖 4-11 的圖說明(剖面 7)	35
圖 4-18 如圖 4-11 的圖說明(剖面 8)	35
圖 4-19 如圖 4-11 的圖說明(剖面 9)	36
表 2-1 FORMOSAT-2 衛星資料的基本特性	6
表 2-2 挑選的衛星影像圖	6
表 4-1 影像解析度對推算水深造成的誤差	26

第一章 緒論

1-1 研究動機與目的

海岸向來是濱海國家人文發展、經濟活動及生態聚集之地，為一非常敏感且脆弱的地帶，任何海洋特性的變化皆可能對海岸造成影響，進而破壞人文社會之發展。台灣海岸在長期自然營力(如海浪、海流及風等)及人為破壞(如濫採砂石及超抽地下水等)之作用下，各處海岸侵淤問題日益嚴重，雖有些區域尚屬於穩定，但部分海岸已受到嚴重侵蝕，如台南黃金海岸，於 2003 年至 2008，僅僅五年海岸線已消失逾 30 公尺；而再往南的二仁溪北岸灣裡岸一帶，在 1993 年至 2004 年之間，海岸線後退達 100 公尺，且侵蝕狀況持續惡化中。為了沿海居民安全及經濟發展著想，如何解決海岸侵淤問題為一重要議題。

對於海岸侵蝕的處理方式，以人工岬灣、突堤、離岸堤或潛堤等使用最多，而海岸保護工法皆能達到減緩海岸侵蝕的作用。因此若能正確、有效的設計利於海岸保護及濱海生態保育之工程規劃則能減少對海岸造成的衝擊與破壞，而海岸工程的事前規劃，需要有海域地形、海象資料、沿岸海流等來進行分析設計，如波向資料可用來獲得折射、繞射現象，水深資料可用來了解海域地形及規劃海岸工程施作的範圍，而海流方向可得知海岸漂沙的資訊等。

國內目前主要是藉由海洋研究站、海洋監測浮標、商用光學衛星及海洋調查船隻來獲得海洋資料，然而，若監測範圍過大則需投入大量的監測浮標或增加調查船隻的航行次數，且海洋環境險惡之處船隻無法到達，在浮標的放置與回收也需要考量到人員的安全，不僅耗費人力也耗費金錢。故希望能夠提出一個方法能有效獲得海洋的波向資料及水深資料以提供海岸工程施作的事前規劃。

近年來遙測技術日益進步，商用光學衛星空間解析度日益提升，且具

有全面性、機動性等優點，所以被廣泛運用於各種研究，如海岸灘線的辨識、陸地植被的分布等。從 1999 年 Landsat-7 ETM+ 的 15 公尺空間解析度、2003 年 SPOT-5 衛星的 10 公尺空間解析度到目前我國於 2004 年發射的 FORMOSAT-2 的 2 公尺空間解析度。利用衛星影像及結合波浪特性來推算海洋資料是一種值得嘗試的方法，且此方法不僅節省人力更能節省時間與金錢。

因此本文希望透過高空間解析度的 FORMOSAT-2 衛星影像，配合影像處理技術僅保留所需的影像資訊，並利用快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)取得影像中特性進而推算出波浪的波向、波長並藉由已知的波浪理論來估算水深，以提供港灣建設事前規劃使用。

1-2 文獻回顧

由於衛星影像空間解析度日益提升，國內外已有不少人提出由衛星影像圖探討海洋特性的技術，如 Vogelzang 等人(1992)、Hamburg(2003)、Yijun 等人(2006)及 Pleskachevsk 等人(2011)，其研究結果皆顯示，高空間解析度的衛星影像可用於河口與海岸調查，對於港灣建設的事前規劃有很大的幫助，並且具有很可觀的發展性。

Ryu 等人(2002)利用多頻譜影像中的熱紅外光(Thermal-Infrared Rays, TIR)、近紅外光(Near-Infrared Rays, NIR)及短紅外光(Short-Wave Infrared Rays, SWIR)的組合，可在退潮時提升衛星影像擷取灘線的成效。吳等人(2003)利用許多不同時間的遙測資料分析台灣西海岸的變遷。呂等人(2004)以涵蓋範圍大但空間解析度差的 SPOT 衛星影像利用區域成長趨近法進行澎湖及東沙島地區的海岸線與面積的遙測分析，在忽略潮位影響後的遙感偵測結果其平均誤差達 10% 以下。楊(2007)利用 SPOT-5 衛星中之近紅外光波段影像辨識水線。

吳(2010)提出 HIS 影像融合提高影像圖解析度，並以 NOVI-Green 設定

灘線門檻值，擷取影像圖之灘線，探討台南的黃金海岸灘線變化，結果顯示黃金海岸為一個夏侵冬淤的海岸型態。張等人(2011)探討光學衛星影像的雲層覆蓋率，並以高斯混合模型(Gaussian Mixture Model, GMM)配合群集分析法並同時考慮時間及空間差異對台灣海岸進行分類，提供海岸地區光學衛星影像可用率的初估。

Vogelzang 等人(1992)以合成孔徑雷達(SAR)影像圖來推估水深，因 SAR 影像圖具有高空間解析度，目前 SAR 影像圖可達 1 公尺以下的空間解析度。Durand 等人(1998)提出使用衛星遙測數據來推算湖泊或海洋水深的可行性。Kuo 等人(1999)驗證了由 RES-1 SAR 的頻譜中求得主波方向及波峰頻率。Tripathi 等人(2002)以最小二乘回歸分析 Kakinada Bay 地區海域水深與反射光譜之間的回歸式，再經濁度校正並利用 Chi-square 做驗證，其結果顯示，頻段位於 $0.52 \mu\text{m}$ - $0.58 \mu\text{m}$ 為最佳。Leu 等人(2005)利用 Wave Spectrum Bathymetric(WSB)方法從遙測光學影像中獲得淺水區域的水深，其探討水深範圍約-12m。

Pleakachevsky 等人(2011)提出利用快速傅立葉轉換求得波長及波向並估算水深，而 0m 至 20m 的水深可由光學遙測數據獲得，10m 至 100m 的水深可由分析 SAR 影像圖後獲得，其最後結果顯示精度約可達 $\pm 15\%$ 。本文主要也是參考此學者所使用的方法並將其運用於台灣海域。

由往昔研究指出，影響推估結果好壞的主要原因是衛星影像空間解析度的高低，然而，衛星影像圖的好壞需考慮許多方面，如光照射強弱、雲層厚度以及照射角度，故在挑選衛星影像時必須更為嚴謹，以增加其估算結果的可靠度。

1-3 文章架構

本文是將快速傅立葉轉換運用於衛星影像圖中，經由頻譜圖計算波浪的入射角及波長，進而利用波浪理論中的分散關係式推算水深並。整體架

構分為五個章節來探討研究流程及方法

第一章為前言論述，主要說明本文之研究動機及目的，文獻回顧及文章整體架構，接著第二章介紹研究基地的範圍、市面上常用的光學衛星以及詳細說明挑選衛星影像圖所需注意的事項，最後簡介傅立葉轉換的由來及其使用時的限制條件。

影像的前置處理作業則在第三章詳細介紹，主要為增強影像對比度以及將波峰波谷明顯化。接著驗證此方法的可行性並實際運用於所挑選的研究基地。

第四章主要是由推算出的波長經折射理論修正後配合海洋浮標測得的週期再利用波浪理論中的分散關係式來估算水深。其估算結果再與實測水深做驗證以說明此方法的可靠性，最後第五章針對本文研究的結果進行總結並給予建議，以利後續研究參考。



第二章研究背景

2-1 研究基地介紹

本文選擇枋寮海岸及龜山島二處作為研究基地，屏東縣枋寮漁港海域，位於枋寮鄉的市中心，長度約達 2.5 公里，海岸線平直無曲折，平時海象穩定，除颱風侵襲外並無大風浪或危險的暗流且水深變化平緩，而枋寮漁港除漁業外更發展了觀光事業。龜山島，位於蘭陽平原東面太平洋上的一座火山島，又稱龜山嶼，因外型似浮龜而得名，島嶼東西寬約 3.1 公里，南北長 1.6 約公里，面積約 2.841 平方公里，海岸線長約 9 公里，海岸線曲折多變化，離岸 150 公尺處水深約 1 至 6 米，而往龜山島尾端西方 1 公里處水深約 22 米。地理位置分別為圖 2-1(a)及圖 2-1(b)所示。

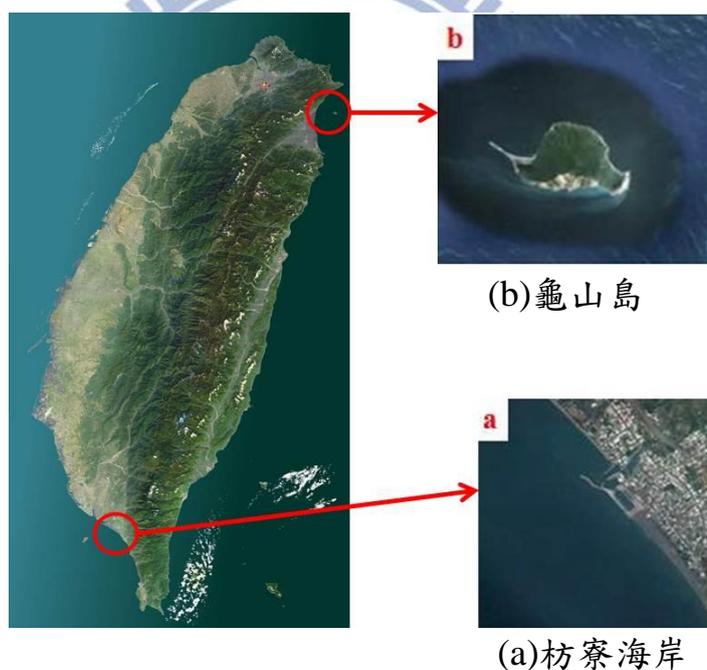


圖 2-1 研究基地的地理位置圖

2-2 衛星影像圖資料來源

目前商用光學衛星種類繁多且空間解析度日益提高，從 1992 年 Landsat-7 EMT+ 的 15 公尺、2003 年 SPOT-5 的 2.5 公尺，到現在福爾摩沙衛星二號(FORMOSAT-2)及美國的 IKONOS 與 Quickbird 衛星約 1 公尺。本研究考慮資料取得的方便性，選擇福爾摩沙衛星二號。

福爾摩沙衛星二號於 2004 年 5 月 21 日成功發射，為我國第一個自主性遙測科學衛星，屬於太陽同步衛星，每日繞地球 14 圈，具左右各 45° 傾斜拍攝能力，其掃描像幅寬為 24 公里，攝影模式為衛星本體旋轉同步取樣。

福爾摩沙衛星二號衛星影像圖的座標系統為 TWD67 系統，而實測地形資料為 TWD97 系統，故需將影像的 TWD67 系統轉換成 TWD97 系統以利於研究分析。

本文向國立中央大學太空遙測中心申購的福爾摩沙衛星二號影像圖，其影像空間解析度與感測器光譜模式如表 2-1 所示。

表 2-1 FORMOSAT-2 衛星資料的基本特性

感測器	軌道	光譜模式	波段數	光譜解析度(μm)	空間解析度
RSI	太陽 同步	全色態(PAN)	1	0.52~0.82	2m
		多頻譜態(XS)	4	0.45~0.52(藍) 0.52~0.60(綠) 0.63~0.69(紅) 0.76~0.90(近紅外)	8m

本文主要是將快速傅立葉轉換應用於衛星影像，需採用較高品質的影像圖以確保圖像資訊足夠。在颱風前後風浪較大，波紋線較明顯，因此本文選用颱風前後且雲層覆蓋率低的影像圖來分析，使用影像圖資料如表 2-2 所示。

表 2-2 挑選的衛星影像圖

研究基地	日期	時間	衛星種類	座標系統	對應颱風
枋寮	2007/08/05	02:08:56	FORMOSAT-2	TWD67	PABUK(帕布) (08/06~08/08)
龜山島	2011/05/29	02:00:45	FORMOSAT-2	TWD67	SONGDA(桑達) (05/27~05/28)

2-3 快速傅立葉轉換的簡介

快速傅立葉轉換，於西元 1965 年由 Cooley 與 Tukey 兩位學者提出，是離散傅立葉轉換(Discrete Fourier Transform,DFT)的快速演算法，用於求得訊號所對應的頻譜，因計算速度快所以被廣泛運用在訊號處理、影像處理等。而快速傅立葉轉換的限制條件為：

1. 必須滿足奈奎斯特取樣定理(Nyquist sampling theorem)，即取樣頻率為訊號頻率的兩倍或兩倍以上，若不滿足奈奎斯特取樣定理則會造成混疊效應(aliasing effect)。
2. 訊號需為週期性，當訊號為非週期性時必須以離散傅立葉轉換計算。
3. 取樣週期必須為訊號週期的整數倍，否則將造成洩漏效應(leakage effect)，即頻域中訊號的能量散溢到周圍。
4. 取樣數需為 2^n 個，否則無法計算。

2-3-1 混疊效應

一正弦組合訊號振幅大小為 0.5 與 1，主頻率大小為 100Hz 與 400Hz，如式(2-1)所示，三種不同取樣頻率(f_s)之時間序列圖與頻譜圖如圖 2-2 與圖 2-3 所示。

$$y(t) = \cos(200\pi t) + 0.5\cos(800\pi t + 2) \quad (2-1)$$

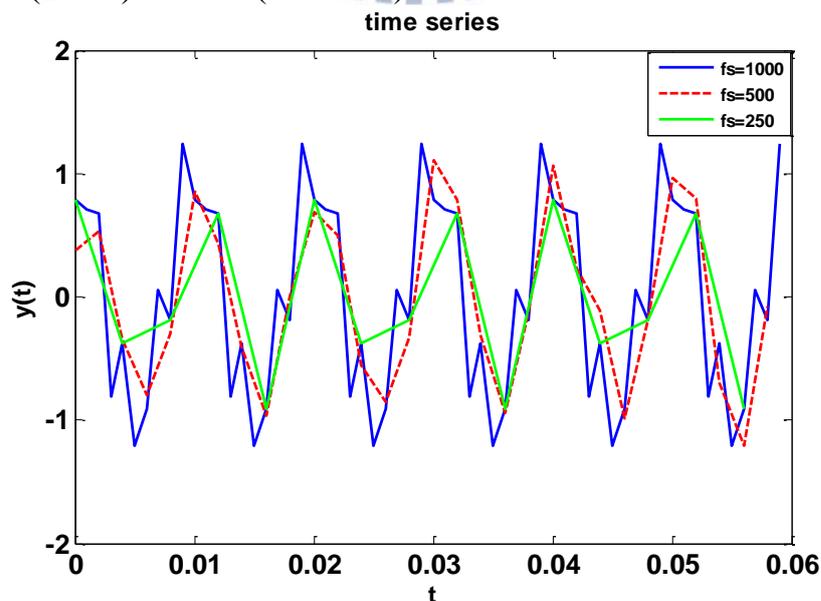


圖 2-2 組合訊號的時間序列圖

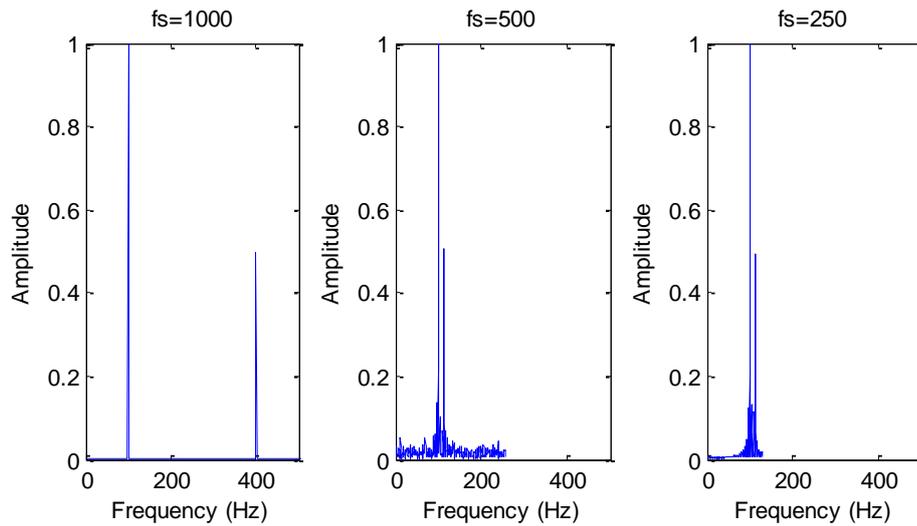


圖 2-3 三種不同取樣頻率的能譜圖

圖 2-3 中顯示取樣頻率為 1000Hz 時，因滿足奈奎斯特取樣定理，故能譜在 100Hz 及 400Hz 皆有明顯的振幅；然而取樣頻率為 500Hz 及 250Hz 時，能譜僅在 100Hz 有明顯振幅。由此可知，若取樣時不滿足奈奎斯特取樣定理，則頻譜分析時產生的混疊效應會使我們無法取得正確的訊號特性。

2-3-2 洩漏效應

一般自然界訊號皆為非週期性訊號，因此容易造成洩漏效應，即主頻中的能量散溢到其他周圍鄰近刻度上，但還是可清楚看出訊號特性，如圖 2-4 所示。

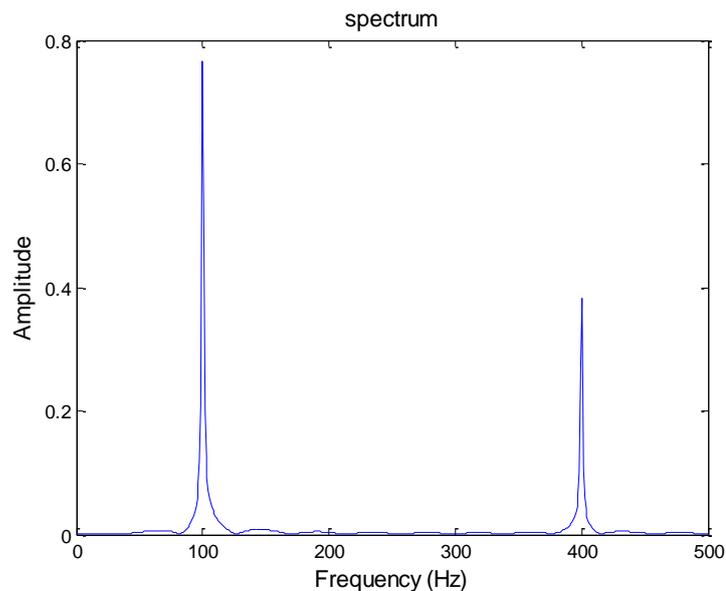


圖 2-4 洩漏效應的示意圖

第三章影像前置處理及決定波向的方法

本研究主要是將快速傅立葉轉換應用於衛星影像圖，繪製出波向線及推算波浪的入射角並由計算出來的波長估算水深。本文同時收集枋寮海岸地形資料(民國 99 年度屏東海岸基本資料監測調查計畫報告)，此地形資料可供驗證由影像圖估算水深的準確性。龜山島雖無實測海底地形資料可驗證，但因其海岸線曲折故有明顯的波浪折射、繞射現象，可說明影像圖推算波浪之能力。

本文利用直方圖均化法增強影像對比度，使原本不易分辨之波紋線更明顯，並利用濾波的概念將因波浪反射產生的微小細紋濾除，以提高快速傅立葉轉換的精度。

3-1 影像前置處理

1. 直方圖均化

直方圖在此表示數位影像圖中統計灰階度像素個數的直方分佈圖，由於灰階度代表影像的明亮，因此將原先灰階分佈重新均勻等化到新的灰階值，以達到提高對比的目的。其轉換方程式如下：

$$g = T(f) \quad (3-1)$$

此轉換須滿足下列兩個條件：

(1) $T(f)$ 在 $f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$ 的區間上為單調遞增。

(2) 相對於 $f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$ ， $g_{\min} \leq T(f) \leq g_{\max}$ 。

其中 f 為原始灰階度， g 為輸出灰階度。輸入機率密度函數(probability density function)形式和輸出機率密度均勻分佈形式，分別如式(3-2)及(3-3)所示：

$$P_f(f) = \frac{n_f}{N}, f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \quad (3-2)$$

$$P_g(g) = \frac{1}{g_{\max} - g_{\min}}, g_{\min} \leq g \leq g_{\max} \quad (3-3)$$

其中 N 為所有像素個數， n_f 為灰階度 f 出現的像素個數， $P_f(f)$ 和 $P_g(g)$ 分別為 f 、 g 的機率密度函數。

根據機率密度理論得知其累積機率密度(cumulative density function)相等， $P_g(g) = P_f(f)$ ，如式(3-4)。將(3-2)及(3-3)式代入(3-4)式得式(3-5)。如圖3-1所示，原圖灰階範圍集中在70至150之間，經過處理後均勻分佈在0至255之間。

$$\int_{g_{\min}}^g P_g(\xi) d\xi = \int_{f_{\min}}^f P_f(\xi) d\xi \quad (3-4)$$

$$g = (g_{\max} - g_{\min}) \sum_{i=f_{\min}}^f \frac{n_i}{N} + g_{\min}, f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \quad (3-5)$$

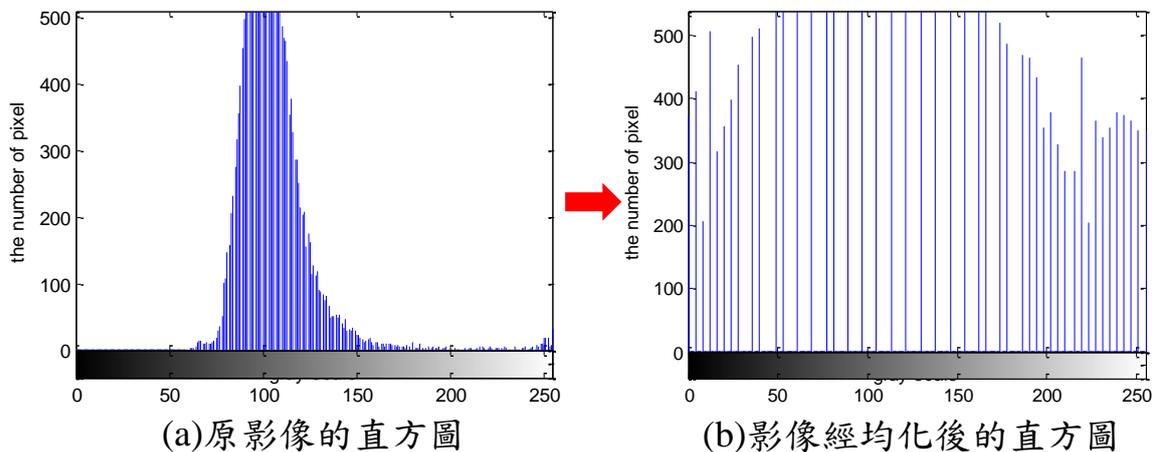


圖 3-1 直方圖均化的灰階分佈圖

2. 巴特沃斯(Butter Worth)高通濾波

對一影像進行傅立葉轉換後，物體的邊緣或灰階度變動較劇烈的部分

反應在傅立葉係數中的高頻部分，平滑部分則反應在傅立葉係數中的低頻部分，依此原理，利用高通濾波即可將低頻的係數衰減，再對處理過的影像取傅立葉反轉換即可達到高通濾波的效果。

設 $f(m,n)$ 為原影像， $h(m,n)$ 為濾波器之脈衝響應， $g(m,n)$ 為影像濾波後的結果，原影像與濾波器脈衝響應做迴旋積分(convolution intergal)後可得濾波後影像表示如式(3-6)。

$$g(m,n) = f(m,n) * h(m,n) \quad (3-6)$$

對(3-6)式取傅立葉轉換後得式(3-7)

$$G(k,l) = F(k,l)H(k,l) \quad (3-7)$$

因此在頻率域中，可依不同的 $H(k,l)$ 選擇來達到高通或低通濾波的效果。最常見的為巴特沃斯濾波器如式(3-8)所示。

$$H(k,l) = \frac{1}{1 + [D_0 / D(k,l)]^{2n}} \quad (3-8)$$

其中為， D_0 為截止頻率， $D(l,k)$ 為點 (k,l) 到原點間的歐基里德距離式(3-9)， n 為階數，若階數越高則濾波器響應變化速度越快。

$$D(k,l) = \sqrt{(k^2 + l^2)} \quad (3-9)$$

取部分龜山島影像圖做測試結果如圖 3-2 與圖 3-3 所示。圖 3-2 中主要波峰為高頻部分，而細紋則反應在低頻部分，故經過高通濾波後，波峰波谷變得更為明顯，因波浪反射或交疊所產生的細紋也有所濾除。

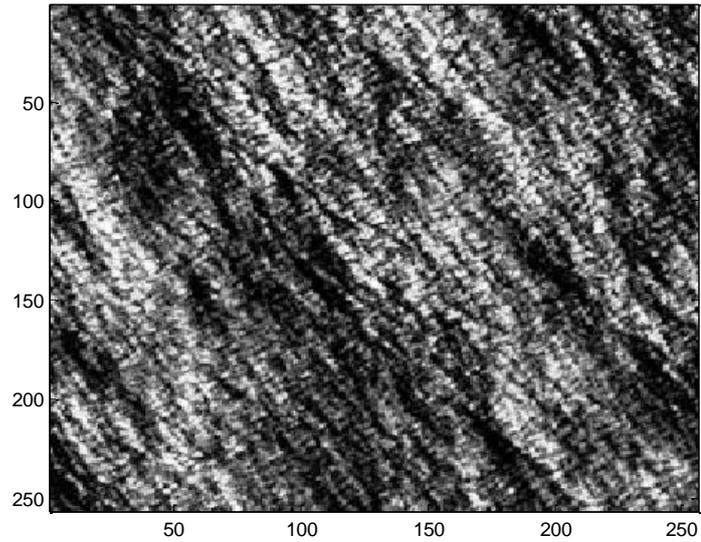


圖 3-2 龜山島的部分衛星影像圖

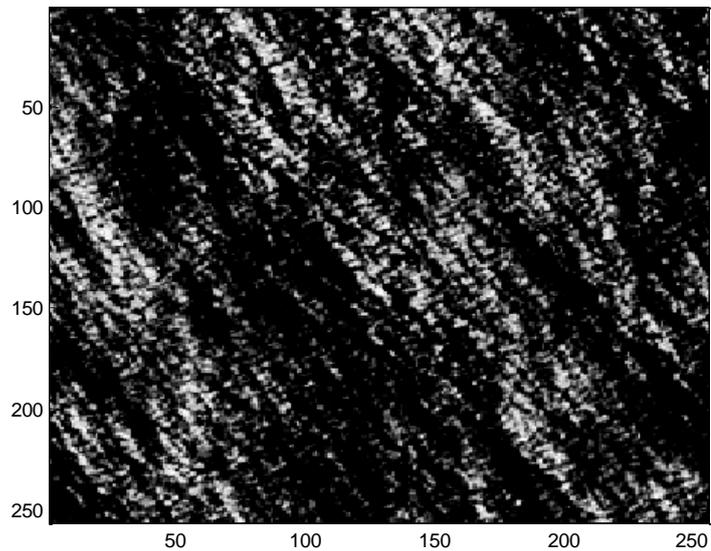


圖 3-3 圖 3-2 經高通濾波後的影像

3. 海陸交界線的擷取

因本文在推算進岸波向時會擷取到陸域影像資料而造成近岸波向推算不準確，為了增加推算進岸波向的準確性，本文將陸域影像資料取代為海域影像資料平均值使得方框中取得的資料為海域資料，而海陸分界方式採常態化水指數標準差(normalized difference water index, NDWI)。

Mcfeters(1996)提出常態化水指數標準差，用於植物含水率的測定，也稱為葉面積含水量指標(Leaf area water-absent index)主要是利用綠光波段反

射強度(綠光的波長約 $0.50\mu\text{m}$)與近紅外光波段反射強度(近紅外光的波長約 $0.79\mu\text{m}\sim 0.89\mu\text{m}$)的數學和差比來判斷植物葉面的含水量面積，適合用來突顯含水量高低的差別。NDWI 比值關係式如下式所示：

$$NDWI = \frac{(NIR - Green)}{(NIR + Green)} \quad (3-10)$$

其中 NIR 為近紅外光波段反射強度， $Green$ 為綠光波段反射強度。

由於清澈水體對於近紅外光波段的反射率其值接近於零，又反射率最大值落在綠光波段和紅光波段之間，且土壤對於不同波段的反射率恰與水體相反，以上所述特徵非常符合常態化水指數標準差(NDWI)的比值關係，因此衛星影像圖經 NDWI 轉換後，其值大於零可判定為土地，其值小於零可判定為水體，其值等於零即判定為灘線位置，由此方法即可明顯辨識陸地及海域範圍。龜山島衛星影像圖經 NDWI 轉換並取二值化後結果如圖 3-4 所示。



圖 3-4 龜山島經 NDWI 及二值化後的灘線位置

3-2 波向推算

1. 影像傅立葉轉換

影像處理是將照相機、攝影機取得的畫面轉為數位化的圖檔，再經由特定方法去取得數位化後影像的特性，而本文使用二維快速傅立葉轉換來進行分析。

利用快速傅立葉轉換中的轉換與反轉換，可將影像在頻域與空間域之間進行轉換，其轉換公式如式(3-11)及式(3-12)所示：

$$F(k_x, k_y) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp \left[-2\pi i \left(\frac{k_x x}{M} + \frac{k_y y}{N} \right) \right] \quad (3-11)$$

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} f(k_x, k_y) \exp \left[\left(2\pi i \left(\frac{k_x x}{M} + \frac{k_y y}{N} \right) \right) \right] \quad (3-12)$$

其中 $f(x, y)$ 代表 $M \times N$ 大小的影像，屬於空間域， $F(k_x, k_y)$ 是經轉換至頻域的結果影像， $i = \sqrt{-1}$ ， (x, y) 是空間座標， (k_x, k_y) 為頻率座標，為了明顯看出轉換結果，我們將低頻區的原點平移至正中央 $(M/2, N/2)$ ，而高頻部分則分佈在低頻區周圍，經由這方法即可從頻域中取得影像的特性進而處理過後再透過反轉換將頻域轉換為空間域。

為了驗證此方法運用在影像圖中是否合適，故本文創建一個人造影像來做驗證，若給定一類似波浪的人造影像圖，其入射角設定為 30° ，波長設定為 0.2，如圖 3-5(a) 所示，經由二維快速傅立葉後可得到頻譜等值圖，如圖 3-5(b) 所示。其中 x, y 軸為波數大小，顏色分佈由藍到紅表示振幅由小到大。

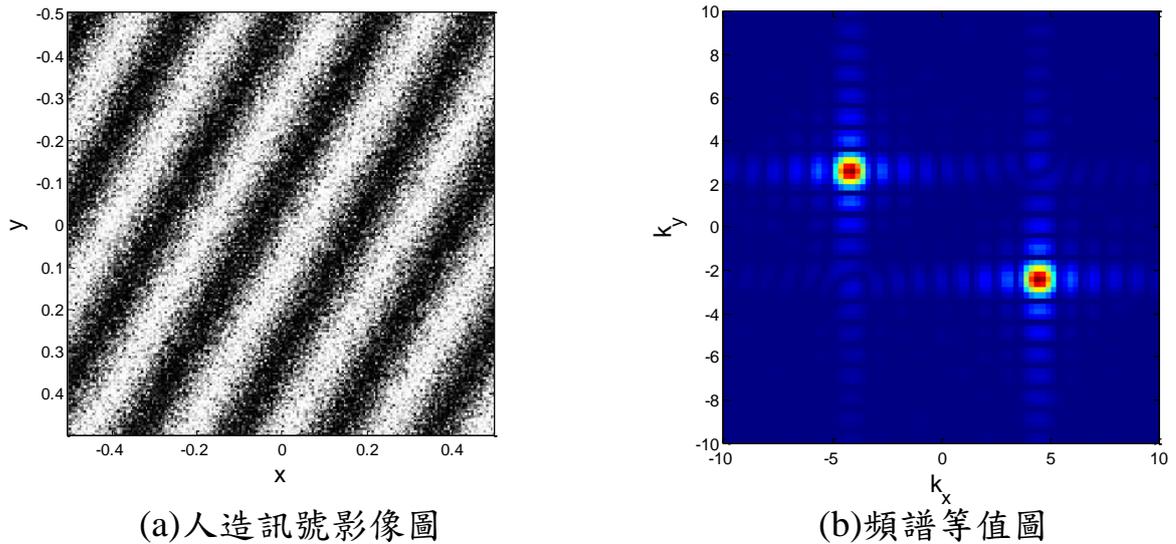


圖 3-5 人造訊號的影像圖與頻譜等值圖

從頻譜圖中找出能量最大的兩點，根據式(3-13)及式(3-14)即可推算出波長及入射角，再與原始設定之數值計算誤差判斷此方法是否可運用在工程上。

$$L = \frac{1}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \quad (3-13)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{k_y}{k_x}\right) \quad (3-14)$$

其中， L 為波長， θ 為波浪入射角， k_{px} 、 k_{py} 為頻譜中的波數，根據推算後結果與給定數值計算誤差值，入射角誤差約為 1.33%，波長誤差約 2.5%，誤差皆小於 3%，表示此方法在工程上具有參考價值，因此本文使用此方法來進行分析。

4. 波向線的決定

步驟 1: 選定起始位置

經由上節所介紹的影像快速傅立葉轉換後我們可將其套用在衛星影像

圖中，如圖 3-6 所示。

任意選擇一點作為起始中心點，為了滿足傅立葉轉換使用限制第四點，並且包含足夠的影像資訊，以 512x512 像素的矩陣大小進行二維快速傅立葉轉換，我們將此矩陣稱為「方框」(frame)。

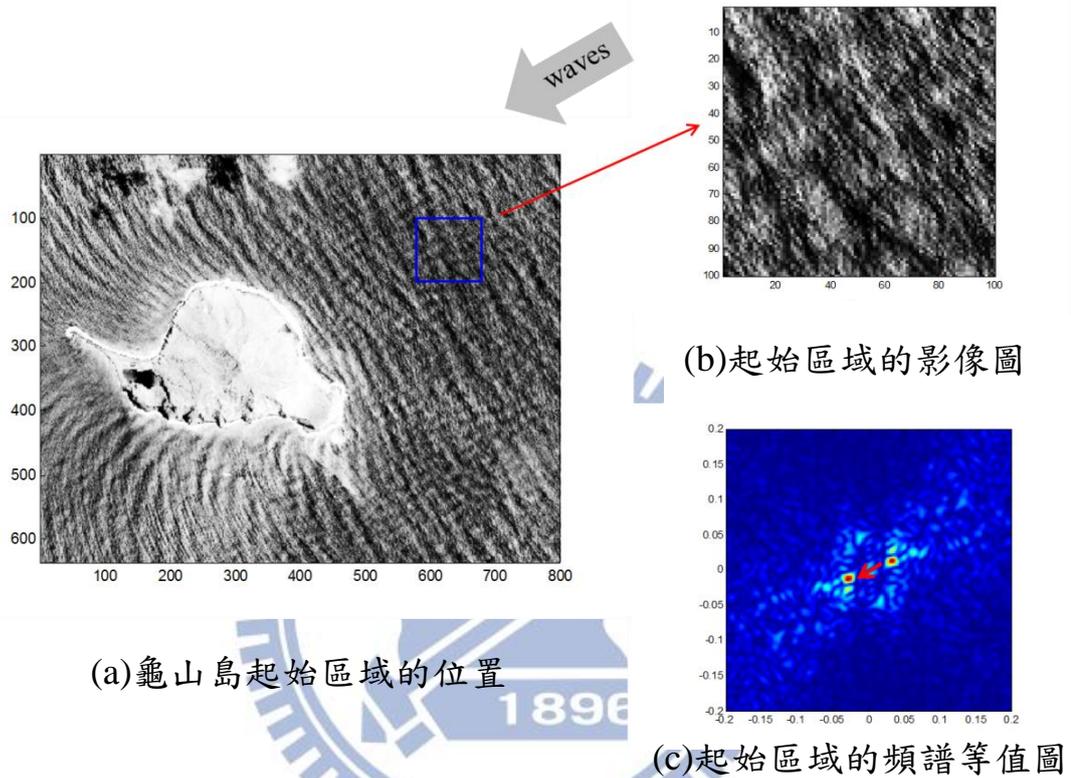


圖 3-6 龜山島的波向線起始區域選定

步驟 2: 方框移動

以往使用此方法皆採用方框兩兩相連的方式，但為了提升推算的精確度，本文採用每計算一次快速傅立葉轉換後由式(3-13)及式(3-14)推算出波長與夾角，接著往 x 方向及 y 方向移動 $1/4$ 倍波長的距離並進行第二次計算，其示意圖如圖 3-7 所示。

此方式雖然會提高計算時間，但明顯表現出波向線的連續性，結果如圖 3-8 所示。

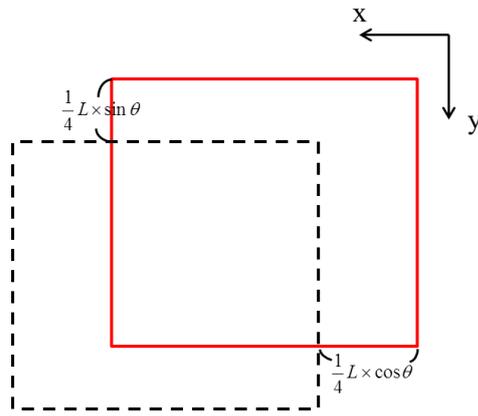


圖 3-7 方框推進示意圖

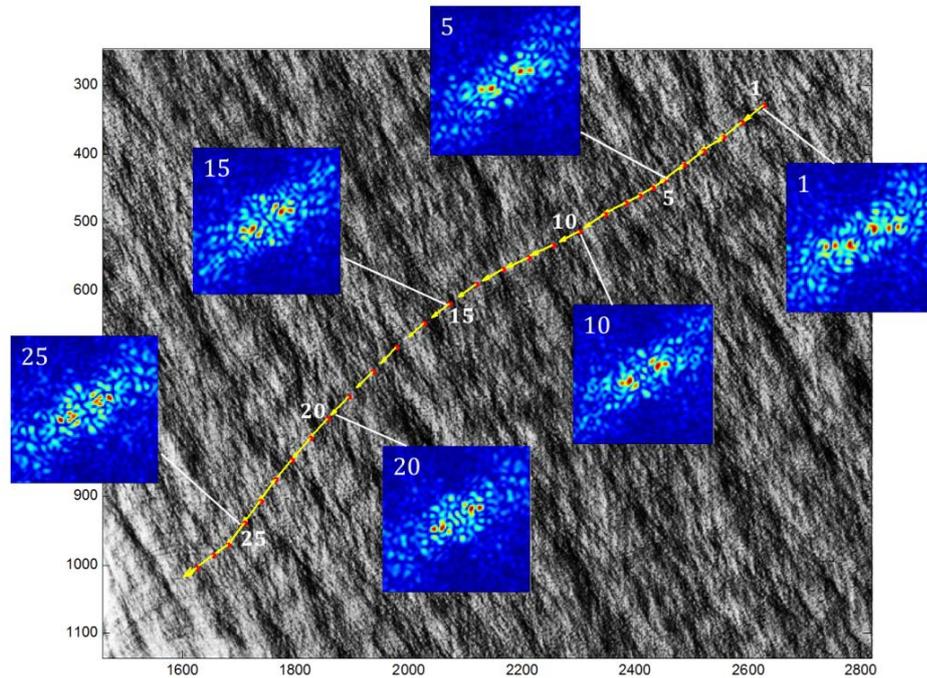
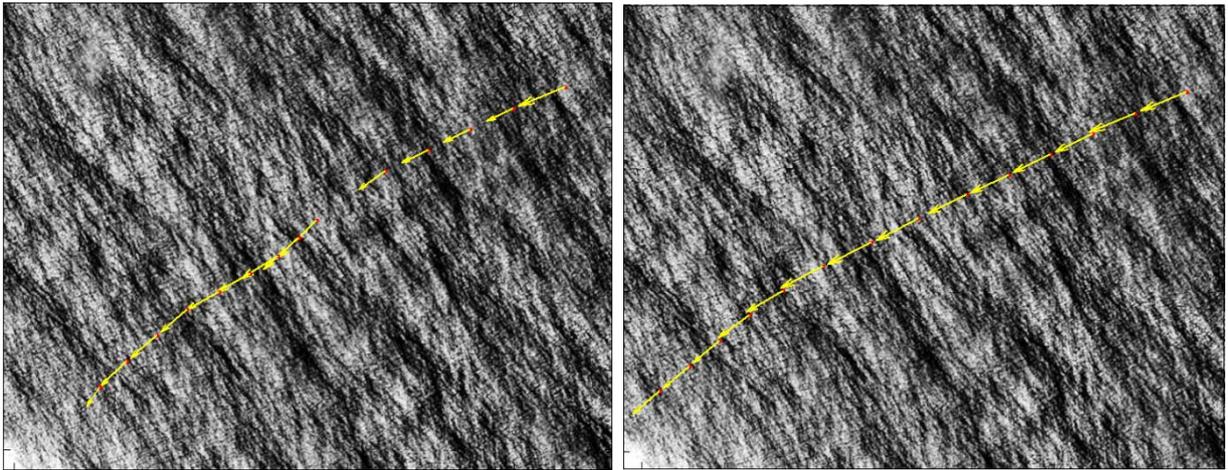


圖 3-8 繪製的波向線示意圖

步驟 3: 波向入射角的修正

由波浪理論中已知，波浪由遠海傳遞至近岸時波浪入射角並不會有劇烈的變化，為了使波向線不相互重疊，經測試後每一次推算出的入射角與前一次推算的入射角相差必須在 $\pm 5^\circ$ 以內，若超過範圍，因方框僅移動 $1/4$ 波長，故角度變化小，其修正方式為使用前一次推算出的入射角取代之，修正前後差異如圖 3-9(a)與圖 3-9(b)所示。



(a)修正前的波向線

(b)修正後的波向線

圖 3-9 波向角修正前與修正後的波向線示意圖

步驟 4:終止計算

為提高近岸推算的精確度，當方框移動至近岸後取海域影像的像素平均值取代陸地區域的像素，若一個方框中陸地面積占其方框總面積的 $1/3$ 時即停止計算，如圖 3-10 所示，而海陸區隔方式採用常態化差異水指數標準差。

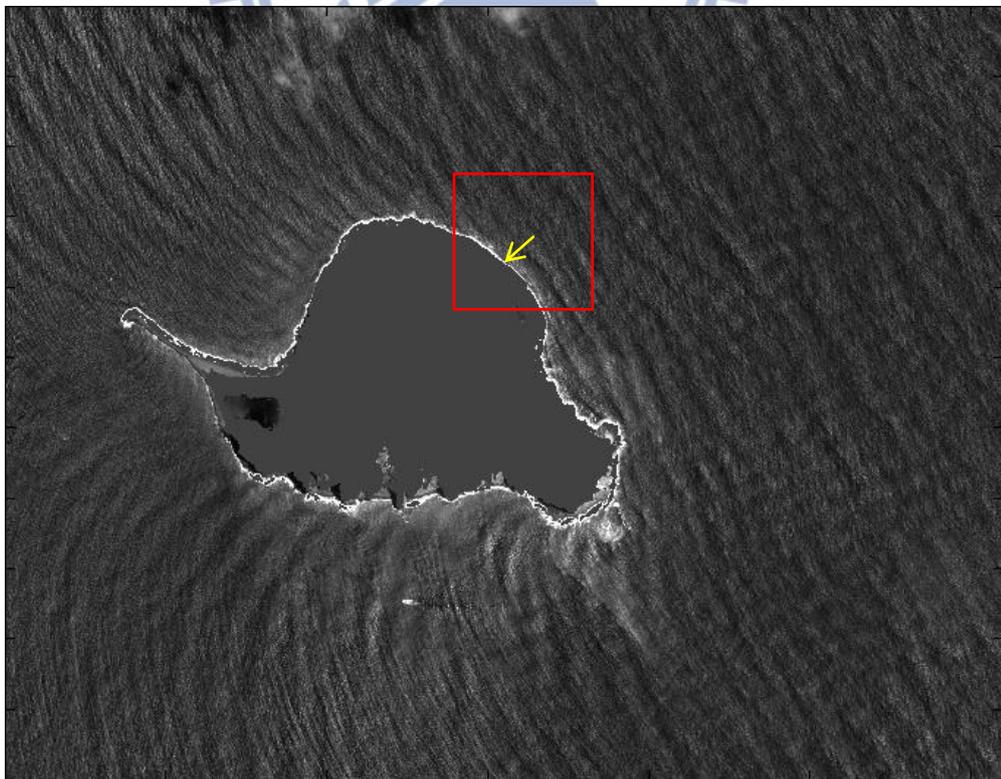


圖 3-10 龜山島近岸的波向推算方法

步驟 5:加密方框(fine frame)

使用一格為 $512*512$ 的方框僅能計算至離岸約 300 米處，故在方框移動與陸地接觸時縮減成 $256*256$ ，經由此操作即可推算至離岸約 100 米處，也是港灣結構物施作的範圍，其移動示意圖如圖 3-11 所示。

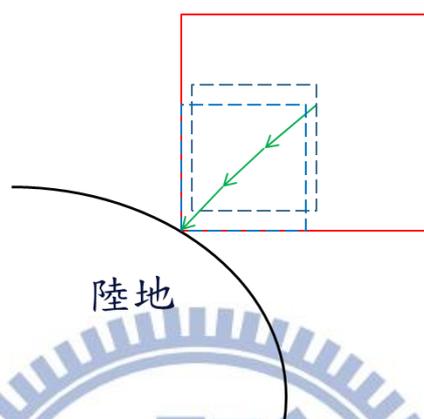


圖 3-11 近岸波向推算方框加密示意圖

3-3 波向線的繪製

根據上節敘述五步驟並將各點連線即可繪製出一條波向線，如圖 3-12 所示，圖中紅色點表每一格方框的中心點，也作為波浪前進的起始點，黃色線表波浪的波長，但此方法在波浪繞射區不能有效辨識，故本文在繞射區部份不做探討。

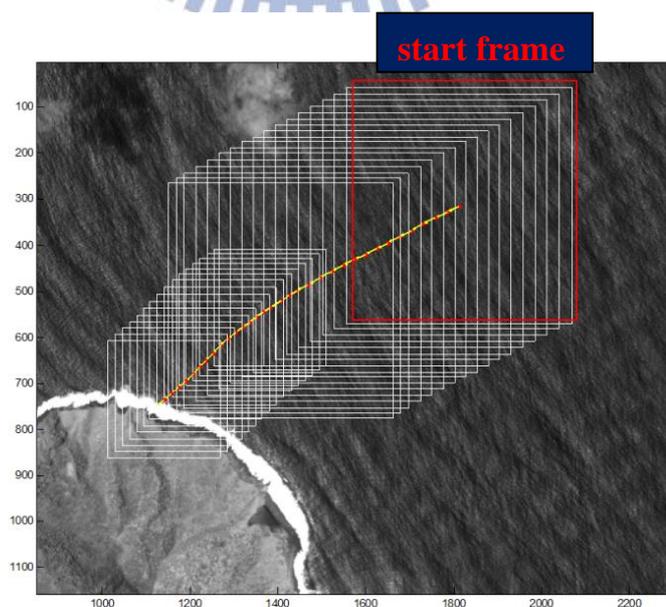


圖 3-12 繪製龜山島波向線的示意圖

繪製出一條波向線後由起始點往右移動訂出第二個起始點後即進行第二次波向推算系統，依此方式操作便可推得其餘波向線，如圖 3-13 與圖 3-14 所示。

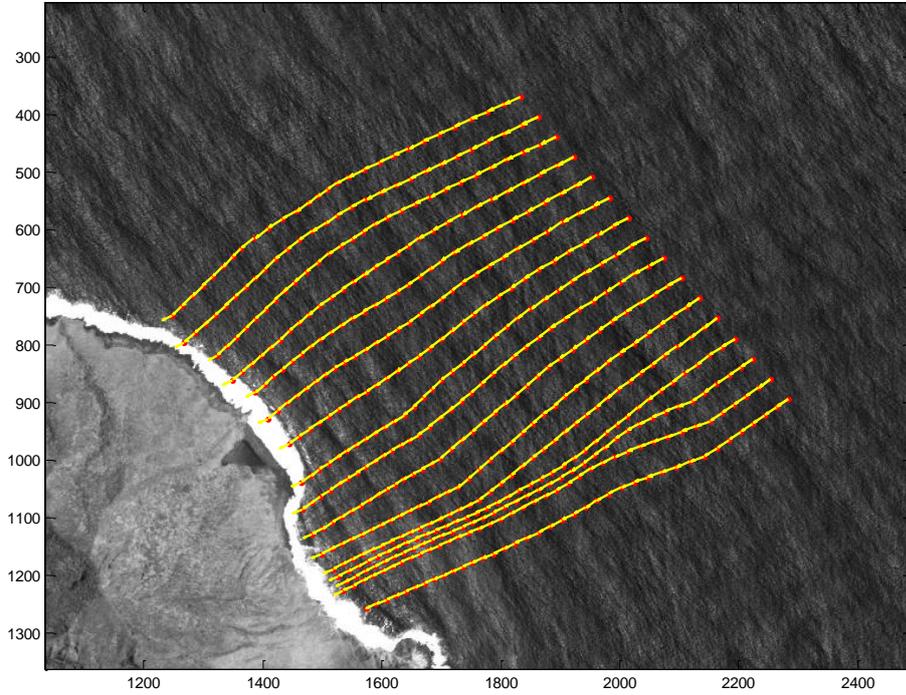


圖 3-13 龜山島海域的部份波向線

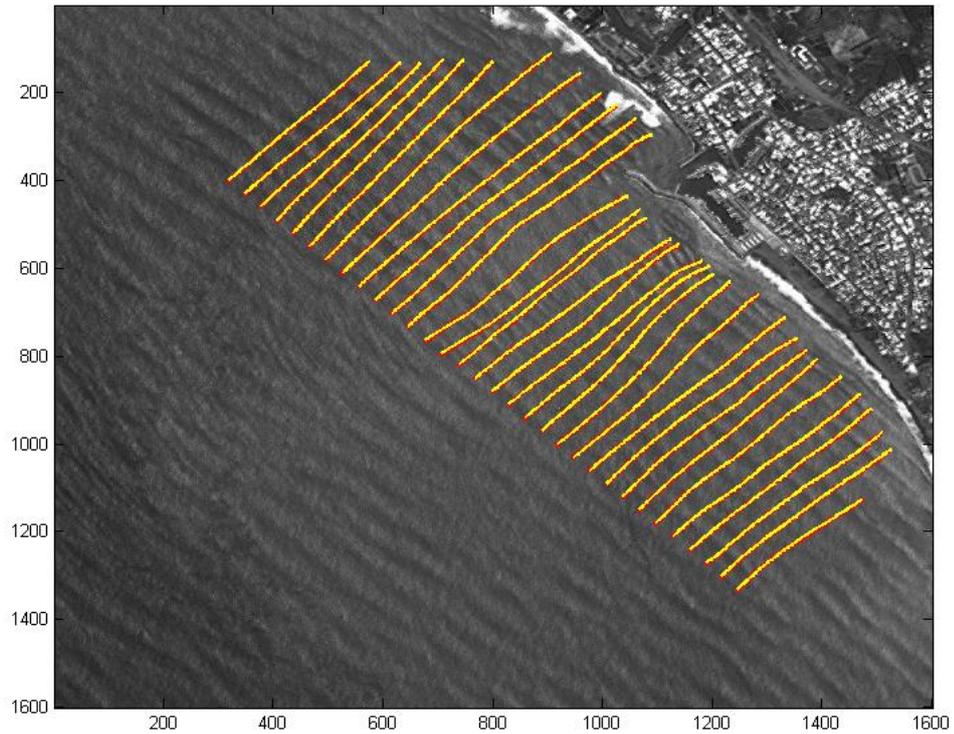


圖 3-14 枋寮海岸的部份波向線

本文推算 96 年 8 月 5 日屏東縣枋寮漁港外側海域的波向並與柯(2012)使用數值模擬所推算的波向進行角度比較。首先選取 8 條波向線並對應到數值模擬推算的波向線，如圖 3-15 所示，分別對波向角度進行內插，最後每條波向線取 323 個點做絕對值誤差及均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)。RMSE 的定義如式(4-6)所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_m - d_c)^2}{N}} \quad (3-15)$$

其中 d_c 為本模式推算的角度， d_m 為數值模擬推算的角度， N 為資料數。此值越大表示二者偏差越多，即誤差越大，越不吻合。

本文所提供的方法推算出的波向角度介於 220 度至 232 度之間，而數值模擬所得的波向角度介於 214 度至 232 度之間，二者的平均絕對值誤差量為 4.73 度，RMSE 為 5.84 度。

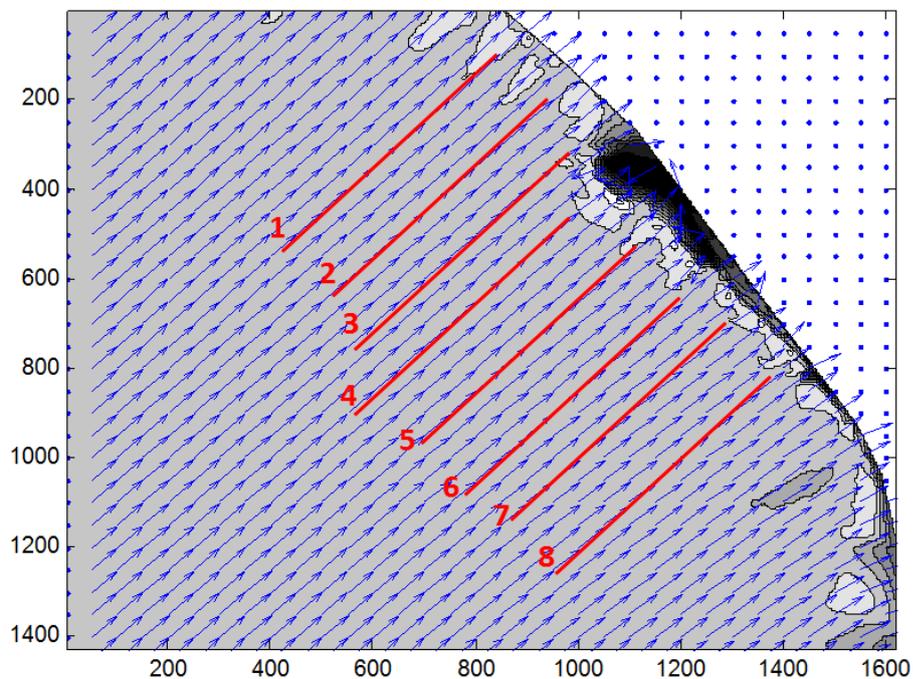


圖 3-15 本文選擇數模推算的波向線(藍色線)的 8 個剖面位置(紅色線)

第四章波長修正及水深推算

4-1 波長修正

經由影像傅立葉轉換求得海域的波長及波浪入射角後，由於本研究僅考慮在水深變化平緩的情況下，波長會隨水深變淺而逐漸遞減，如圖 4-1 所示。因此利用波浪理論中的折射理論進而修正波長，簡述如下：

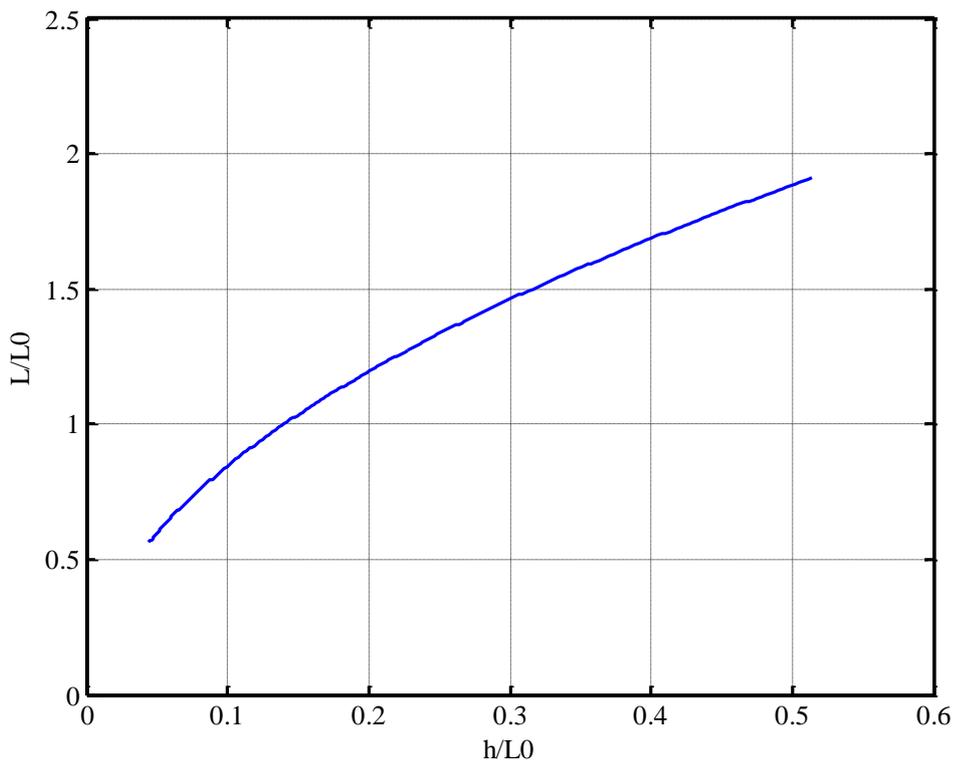


圖 4-1 相對水深與相對波長對應圖

光波在不同介質因傳遞速度不同而產生前進方向的改變，此現象稱為折射(diffraction)。光波折射須滿足著名的 Snell 法則，其公式如式(4-1)所示：

$$\frac{\sin \theta_0}{c_0} = \frac{\sin \theta_1}{c_1} = \text{const} \quad (4-1)$$

其中 θ 為波浪前進的入射角， c 為波速，而下標 0 代表初始條件。

波浪在前進至近岸時，波速也會因為水深的改變而不同，所以推論波浪在前進的過程也會發生類似光波的折射現象，且由理論推導出的波浪折射公式也會滿足式(4-1)的 Snell 法則。如圖 4-2 所示，當波浪有一入射角由外海傳遞至近岸，因為水深變淺所以波速變慢，原本入射的角度則會逐漸變小，到達近岸後波速幾乎為零，波浪入射的角度也會趨近於零，因此波浪到達近岸時幾乎都會垂直於海岸。

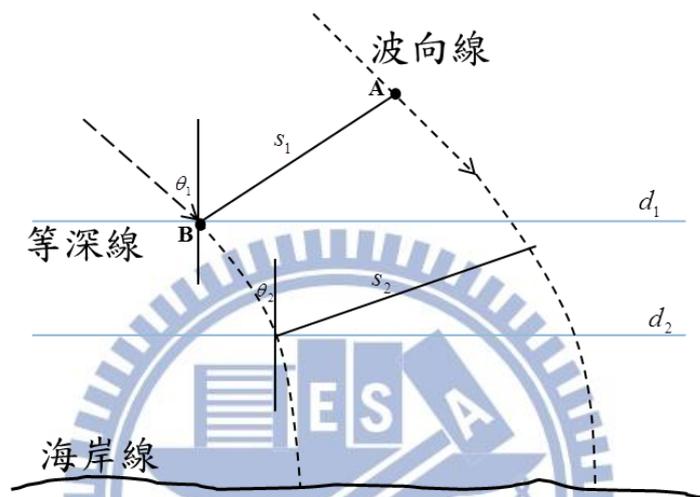


圖 4-2 波浪折射示意圖

本研究採用波浪折射理論進行波長修正，由起始點所推算的波浪入射角當作初始條件，推算至下一格方框時即進行波長修正，我們已知波長為波速與波浪週期的相乘如式(4-2)所示，將式(4-1)整理後可得式(4-3)，由式(4-3)知，在波浪週期固定的情況下，可由每一次所推得的入射角進而修正波長，而原始波長與經折射理論修正後的波長結果如圖 4-3(a)與圖 4-3(b)所示：

$$L = c \times T \quad (4-2)$$

$$c_1 = c_0 \frac{\sin \theta_0}{\sin \theta_1} \quad (4-3)$$

其中 L 為波長， T 為波浪週期， c 為波速，而下標 0 代表初始條件。

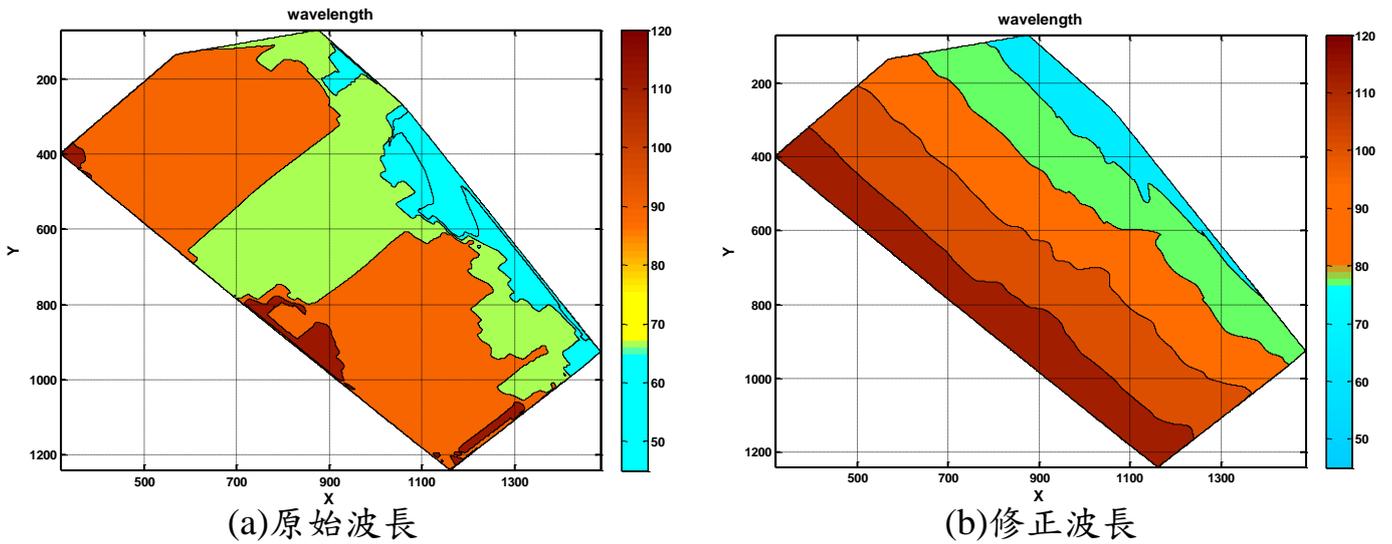


圖 4-3 原始波長與波長修正後的等值圖

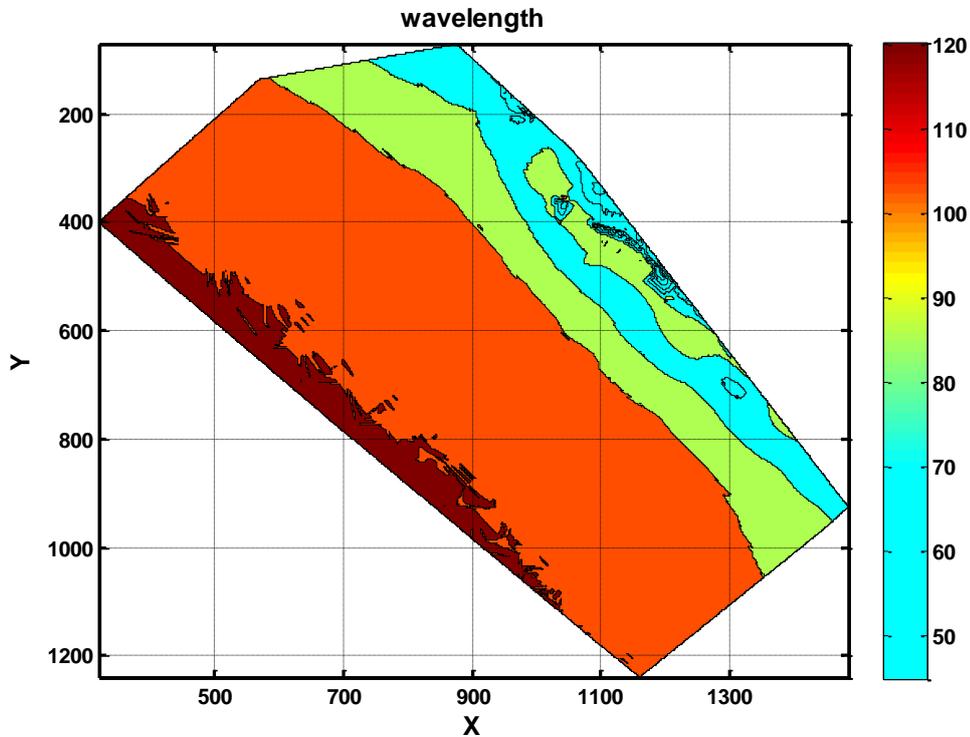


圖 4-4 計算波長的等值圖

圖 4-4 為實測水深數據藉由微小振幅波理論推算而得的波長，其中波長零的部份為海岸結構物。在水深變化平緩的情況下，波長會隨水深變淺而逐漸遞減，而圖 4-3(a)中雖可看出波長越接近近岸時有逐漸遞減的趨勢但還是有些部分不符合已知理論，故利用折射理論進行修正，修正後波長最大處約為 120m，最小處約為 40m，與圖 4-4 較為接近，且呈現均勻分佈。

4-2 水深估算

經上節波長修正後，本研究引用波浪理論中的分散關係式來推算水深，此分散關係式代表在一特定的水深中一週期的成份波會對應到一特定的波長，即在此特定水深中，不同週期的波浪會有不同的波長、波速出現。因此，在特定水深的水域中，若有很多不同週期的成份波組成為一波群時，各週期成份波會因其傳遞速度的不同而逐漸分散開來，如式(4-4)所示，並配合中央氣象局海洋浮標實測週期資料推算枋寮海岸的水深值。但因無法取得逐時波浪週期資料故採用平均週期來做計算。

$$c^2 = \frac{g}{k} \tanh kh \quad (4-4)$$

其中 c 為波速， g 為重力加速度， $k=2\pi/L$ 為波數(wave number)， h 為水深， L 為波長， T 為週期，將式(4-4)更改成另一形式為式(4-5)。

$$h = \frac{L}{2\pi} \tanh^{-1} \left(\frac{2\pi L}{gT^2} \right) \quad (4-5)$$

若波浪週期及波長已知時，由式(4-5)可計算得知水深。本文使用的衛星影像圖解析度為每像素 2 公尺，因此由影像所得的波長會因為影像的解析度而高估或低估波長 2 公尺，此影像的解析度造成估算波長的誤差進而再影響推算水深的額外誤差。

為評估衛星影像圖每像素的解析度所造成推算水深的誤差，本文利用實際現場的狀況來說明。一般風浪週期為 4 至 8 秒，若探討水深為 5 至 15 米的範圍(如第 4-2 節上述本方法無法應用至更近岸的水深)，因此本文假設浪週期為 4 秒、6 秒、8 秒等三種條件，及水深為 5 米、10 米、15 米等三種條件，共 9 種狀況來探討影像解析度造成推算水深的額外誤差，其結果如表 4-1 所示。表 4-1 的結果為假設的週期及水深條件，由式(4-4)計算出對應的波長，再加減解析度 2 公尺後，由式(4-5)計算出水深，此水深與原本

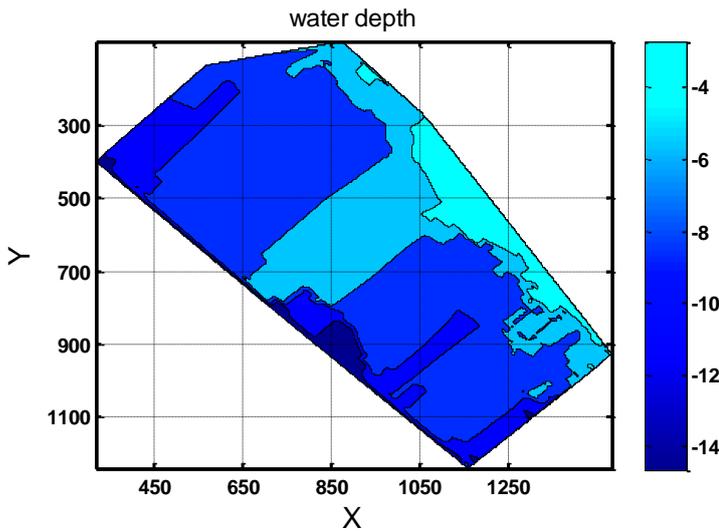
假設水深的差異及為因影像的解析度造成推算水深的額外誤差，若此誤差值與假設水深的百分比則為相對誤差，如表 4-1 中括弧內數字。

表 4-1 影像解析度對推算水深造成的誤差

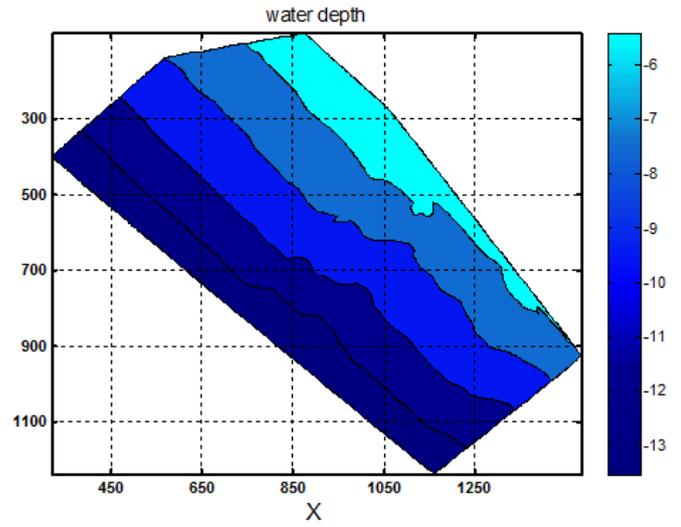
週期 (sec)	影像解析度 ±2m	假設水深(m)		
		5	10	15
4	+	2.97(59.4%)	4.85(48.5%)	4.73(31.5%)
	-	-1.39(27.8%)	-4.53(45.3%)	-4.22(28.1%)
6	+	0.7(14%)	1.68(16.8%)	5.1(34%)
	-	-0.62(12.4%)	-1.33(13.3%)	-2.65(17.6%)
8	+	0.44(8.8%)	0.76(7.6%)	1.22(8.1%)
	-	-0.41(8.2%)	-0.71(7.1%)	-1.11(7.4%)

由表 4-1 可知，當水深在 10 至 15 米之間影像解析度造成的推算誤差值較小，而水深小於 10 米時則較大，接著本文將原始波長推估的水深、利用折射理論修正波長後推估的水深及實測水深繪製成二維等值線圖，如圖 4-5 及圖 4-6 所示。

由上節知，波浪傳遞至近岸時波長會逐漸遞減，故水深也會逐漸變淺，圖 4-5(a) 中此現象並不明顯。圖 4-5(b) 為經折射理論修正波長後推算的水深，水深呈現均勻分佈且逐漸遞減，最深處約為-14m，而最淺處約為-4m，與實測水深相近，但由於本模式無法推得近岸波長，若使用外插來推算-4m 以上的水深結果並不佳，故本文僅列出-4m 以下的水深。



(a)波長修正前的水深等值圖



(b)波長修正後的水深等值圖

圖 4-5 由原始波長及由修正後波長所推算的水深等值圖

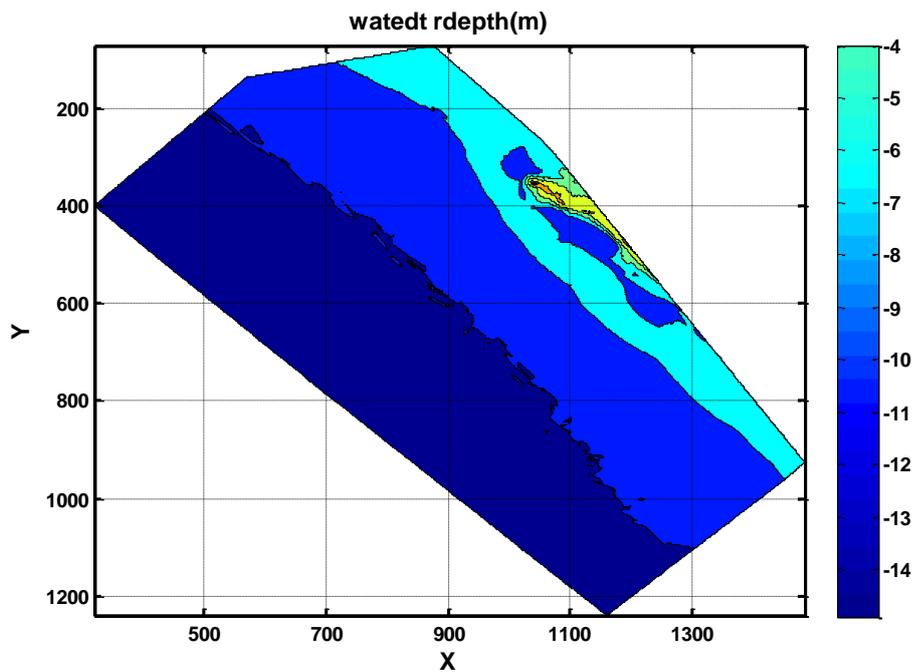


圖 4-6 實測水深的等值圖

圖 4-6 為實測水深的等值線圖，圖中水深大於零處為海岸結構物，其餘部分，水深最深處約為-14m 與推估水深相近，而水深最淺處約為-2m，推估水深大部分略高於實測水深。

4-3 精確度驗證

為評估推算水深的精確度，本研究選用民國 99 年 7 月枋寮海域的水深實測地形與估算水深的均方根誤差。

本研究推算民國 96 年 8 月 5 日屏東縣枋寮漁港外側海域的水深，先取 1 個剖面來進行 RMSE 評估，剖面位置如圖 4-7 所示。



圖 4-7 選擇 1 個剖面的位置圖

在修正波長後所推算水深的 RMSE 值為 4.08m，其深度皆比實測水深淺，而波長修正前所推算水深的 RMSE 值為 2.51m，其深度皆比實測水深深，如圖 4-8 所示，圖中藍色線為經折射理論修正波長所推算的水深 (estimation-1)，綠色線為實測水深(measurement)，紅色線為原始波長推算的水深(estimation-2)。

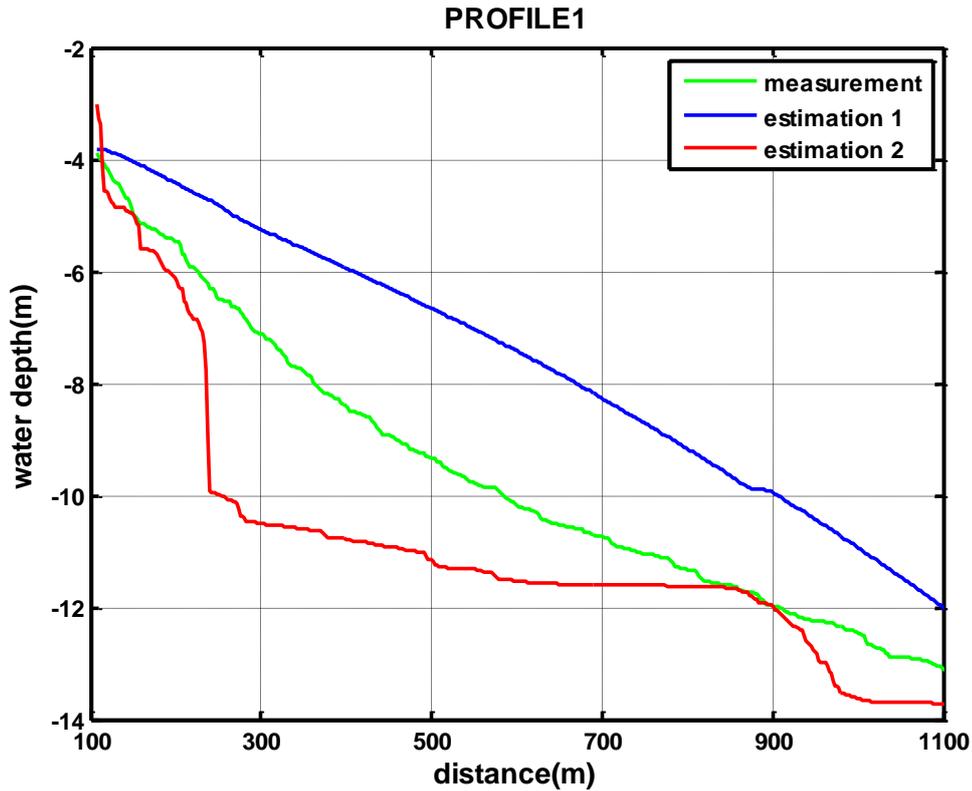


圖 4-8 未修正水深、修正水深及實測水深剖面

4-4 水深探討

由於波長修正的方法會造成推算水深低估，如圖 4-8 藍色線所示，而若由原始波長直接推算水深則會造成水深高估，如圖 4-8 紅色線所示，故本節將這兩部分加以探討。

4-4-1 水深低估

雖然使用折射理論修正波長後達到水深平緩遞減的效果，如圖 4-8 藍色線所示，但因波浪傳遞至近岸時波速下降造成波長遞減太快以至於推算出的水深偏淺，且快速傅立葉轉換是以平均值概念進行計算，故當波浪傳遞至近岸時計算出的角度會比實際的入射角還低，如圖 4-9 所示，快速傅立葉轉換計算出的較深處及較淺處兩個位置的波向角分別為 θ_1 與 θ_2 ，而 $\bar{\theta}$ 為 θ_1 與 θ_2 的平均值。

因為 $\bar{\theta}$ 比 θ_2 大，因此由圖 4-9 可知 $\sin(\bar{\theta})$ 大於 $\sin \theta_2$ ，再由式(4-3)低估波速，故進行波長修正時會因波速低估而造成波長低估，此乃造成修正水深

值比實測水深淺的原因。

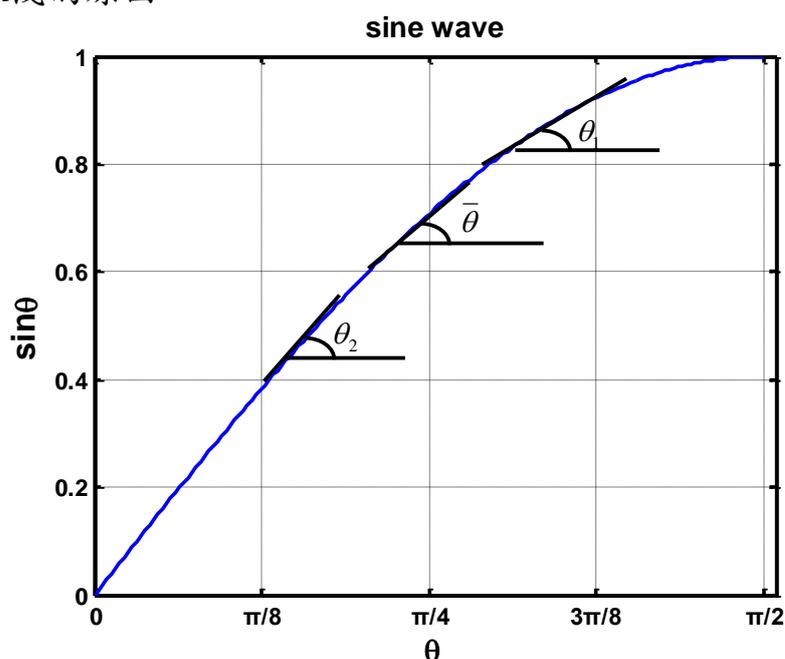


圖 4-9 波浪傳遞入射角位置示意圖

4-4-2 水深高估

由 3-2 節所使用的 Butter Worth 濾波器雖能濾除衛星影像中波浪反射或交疊所產生的細紋，僅留下主要波峰及波谷，而濾波結果的好壞則是藉由調整濾波器中的階數以及截止頻率，經測試後階數為 4、截止頻率為 1 濾波效果最佳，但也因使用濾波器造成計算出的波數下降，波數下降使得波長增加，推算水深時則會造成水深高估。

4-5 水深修正

水深修正方式採用修正與未修正水深的平均值，經修正後 RMSE 值下降為 0.39m，本文再沿海岸切 8 個水深剖面，選擇的剖面位置如圖 4-9 所示，並將剖各剖面的 RMSE 值整理後如圖 4-10 所示。結果顯示 9 個剖面的 RMSE 值平均約為 0.49m，其中剖面 4 至 6 的 RMSE 值皆大於 0.8，取此範圍的影像圖觀察後發現，此處波紋較為凌亂，故分析時會造成波長判斷誤差。

由 9 個剖面可觀察出水深越深處推估結果越好，水深越淺推估結果則越差，估算水深於 -4m 至 -10m 之間較實測水深高，-10m 至 -12m 之間較為

吻合，最後-12m 以下的水深值略低於實測水深。9 個水深剖面圖如圖 4-11 至圖 4-19 所示。

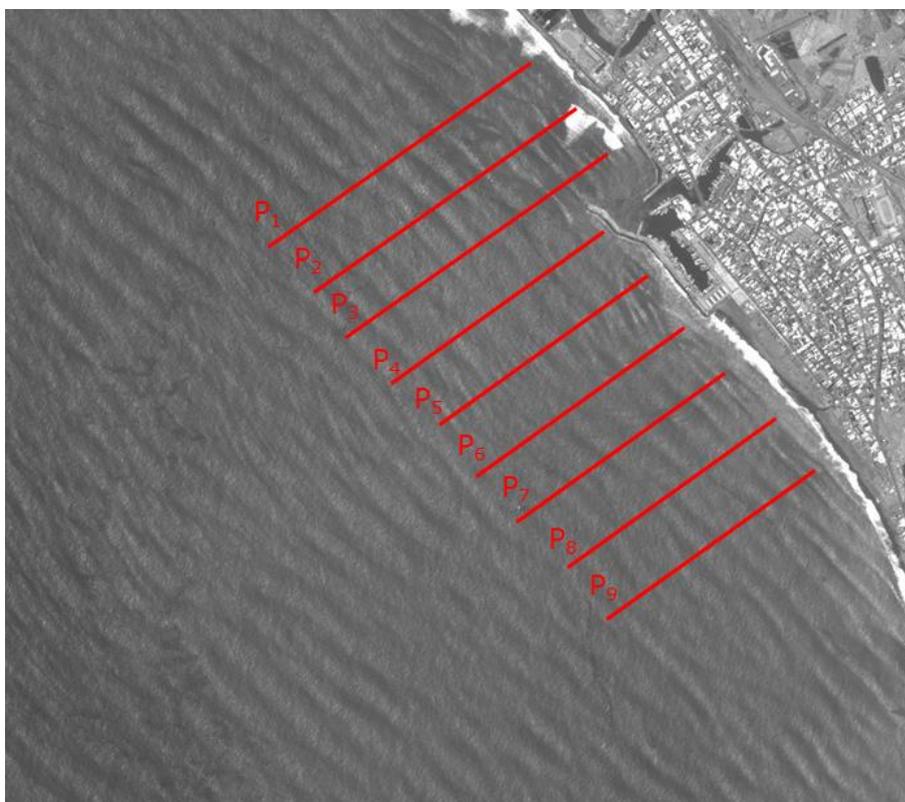


圖 4-9 選擇 9 個剖面的位置圖

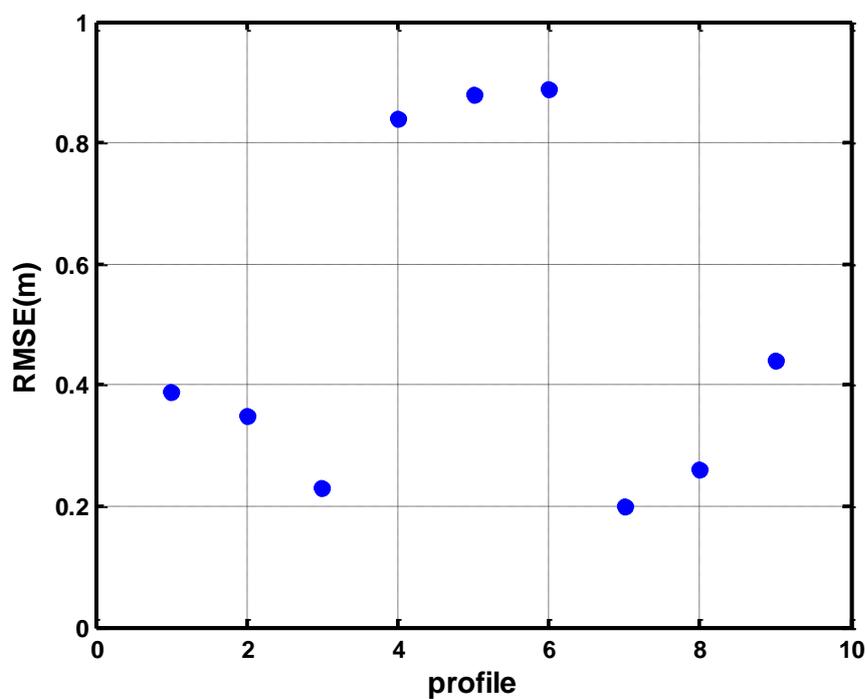


圖 4-10 各剖面對應之 RMSE 值

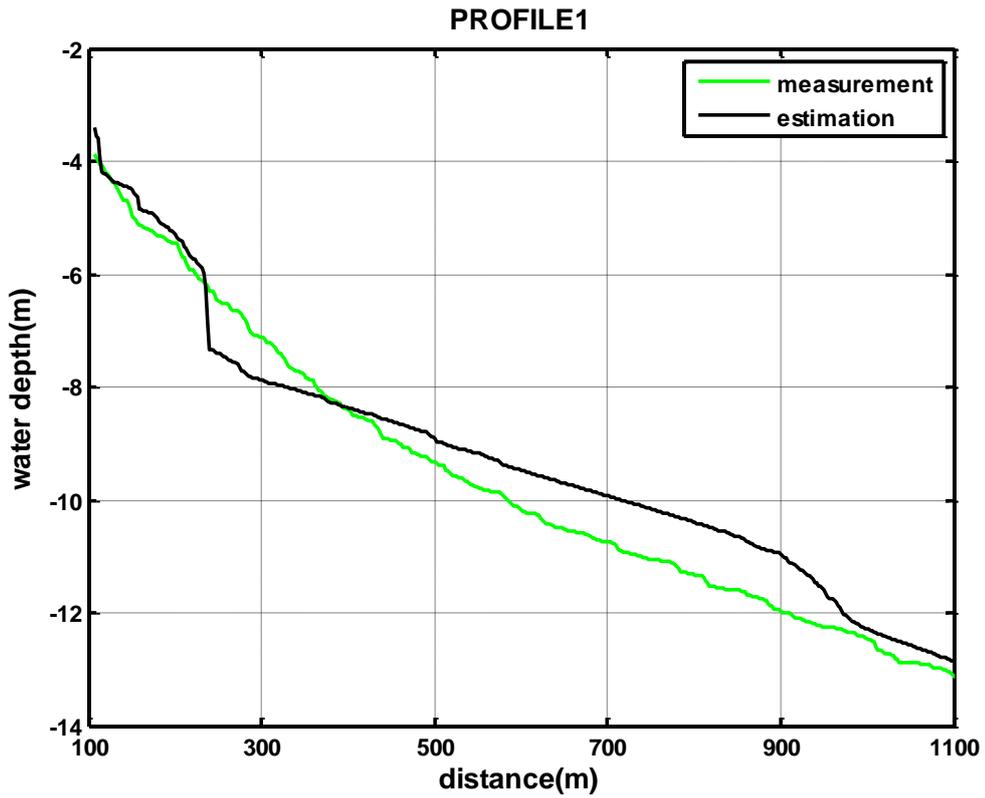


圖 4-11 實測水深(綠色線)與估算水深(黑色線)的水深比較(剖面 1)

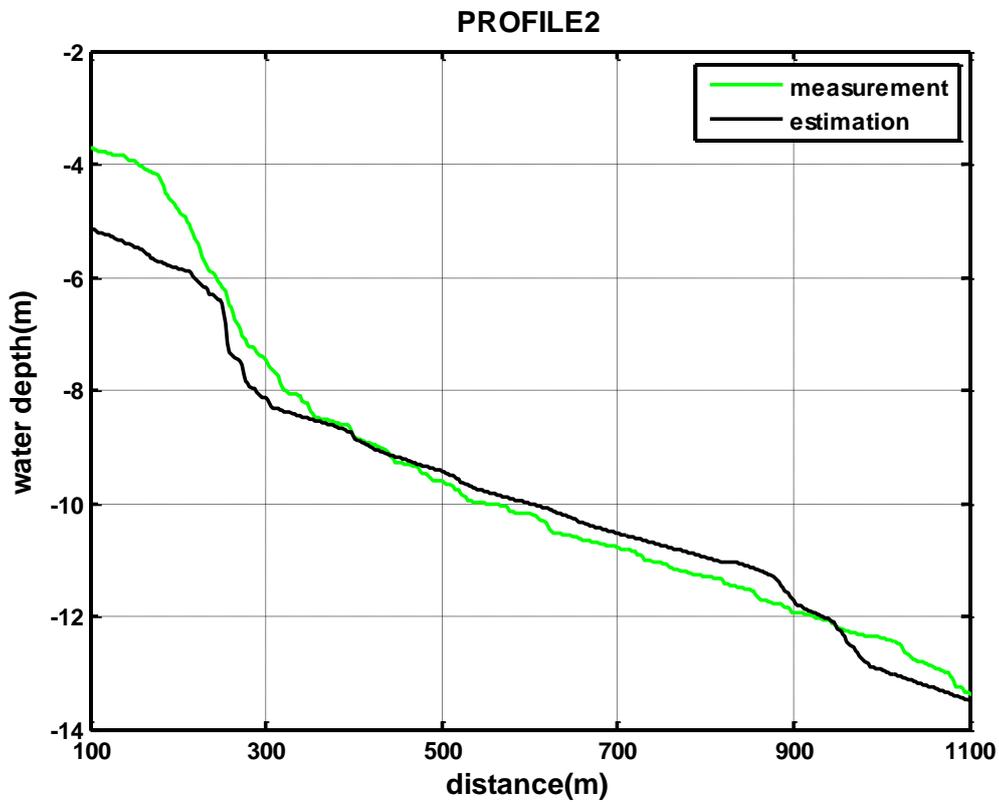


圖 4-12 如圖 4-11 的圖說明(剖面 2)

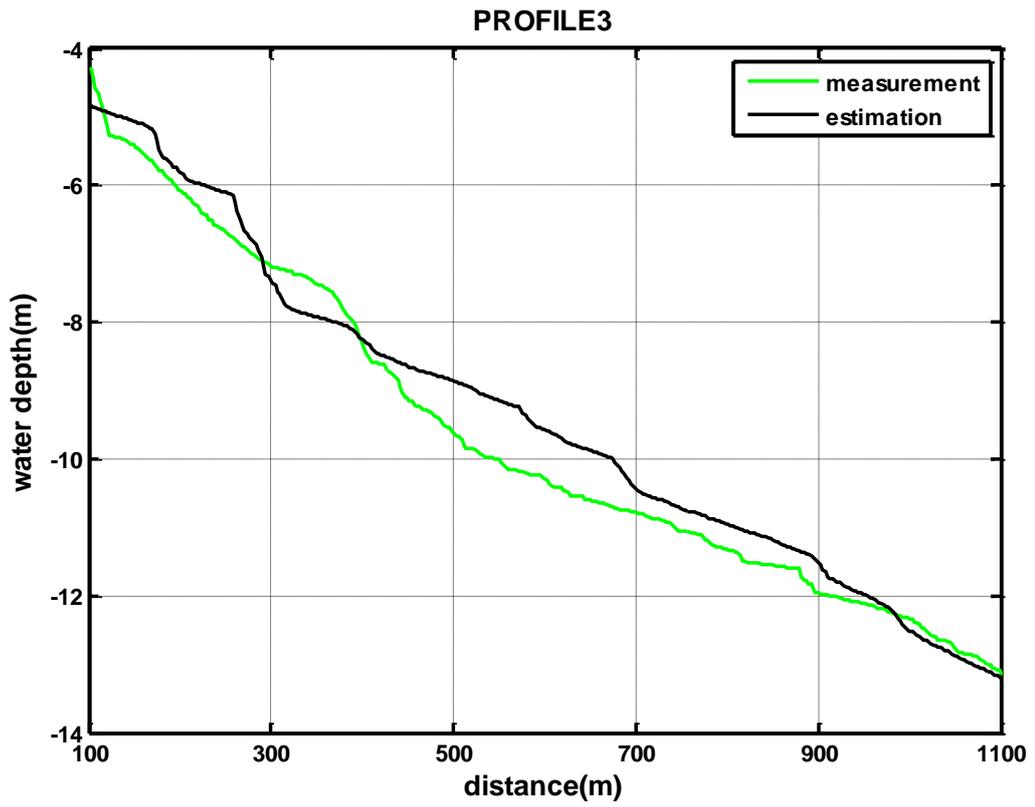


圖 4-13 如圖 4-11 的圖說明(剖面 3)

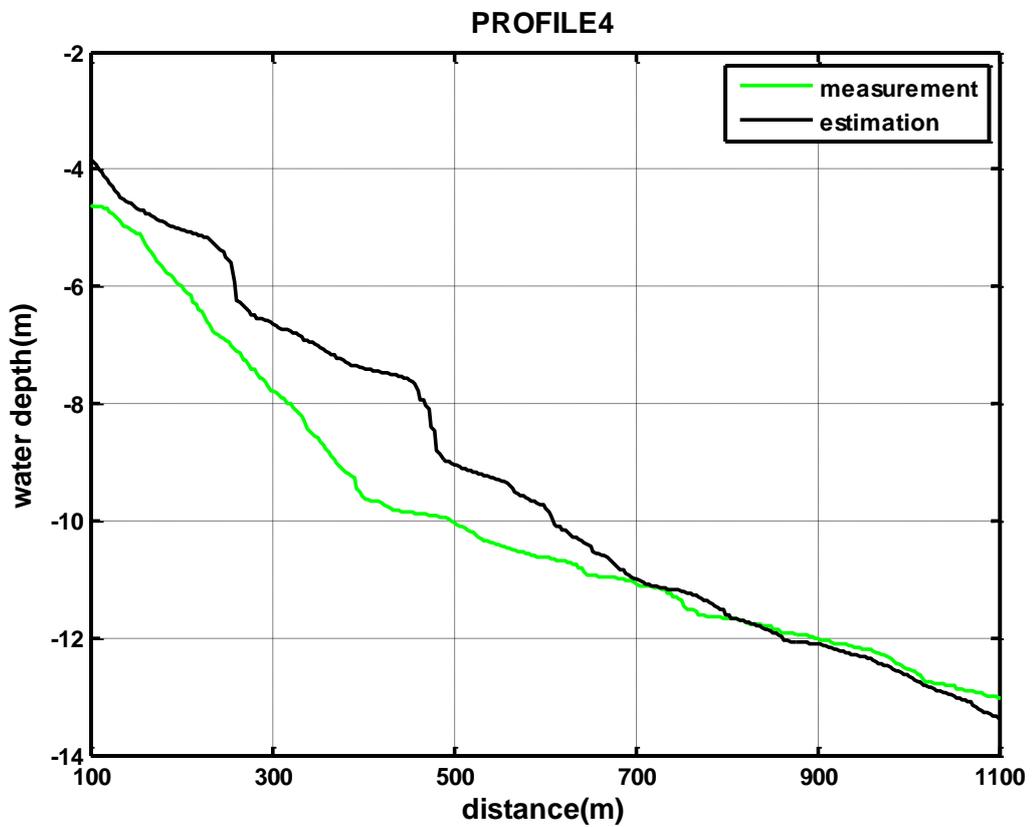


圖 4-14 如圖 4-11 的圖說明(剖面 4)

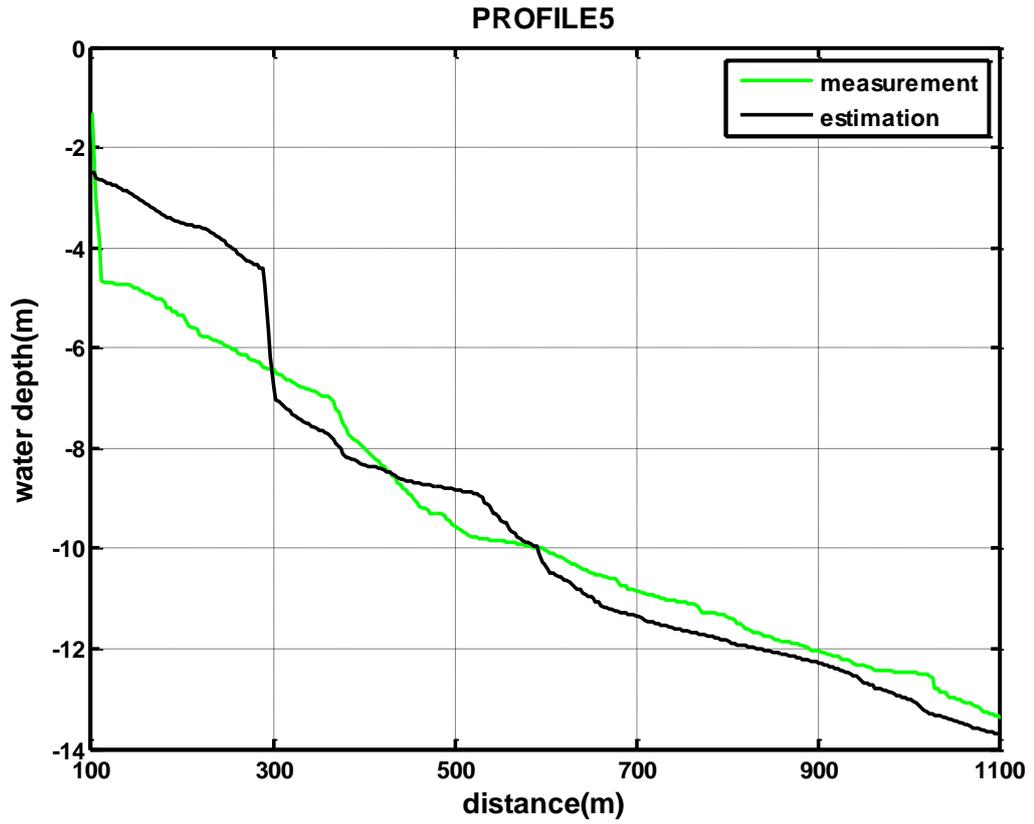


圖 4-15 如圖 4-11 的圖說明(剖面 5)

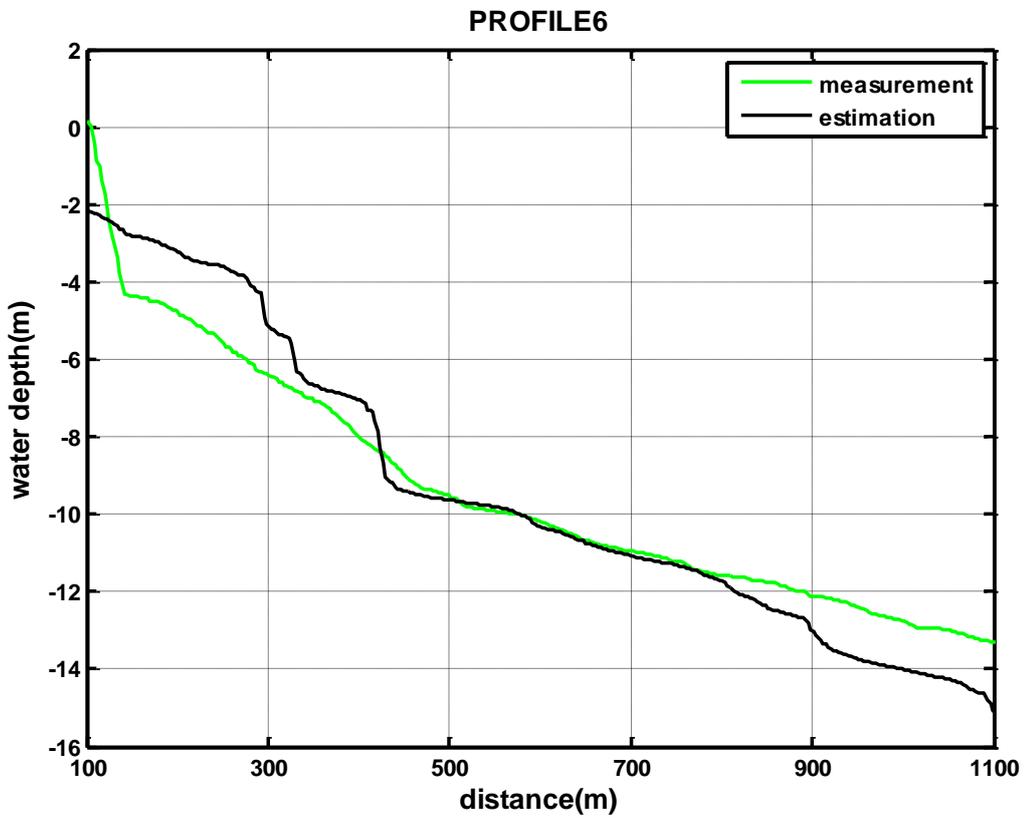


圖 4-16 如圖 4-11 的圖說明(剖面 6)

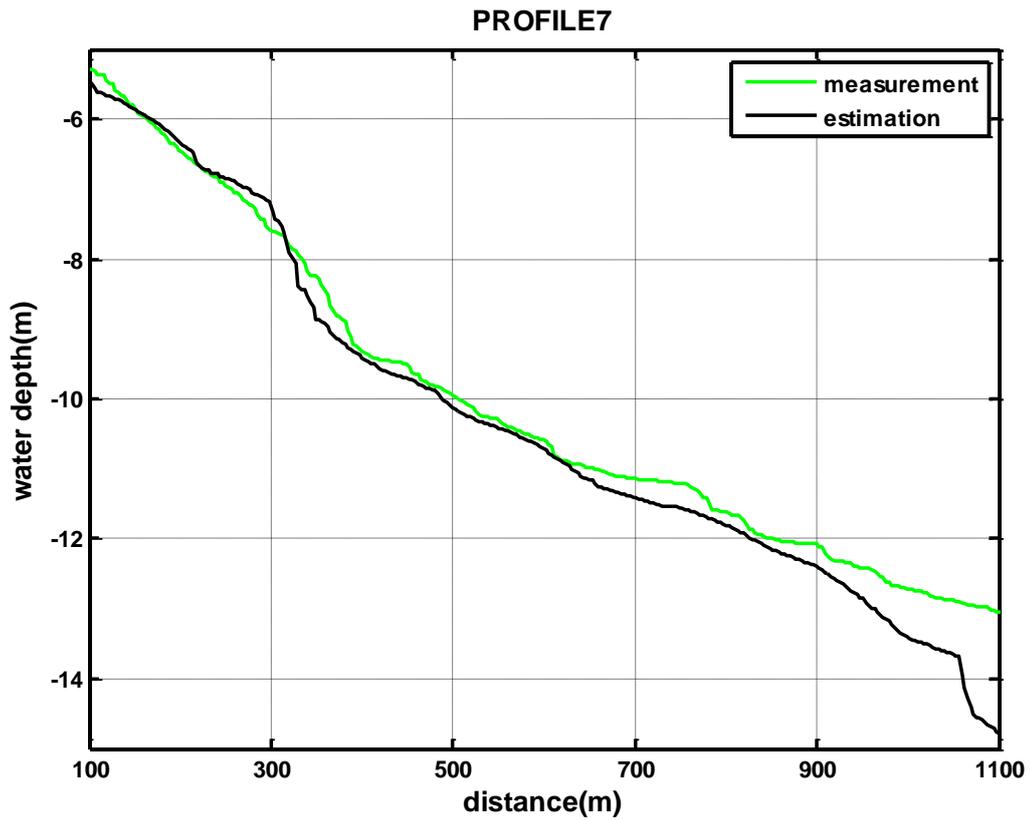


圖 4-17 如圖 4-11 的圖說明(剖面 7)

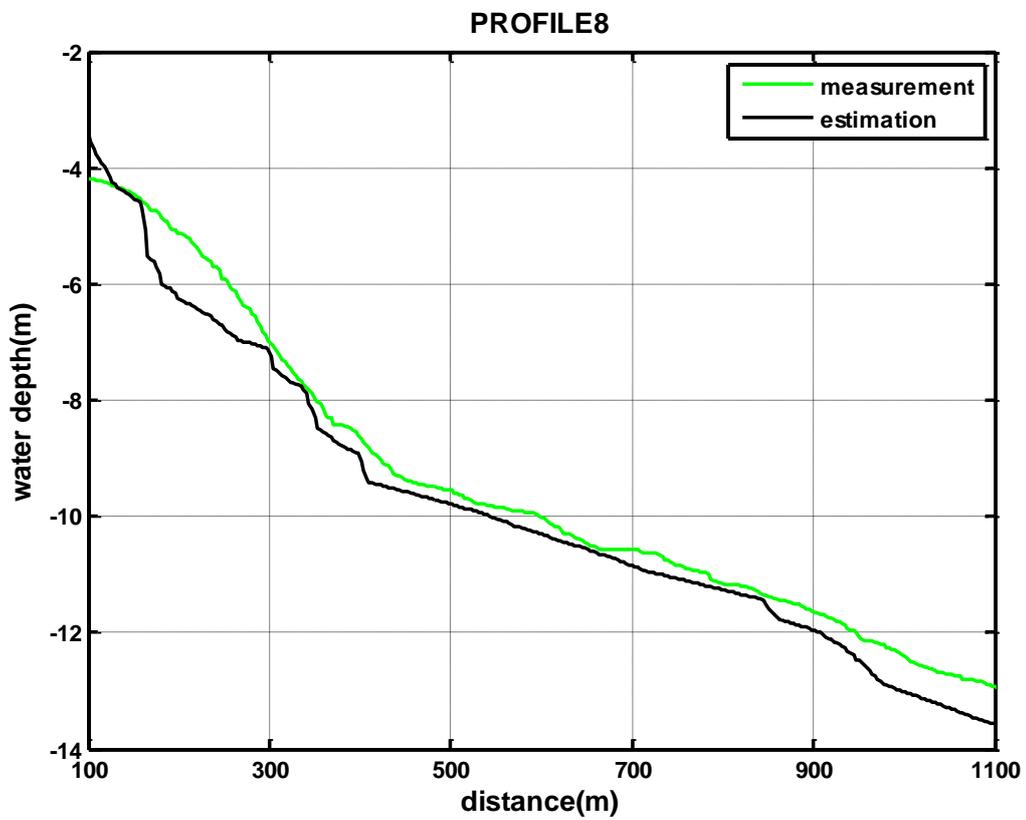


圖 4-18 如圖 4-11 的圖說明(剖面 8)

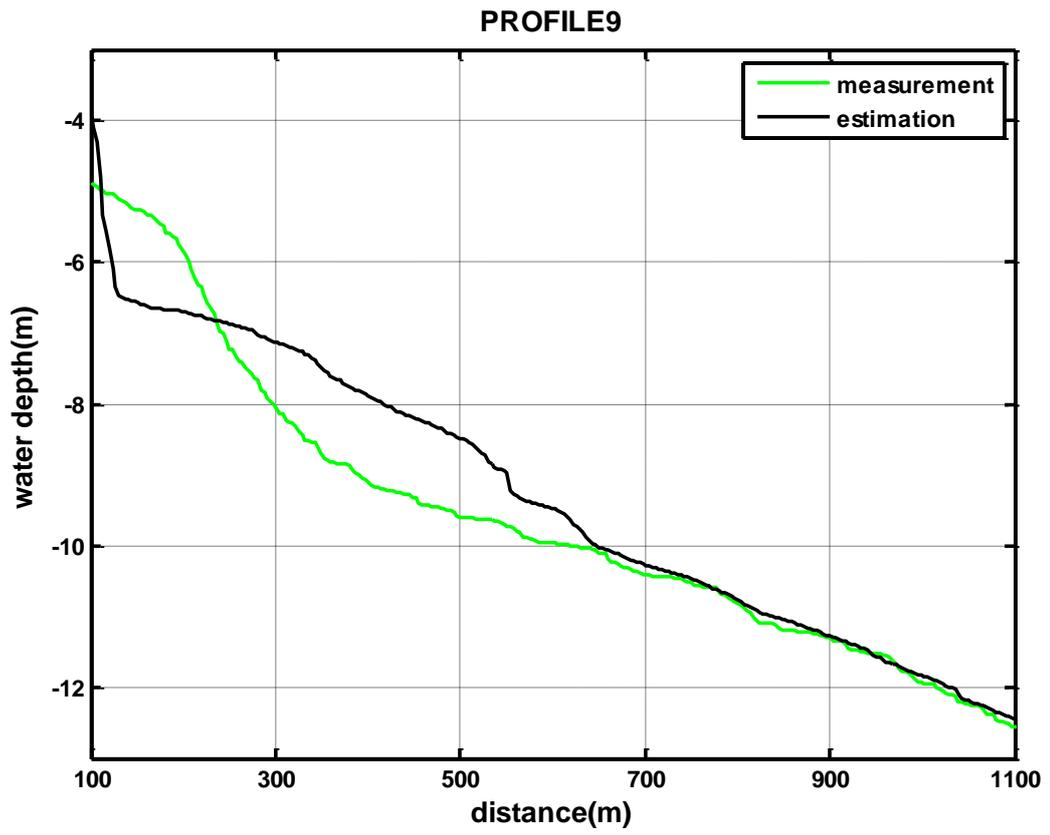


圖 4-19 如圖 4-11 的圖說明(剖面 9)



第五章結論與建議

5-1 結論

本文參考德國學者 A. Pleskachevsky 等(2011)，將快速傅立葉轉換運用於光學衛星影像來獲得波浪資料及海底地形資料。因衛星影像對比度不高，本文運用直方圖均化法來提高影像對比度，並使用 Butter Worth 高通濾波器將波浪反射或交疊所產生的細紋濾除，最後為了能夠推算近岸波長，使用常態化水指數標準差(NDWI)找出陸域範圍並將其取為海域影像資料的平均值。

首先決定起始中心點與方框大小後對此部分進行二維快速傅立葉轉換，起始方框經二維快速傅立葉轉換後計算出波長及波浪入射角，將方框沿入射角往 x 方向及 y 方向移動 1/4 倍的波長後做為第二個起始點，並依上述方法推算至近岸，每一次推算出的入射角與前一次所推算的入射角相差不大於 5° ，若大於 5° 則進行角度修正。

方框接觸到陸地後將其縮減並繼續推算，若方框中陸地面積占總面積的 1/3 時則停止計算，並移動至第二個波向推算系統。由以上所述方式即可推算出一範圍的波向線。

在龜山島繞射區部份，因地形較為曲折，故波浪在繞射區入射角度偏折大，而本文方法在修正角度時會將其修正掉，以至於無法判斷出繞射區的部份，故本文並無說明繞射部份。

本文將每個方框所計算出的波長進行內插後可繪出波長等值線圖，假設水深為平緩變化，根據波浪理論中相對水深與相對波長的對應關係，波長會隨水深變淺而變小，並藉由波浪折射理論將波長做修正。本文再以修正後的波長，根據波浪理論中的分散關係式及中央氣象局海洋浮標實測的週期資料來估算水深。

本文選取 9 個水深剖面進行精確度評估，但本方法近岸水深僅能推算

至水深-4m 處，故僅列出水深-4m 以下的部份來探討。

由原始波長所推算的水深值大部分皆低於實測水深，而經折射理論修正後推算的水深皆高於實測水深；於是本文將其取平均值做為新的估算水深，而估算結果 9 個剖面 RMSE 的平均值為 0.49m，其中剖面 4 至 6 的 RMSE 值較高，觀察後發現此區波紋線較凌亂造成波長判斷誤差，故若使此方法時，影像解析度為優先考量的重點。

由水深剖面中可看出，於-4m 至-10m 之間的估算水深較實測水深高，而-10m 至-12m 之間較為吻合，-12m 以下的情況則略低於實測水深，顯示本方法估算水深精確度的可靠性佳。

5-2 建議

本文透過遙測技術及快速傅立葉運用於影像的技術，進而由影像中的特性來推算波向及水深資料，期望能在海岸工程事前規劃上提供所需的資料。由於涉及的範圍廣泛，針對目前研究的成果提出可改進及修正的部份，以利後續研究方向，簡述如下。

1. 在影像前置處理部份，若能使用郭(2013)所使用的形態學技巧先擷取主要波紋，並將波紋連線成完整的波峰線，並重疊到原影像圖上，在做快速傅立葉轉換時更能精確的推算出波長及入射角。
2. 因快速傅立葉轉換主要是由頻譜圖中分析影像的特性，故若能取得更高解析度的影像則可提高水深辨識的精確度。
3. 可選用同一區域不同時間之多張衛星影像圖去推估水深，並由一合理的統計方法決定出此區域合理之水深。

參考文獻

1. 郭一羽(2001)，「海岸工程學」，文山書局。
2. 繆紹綱(2003)，「數位影像處理活用-Matlab」，全華科技圖書。
3. 吳哲榮、吳啟南(2003)，「遙測技術應用於臺灣西海岸五十年來變遷分析」，航測及遙測學刊，第八卷，第三期，第 95-110 頁。
4. 呂黎光(2004)，「海岸線與面積之遙感測繪應用研究」，海洋工程學刊，第四卷，第一期，第 71-88 頁。
5. 楊勤儀(2007)，「利用衛星影像萃取近岸地形-以台灣北部為例」，國立中央大學地球物理研究所，碩士論文。
6. 陳蔚瑋(2009)，「衛星影像的灘線辨識及其應用至灘線變遷之研究」，國立交通大學土木工程研究所，博士論文。
7. 吳政杰(2010)，「衛星影像灘線辨識之精確度評估研究」，國立交通大學土木工程研究所，碩士論文。
8. 張憲國、陳蔚瑋、劉勁成(2011)，「台灣海岸地區雲量分布與衛星影像可用率分析」，第三十三屆海洋工程研討會論文集，高雄，第 699-704 頁。
9. 柯紳彥(2012)，「應用衛星影像決定波向線及估算水深之初步探討」，國立交通大學土木工程研究所，碩士論文。
10. Alpers, W. and Hennings, I. (1984) A theory of the imaging mechanism of underwater bottom topography by real and synthetic aperture radar, *Journal of Geophysical Research*, 89 (C6), 10529–10546.
11. Chen, W. W. and Chang, H. K. (2009) Estimation of shoreline position and change from satellite images considering tidal variation, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 84(20), 54-60.
12. Durand, D. and Cauneau, F. (1998) Towards a new method for shallow-water monitoring using remote sensing, *Future Trends in Remote*

Sensing, 355-359.

13. Hongxing,L. (2003) Derivation of surface topography and terrain parameters from single satellite image using shape-from-shading technique, *Computers & Geosciences*, 29, 1229-1239.
14. Ingo,H.and Margitta,M.(2002)The influence of quasi resonant internal waves on the radar imaging mechanism of shallow sea bottom topography, *OceanologicaActa*, 25,87-99.
15. Kuo, Y. Y. and Leu, L. G. and Kao, Y. L. (1999) Directional spectrum analysis and statistics obtained from ERS-1 SAR wave images, *Ocean Engineering*, 26, 1125-1144.
16. Leu, L. G. and Chang, H. W.(2005)Remotely sensing in detecting the water depths and bed load of shallow waters and their changes,*Ocean Engineering*,32,1174-1198.
17. Pleskachevsky, A. and Lehner, S. (2011) Estimation of underwater topography using satellite high resolution synthetic aperture radar data, *Proceedings of 4th TerraSAR-X Meeting*, Oberpfaffenhofen, Germany.
18. Ryu, J. H., and Won, J. S. and Min, K. D. (2002) Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat: A case study in Gomso Bay, Korea, *Remote Sensing of Environment*, 83, 442-456.
19. Tripathi, N.K. andRao, A.M. (2002) Bathymetric mapping in Kakinada bay, India, using IRS-ID LISS-III data,*International Journal of Remote Sensing*, 23 (6), 1013–1025.
20. Tay,L.T.and DayaSagar,B.S.and Chuah,H.T.(2005)Derivation of terrain roughness indicators via granulometries,*International Journal of Remote Sensing*, 26 (18), 3901–3910.
21. Tuncay,K. and Abdulaziz,G. and Fevzi,K. and Mustafa,D.(2011)Automatic detection of shoreline change on coastal Ramsar wetlands of Turkey,*Ocean Engineering*, 38,1141-1149.

22. Vogelzang, J. (1992) Sea bottom topography with X-band SALR: the relation between radar imagery and bathymetry, *International Journal of Remote Sensing*, 13 (10), 1942-1958.
23. Volker,L. and Christian,H. and Randolph,K.(2006)Derivation of planetary topography using multi-image shape-from-shading, *Planetary and Space Science*, 54,661-674.
24. Walter,H.F.Smith and David,T.S. (1994)Bathymetric prediction from dense satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry,*Journal of Geophysical Research*, 99 (B11), 803–824.
25. Yijun,H. and Hui,S. and William,P.(2006)Remote sensing of ocean waves by polarimetric SAR,*Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*,23,1768-1773.

