

# Application of X-band Marine Radar on Coastal Shoreline Measurement

Laurence Z.H. Chuang<sup>1</sup>   Zih-Ting Huang<sup>2\*</sup>   Li-Chung Wu<sup>3</sup>  
Ya-Yun Cheng<sup>2</sup>   Yu-Ru Chen<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor, Department of Institute of Ocean Technology and Marine Affairs,  
National Cheng Kung University

<sup>2</sup>Master, Department of Institute of Ocean Technology and Marine Affairs, National Cheng Kung University

<sup>3</sup>Assistant Researcher, Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University

<sup>4</sup>Doctoral Student, Department of Institute of Ocean Technology and Marine Affairs,  
National Cheng Kung University

## ABSTRACT

The coast of Taiwan has undergone frequent changes. These coastal changes must be observed and investigated to understand their causes. Because changes in coastal topography often manifest as advances and retreats of shoreline positions, the measurement of shoreline positions is an important task for coastal management. The purpose of this study is to estimate shoreline positions from X-band radar echo images. Based on the principle and mechanism of radar echo signals, the time-averaged statistics of radar echo intensities can highlight the different characteristics of the sea and land. Therefore, this study proposes a set of processing procedures for the measurement of shoreline positions using X-band marine radar. The proposed technique integrates edge detection and a morphological method, which are used to determine the shoreline positions at the land-water interface. In order to assess the feasibility of the proposed method, the obtained shoreline positions are compared with those in an optical image from an unmanned aerial vehicle (UAV). It was found that the shoreline positions measured from radar images agree with those visually identified from UAV orthoimages. The advantage of coastal shoreline monitoring with X-band radar is that can provide real-time and uninterrupted observation, even in bad weather conditions. Therefore, the temporal and spatial variations of a shoreline can be automatically and continuously monitored over the long term to help authorities understand coastal changes.

**Keywords:** X-band radar, image processing and recognition, edge detection, shoreline measurement.

---

\* Corresponding author, E-mail: z10708044@email.ncku.edu.tw

## 應用 X-band 航海雷達於海岸灘線之量測

莊士賢<sup>1</sup> 黃子庭<sup>2\*</sup> 吳立中<sup>3</sup> 鄭雅云<sup>2</sup> 陳禹儒<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學海洋科技與事務研究所副教授

<sup>2</sup> 國立成功大學海洋科技與事務研究所碩士生

<sup>3</sup> 國立成功大學近海水文中心助理研究員

<sup>4</sup> 國立成功大學海洋科技與事務研究所博士生

### 摘 要

海岸變遷現象目前已普遍發生在臺灣的海岸地區，要瞭解海岸變遷的原因，先要觀察與掌握海岸變化的狀況，以避免導致錯誤決策。由於海岸地形侵淤的變化常明顯表現在海岸灘線位置的前進與後退，因此灘線位置的量測便顯得重要。本研究之目的是要利用 X-band 雷達回波影像來測量灘線位置，根據雷達回波的原理與機制，以雷達回波強度之時間平均統計值可以突顯出海面與陸地所呈現之不同回波訊號特性，因此本文提出一套利用 X-band 雷達進行灘線位置量測之處理程序，透過邊緣偵測及形態學方法之技術整合，來判別水陸交界線之灘線位置。為證實雷達應用於海岸灘線測繪之可行性，本研究利用無人飛行載具(unmanned aerial vehicle, UAV)拍攝之光學影像與之比較，可發現雷達影像所量測的灘線位置與光學影像中目測辨識的灘線位置相近。以 X-band 雷達進行海岸灘線監測之優勢是能進行即時且連續地觀測，即使在天候不佳的狀況下，也能提供遠端監控服務，因此能夠長期、持續地自動監測海岸灘線之時空變化，以協助權責單位掌握海岸變遷的現況。

**關鍵詞：**X-band 雷達、影像處理與辨識、邊緣偵測、灘線量測。

---

\*通訊作者 E-mail: z10708044@email.ncku.edu.tw

## 一、前言

海岸位處海洋、陸地、及大氣三種不同介質的交界，交界面上之交互作用相當密集而複雜，是一個非常動態、敏感的環境。近年來全球暖化問題導致極端天氣型態出現之頻率與強度增加，同時暖化效應帶來海水面上升(IPCC, 2007)，勢必會增加海岸地區的環境災害，進而影響到海岸地區居民的生命財產安全，同時此區域具有脆弱與敏感的特性，一經破壞後便難以恢復。

海岸變遷現象目前已普遍且頻繁地發生在臺灣各個海岸地區，為了能提升海岸安全保護，以及達到海岸永續發展的目標，海岸帶地區的綜合管理(Integrated coastal zone management, ICZM)和有效利用是迫切的施政方針。然而其前提是要觀察與掌握海岸變化的狀況，才能確實瞭解海岸變遷的原因，以避免導致錯誤決策。由於海岸地形侵淤的變化，不論是短期的變動，或是中、長期的變遷，常明顯表現在海岸灘線位置的前進與後退，因此可透過偵測灘線位置來瞭解海岸狀況及變化趨勢。灘線(shoreline)在往昔研究中，一般被定義為「海水和陸地的交界線」(Graham et al., 2003；Gens, 2010)，會隨著不同季節、時間、與波浪、潮汐和氣象因素的影響而有不同的變化(Morton & Speed, 1998)，具有高度的天然變動性(natural variability)。

早期量測灘線的方式主要是以人工利用 GPS 定位進行現場量測，此方式雖然可以獲得極為精準的灘線資訊，但由於需要耗費大量的人力與時間，無法有效進行大範圍的調查。受到潮汐變化的影響，灘線的偵測會受到時效性的限制；且波浪在短時間內溯升高度的持續變動又會影響人為判斷灘線的位置。近年來隨著遙測科技的進步，以遙測技術為基礎的海岸灘線偵測技術陸續被提出，這些監測技術都具有不同的優缺點與限制。例如：航空測量可觀測大範圍面積，缺點是費用昂貴且出航須配合天氣狀況，無法長時間取得定點即時資料；衛星遙測可進行大型空間尺度範圍之偵測，尤其合成孔徑雷達(synthetic aperture radar, SAR)相較其他光學儀器更擁有不受日照及天氣影響的優點，可定時接收影像以達到密集性監測。然而由於軌道運行之特性，要透過衛星對相同的區域進行連續觀測，必須考慮到衛星的再訪率，一般非同步衛星(asynchronous satellite)之再訪率較長，無法針對同一空間的相同潮時或連續時間獲取所需之資料，因此不易達到作業化灘線連續監測之目的。

動態影像判別灘線之技術在 1990 年代已漸受重視與發展，此方面的技術由奧勒岡州立大學海岸影像研究團隊開創後，將其 Argus 影像觀測系統推動至世界各地，由歐盟提供資金的跨國性海岸監測計畫 CoastView Project 即利用此方法對不同國家的幾個重要海灘進行研究，並應用

於海岸管理方面。於海岸固定處設置攝影機的觀測方法雖然可以長時間取得定點的即時影像，且可見光影像相對易於辨識，對瞭解海岸狀況有很大的幫助，但缺點是攝影機會受到天氣狀況及日夜的影響，且觀測範圍有限。無人飛行載具則是具有高機動性、可於低空雲下作業的特性，並兼具低成本之優點，缺點是同樣會受到天氣狀況及日夜的影響，且其續航力有限，導致連續觀測時間不長，故無法觀測大範圍面積。

為了解決上述不同觀測方式的缺點，本研究選擇以岸基 X-band 雷達作為海岸變遷的監測手段。X-band 雷達的波段適合在近岸範圍內進行高解析度的連續性觀測，Young et al. (1985)指出航海用 X-band 雷達回波資訊當中不但可偵測障礙物，還可從中獲取時空合域的海面特徵資訊，確立了 X-band 雷達應用於海洋參數觀測的可行性。此外，Seemann et al. (1997)及 Borge & Soares (2000)則將連續性的雷達資料經由影像分析技術及相關計算來求得研究區域的流場及波浪場變化。Wu et al. (2011)則針對近岸海面雷達影像所呈現的非均勻波、流特徵進行研究與探討。

近年來利用 X-band 雷達進行海岸地區灘線偵測之研究亦陸續被提出，如 Takewaka (2005)即採用 X-band 雷達之時間平均影像(time-averaged image)來判別灘線位置，再由測波儀(wave gauge)量測

灘線處的海平面高程，以不同潮位時的灘線位置及其對應之高程變化來推算潮間帶坡度。Bell et al. (2016)則是提出不同於從影像在空間域上之特徵量測水線之方法，而是利用 X-band 雷達在時間域上之潮汐乾濕模式的轉變與雷達像素強度兩個參數之間達最佳匹配之方法，來進行水線偵測，藉由該方法能夠決定相對於潮汐水位的高程，且適用於數月至數年長時間自動監測大型潮間帶區域之變化。國內相關研究則有 Chien et al. (2012)利用微波雷達監測灘線位置，其方法是根據雷達電磁波對海面及陸地之不同的回波機制與特性，以標準偏差的方式來區分海面與沙灘，由雷達回波標準偏差影像經過高反差處理、雜訊過濾、及 Canny 邊緣化處理取得灘線位置；而為確認雷達量測灘線之可行性及精確性，亦利用即時動態差分定位測量(DGPS-RTK)及 CCD 影像觀測方式量測灘線並與之比較暨探討誤差特性，且此方法結合水位資料後，能夠進一步取得潮間帶地形變化。

由於海岸線變化較劇的狀況常發生在惡劣海況條件下，這時候往往氣候條件也不佳，因而限制傳統調查技術之運用，而無法即時取得海岸改變後的最新灘線資訊。因 X-band 雷達具有機動、即時、涵蓋大範圍、日夜均可觀測，且較不受天氣影響的優點，可於定點針對固定空間進行全天候觀測，能夠即時和長時間連續性地取得海岸灘線之時空變化，因此本研究嘗試在岸邊架設 X-band 雷達進行海岸監

測，並參考前人之研究，利用雷達回波強度之時間平均統計值，將海面與陸地之不同回波特徵突顯出來。本文則聚焦於針對雷達應用於海岸灘線位置判別的觀測技術與影像分析方法進行探討，經由適當的影像處理方法，從中求得觀測區域之灘線位置，以協助權責單位掌握海岸變遷現況，使有效地進行海岸地區的防治及永續發展工作。

## 二、研究方法

### 2.1 X-band 雷達系統與量測機制

鑑於航海用 X-band 雷達具有連續偵測海洋環境參數之時空變化的能力，在岸邊架設 X-band 雷達設備進行海面特徵觀測成為近年來常見的遙測方式之一。此外，X-band 雷達監測是透過雷達天線主動發送電磁波，再接收周遭的電磁回波訊號，由於電磁波的傳遞速度可視為恆定，因此其所測得之影像已可視為正射影像，相較於光學影像資訊，雷達測得之回波影像已無需再進行幾何校正，可直接用於量測影像中任意位置點之間的實際距離，是一項極具發展潛力的海岸環境監測技術。

X-band 電磁波的頻率介於 8 GHz 到 12 GHz 之間，對應的電磁波長為 2.5 cm 至 3.75 cm，在電磁波譜中屬於微波。以往 X-band 雷達大多是作為船艦航行安全之用，雷達天線會主動發射電磁波投向指定空間，經陸地、水體、或物體之表面而產生反射，將擷獲的回波訊號進行分析，

可以辨識陸地、島嶼、或航行載具等相關資訊，也可由反射表面的回波特徵推估植被、表面流場、或波況等資訊。X-band 雷達具有可於近岸範圍進行高解析度連續觀測的能力，只要提供穩定電力即可持續不間斷地對海域空間進行大範圍觀測，可獲得整合時間(一維度)與空間(二維度)之三維度觀測資訊。

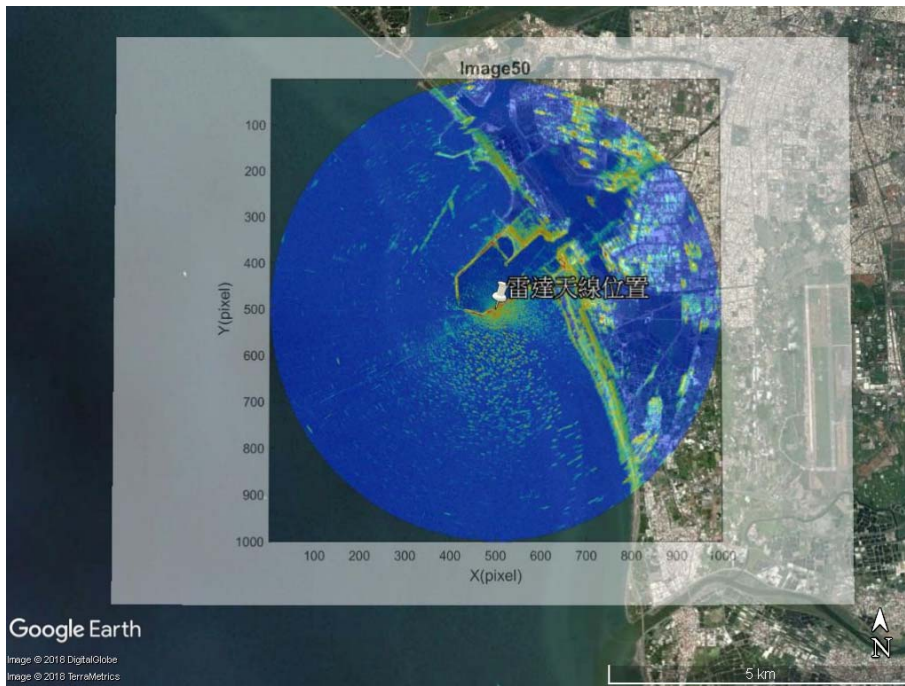
本研究選定台南安平商港南側之沙灘為研究區域，雷達系統設置於安平商港南堤靠近堤頭的轉折處(見圖 1)，並往沙灘方向進行掃描取得雷達回波影像。每次觀測期間雷達會擷取 128 張連續回波影像時序列，觀測所需時間與航海雷達天線轉速有關，本研究採用的雷達天線轉速為 42 rpm，可得知雷達系統約每 1.43 秒可獲取一張雷達影像，因此擷取 128 張連續海面回波影像所需時間約 3 分鐘，雷達回波影像之空間解析度為 7.5 m/pixel。

### 2.2 雷達回波影像座標校正

由雷達回波訊號時序列中，每一脈衝波代表著空間中雷達天線所指向的每一個方位角(azimuth)，而相鄰脈衝波之間的訊號則代表著在空間中某一方位上，距離雷達不同遠近之位置所返回的回波強度。這些雷達訊號是以極座標系統之雷達回波原始影像呈現，如圖 2 所示，這是本研究於 2017 年 5 月 12 日在安平商港調查期間獲得之原始雷達回波影像。

由於後續的影像分析方法是建構在卡氏座標的架構下，本研究依照雷達天線在每一個方位角度之射線上所對應的雷達探測範圍內，不同距離之元素位置所返

回的雷達回波強度，利用座標轉換以及空間線性內插的方法，將原始極座標的雷達影像轉換成以卡氏座標所建構出的影像矩陣(如圖 3)。



底圖來源：Google Earth

圖 1 雷達觀測系統架設於台南安平商港南堤

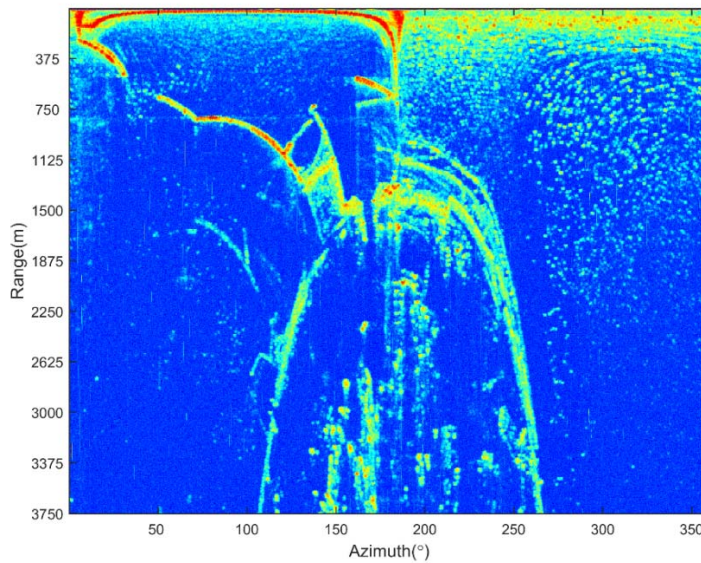


圖 2 安平商港以極座標系統呈現之雷達回波影像



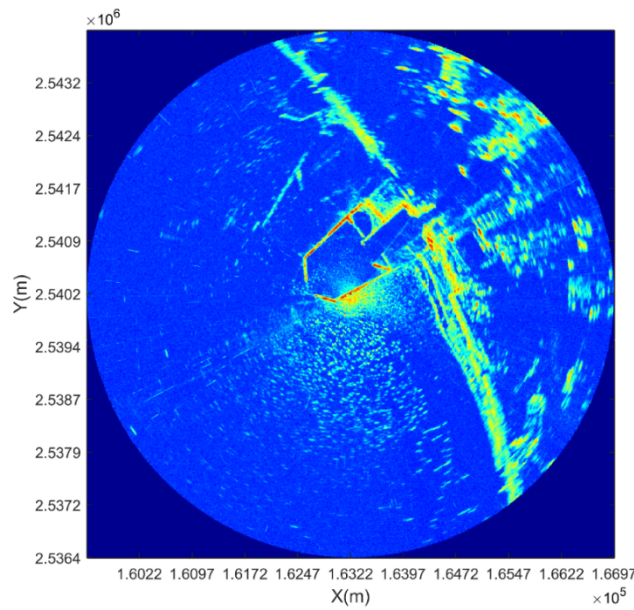


圖 3 安平商港以地理座標系統顯示之雷達回波影像

### 2.3 雷達回波影像之灘線量測方法

本研究之目的是希望利用岸基 X-band 雷達來量測灘線位置，依據電磁回波理論，陸地的電磁回波會明顯較海水面大(Long, 2001)，因此若能夠根據海陸所呈現之不同回波訊號特性，便可藉由雷達回波影像的分析判別水陸交界線之灘線位置。圖 4 為本研究利用 X-band 雷達偵測海岸灘線之處理程序，雷達測得之海岸地區回波影像是偵測灘線之依據。圖中左半部步驟是描述雷達系統之基本組成中的觸發電路每隔一段時間會產生作用時間很短之觸發脈衝，並送至雷達發射機，發射機在觸發脈衝控制下產生具有固定寬度之脈衝訊號，並將訊號送至雷達天線，天線再將脈衝之能量匯集成束朝一方向發射脈衝波；在相鄰兩脈衝波發射時間

內，天線則接收脈衝波經由外在環境反射所得到之回波，透過訊號擷取設備將原始雷達類比訊號轉換成數位訊號，最後使用電腦軟體來分析訊號中所含有的資訊。

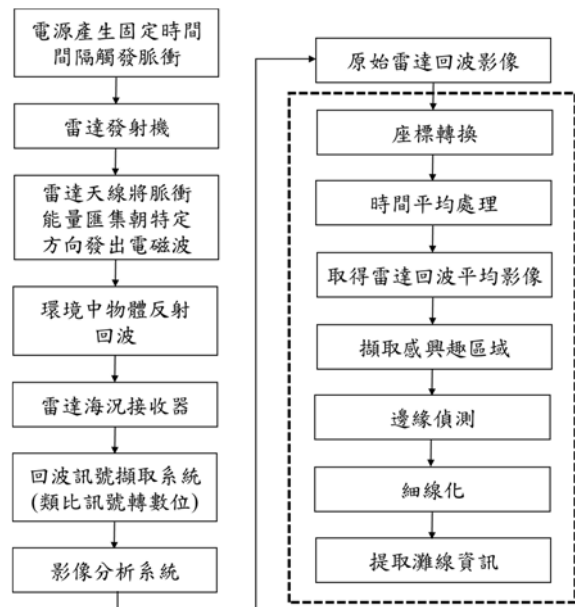


圖 4 X-band 雷達系統應用於海岸灘線辨識之分析流程

圖 4 右半部步驟為本文分析 X-band 雷達回波影像以辨識出海岸灘線資訊的影像處理流程，先將原始雷達回波影像經由座標轉換及時間平均的處理，得到雷達回波平均影像，再依序透過擷取感興趣區域、邊緣偵測及細線化之處理，可從雷達回波平均影像中提取出灘線位置。

針對海岸地區之雷達影像序列所呈現的海岸特徵，可將其分類為三類：第一類為在短時間(數秒鐘到數分鐘)內就會移動的特徵(如：海面波紋、移動中的船艦回波等)；第二類為需要較長的時間(數分鐘到數小時)才能偵測到其移動的特徵(如：海岸灘線、蚵架、及油污等)；第三類是幾乎長時間恆定不動的特徵(如：港口防波堤、岸邊結構物等回波)。由於動態目標會干擾本文所要研究的海岸灘線之回波，因此利用時間平均的方式可針對不同類型的影像特徵進行篩選。本研究採用 128 張回波影像來進行時間平均，可將短時間內就會移動之第一類回波特徵濾除，使後續程序能更有效地提取出灘線資訊，結果如圖 5 所示，顯示此一影像經由時間上之濾波處理程序可有效地將圖 3 之風湧浪造成的波紋特徵濾除，使灘線附近之回波特徵較圖 3 的結果更為明顯。

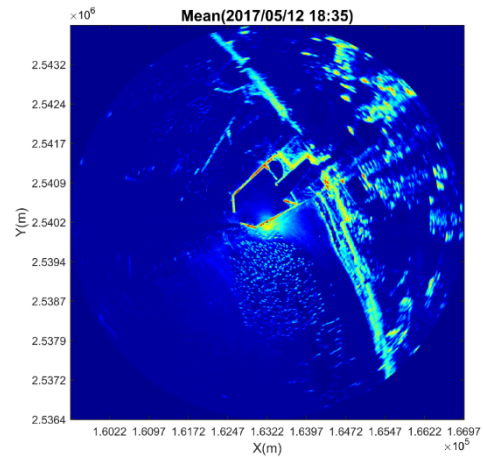


圖 5 安平商港之雷達回波平均影像，觀測時間為 2017 年 5 月 12 日 18:35

## 2.4 邊緣偵測技術應用於灘線辨識

為界定出灘線位置，本文進一步以影像特徵邊緣偵測(edge detection)演算法來辨識陸地與海面交接的邊界，影像邊緣檢測的數學方法是利用回波影像強度的梯度值(gradient)變化來找出回波影像強度值有劇烈變化或是有突然改變的邊界位置，包括一階梯度值和二階梯度值都是判斷影像邊界的重要工具，因此可透過邊緣偵測演算方法，藉以協助界定出水陸交界之灘線位置。

本研究選擇 Canny 演算法做邊緣偵測，Canny 邊緣偵測演算法是由 John Canny 於 1986 年所開發，它是一個具有濾波、增強、及檢測的多階段之優化運算子(Canny, 1986)，可以說是現階段在邊緣偵測技術中效果最好且經常被使用的一種邊緣偵測方法。傳統的邊緣偵測方法主要是對  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、及  $270^\circ$  的像素變化量來作偵測，卻忽略了其它角度間的變化



量，且傳統的邊緣偵測方法所偵測出來的邊緣寬度會較寬。Canny 演算法經由一個特定標準差的高斯濾波來消除影像中的雜訊，使用遮罩檢測垂直、水平、及斜角方向的邊緣，找尋影像中梯度變化量及方向來判定是否為邊界，再進行邊緣線追蹤來消除雜訊所造成的假邊緣之現象，其追蹤主要是利用兩個門檻值來判斷此像素是否為邊緣，改善了傳統邊緣偵測方法之缺點。

由於利用邊緣偵測方法提取灘線的時候，有時會使影像邊緣位置擴大，且可能包含過多不必要的資訊，以至於增加計算上的繁雜性，因此數學形態學中的細線化之程序時常被採用，來消除一些多餘的資料，此方法是根據像素點與鄰近像素的關係來決定一個像素是否去除或保留，並以迭代方式一層一層刪除物件邊界之像素，最後保留中心的骨架(skeleton)。在細化過程當中最重要就是要保持原來圖形的連接性，才不會破壞整個物體的原本結構(Lin, 2007)。本文應用邊緣偵測方法萃取出灘線後，將會進一步作細線化處理，使辨識出的灘線最後細化到只剩一個像素的寬度。

### 三、結果與討論

#### 3.1 雷達回波平均影像辨識灘線之結果

以 2018 年 3 月 23 日於台南安平商港進行雷達連續觀測為例，雷達系統每次

啟動會進行連續 128 張回波影像資料的擷取，將這 128 張隨時間變化的雷達回波影像進行時間平均，取得每次觀測 3 分鐘 ( $\approx 1.43$  秒/張 \* 128 張)的雷達回波平均影像(圖 6)。為了方便研究者更清楚判斷回波強弱的差異性，本研究將雷達回波強度值進行標準化處理，以強調相對的強弱度，圖 6 中的 colorbar 即為標準化之雷達回波強度值，其數值範圍在 0 至 1 之間。

接著從影像中擷取出一塊感興趣區域(圖 6 之紅框區域)來放大檢視安平商港南側沙灘區域(圖 7)。圖中回波強度較強的地方為柏油路、沙灘上的海濱植物、與濕沙所組成，濕沙的右側有幾處回波強度很大的地方，為堆放於沙灘上的蚵架所造成的回波。此外，海面上之回波強度較弱，位於海面與海濱植物之間回波訊號較弱的區域則為沙灘的位置，此處所指的沙灘為乾沙。造成濕沙與乾沙的回波強度不同的原因，推測可能是由於濕沙表面覆蓋了海水，因雷達電磁波的反射量會受到目標物之截面積與材質特性所影響，不同的目標物材質具有不同的介電係數，介電係數越高，則此目標物的回波強度就越強。影響介電係數的主因為目標物的含水量，一般乾沙的介電係數約為 3 到 6 之間，由於海水的介電係數高達 80，相同物質若含水量越高，介電係數則越大，這也是造成濕沙的介電係數比乾沙高之原因，其介電係數約為 20 至 30 之間(Hubbard et al., 1997)。因此從雷達影像中可明顯發現濕沙的回波強度會較乾沙為高。

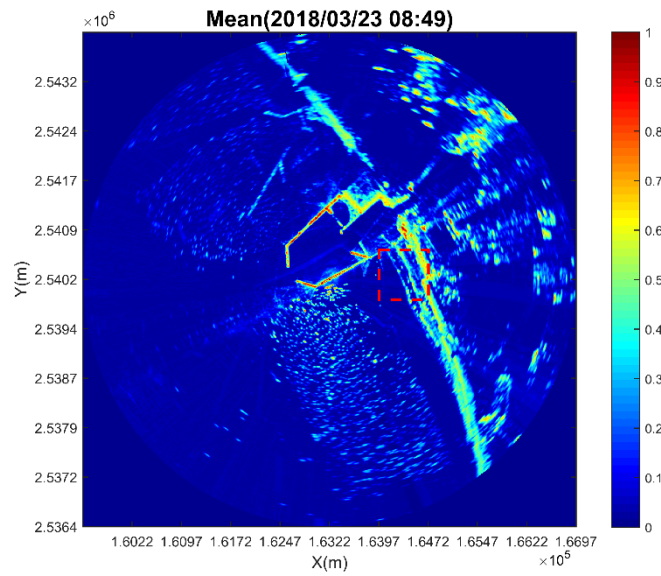


圖 6 安平商港之雷達回波平均影像，觀測時間為 2018 年 3 月 23 日 08:49  
(紅框範圍為安平商港南側沙灘，為本文研究區域)

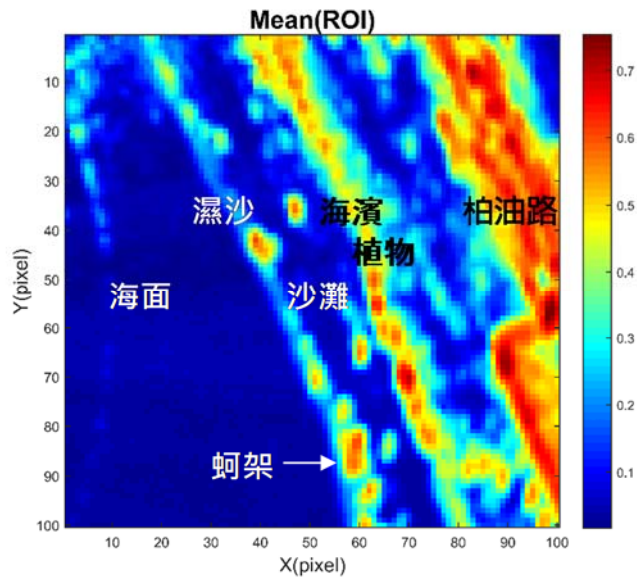


圖 7 安平商港南側沙灘之雷達回波平均影像，觀測時間為2018年3月23日08:49

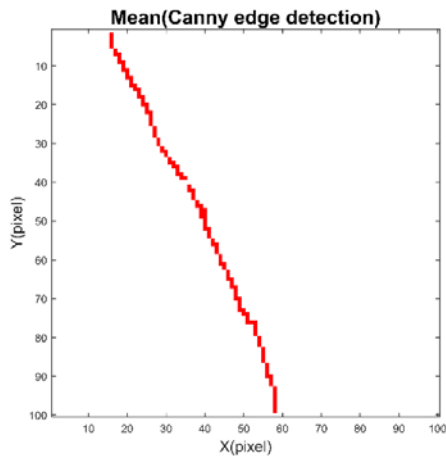
擷取感興趣區域後，便可針對安平商港南側沙灘區域進行邊緣偵測，以提取出陸地濕沙處與海面交接之邊界，即為灘線的位置。此一過程在嘗試許多不同的邊緣

偵測方法後，發現 Canny 演算法之邊緣偵測結果為最佳，故本文採用 Canny 演算法來進行邊緣偵測。進一步去除非目標物之雜訊後，可辨識出如圖 8(a)的灘線位置，最後再以形態學之細線化處理使灘線

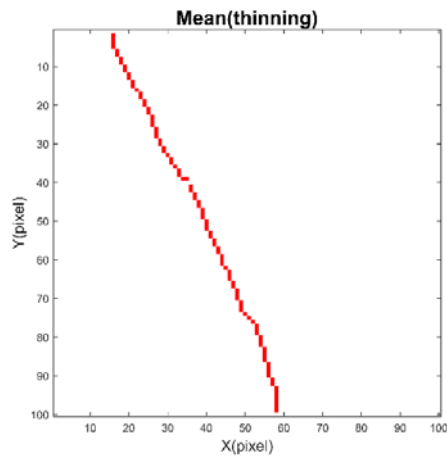
細化，結果如圖 8(b)所示。由圖 8 可發現，2018 年 3 月 23 日之灘線偵測結果有邊緣不連續的現象。

將辨識出的灘線(圖 8(b))與原先的雷達回波平均影像(圖 7)套疊，結果如圖 9 所示。從此一案例的分析中，顯示本研究

所提之方法能夠成功辨識出濕沙與海面交界處之灘線位置，但在濕沙回波強度較弱處或濕沙與周圍強度值很接近時會出現邊緣斷裂的現象。後續會針對上述分析結果進一步與雷達單張影像之分析結果及光學影像進行比對驗證。



(a) Canny 邊緣偵測之結果



(b) 將圖(a)經細線化處理之結果

圖 8 2018 年 3 月 23 日 08:49 雷達回波平均影像：(a)進行 Canny 邊緣化處理後之結果；(b)Canny 邊緣偵測後經細線化處理後之灘線

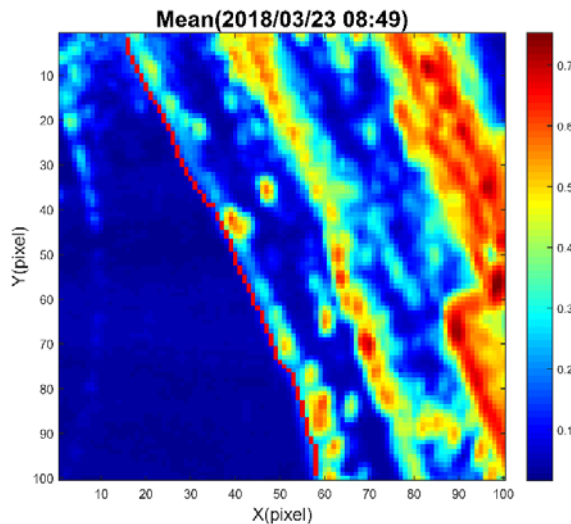


圖 9 雷達量測之灘線與雷達回波平均影像套疊結果，觀測時間為 2018 年 3 月 23 日 08:49

### 3.2 雷達回波單張影像與雷達回波平均影像測量灘線之比較

為證明上述雷達回波平均影像所辨識之灘線為 128 張連續回波影像時序列(約 3 分鐘)內的平均水線,本文以 2018 年 3 月 23 日 08:49 時之雷達回波影像序列中的單張影像來進行確認。從安平商港南側沙灘區域之單張影像中取出三條垂直海岸線的橫斷面,分別為  $y=25$ 、 $50$ 、與  $70$  pixel 處,並以雷達回波影像序列中的第 90 張之回波影像為例,觀察橫斷面上之回波強度與其梯度值的變化情形,如圖 10、圖 11、及圖 12 所示。例如:圖 10 之上圖是 2018 年 3 月 23 日 08:49 時之 3 分鐘影像序列的第 90 張影像,擷取其中位於  $y=25$  pixel 處的水平橫斷面(圖中紅線),可以求得該斷面上不同離岸距離(像素位置)處的回波強度值與回波強度之梯度值的變化情形。圖 10 之下圖的橫軸為距離海上基線不同位置處的像素點,藍色虛線為各距離處之回波強度值,綠色實線則為各距離處回波強度之梯度值,黑線則是由 128 張連續回波影像序列之雷達回波平均影像經圖 4 虛線方框內之影像處理流程所辨識出來的灘線位置。

從圖 10、圖 11、及圖 12 的三條橫斷面上( $y=25$ 、 $50$ 、與  $70$  pixel 處)的各距離

處之回波強度變化(圖 10、圖 11、及圖 12 之下圖的藍色虛線),可發現三條橫斷面上分別於  $x=28$ 、 $42$ 、及  $51$  pixel 處的回波強度值會出現峰值,峰值左側(即向海一側)的回波強度之梯度值最大的地方則是我們判斷為濕沙與海面交界處之灘線位置。前述回波強度峰值會出現在瞬時灘線右側(即向陸一側),可能是先前波浪溯升時,將水裡較大粒徑砂石、雜質、或垃圾堆置在濕沙區域所造成。此峰值處之右側的回波強度會漸弱,降至波谷處的強度值都是小於  $0.2$ ,且在時間上的強度值變化不大,此區域應是乾沙區域;峰值左側之回波強度較弱區域則為海面之回波訊號。

由圖 10 可發現第 90 張影像中回波強度之梯度值峰值處與雷達回波平均影像量測之灘線位置一致。圖 11 為回波影像時序列中的第 90 張影像在  $y=50$  pixel 處的水平橫斷面的回波強度值與回波強度之梯度值的變化情形,顯示第 90 張影像中的梯度值峰值處則是與平均影像量測之灘線位置相差一個像素。圖 12 為回波影像時序列中的第 90 張影像在  $y=70$  pixel 處的水平橫斷面的回波強度值與回波強度之梯度值的變化情形,可得知第 90 張影像中回波強度之梯度值峰值處與雷達回波平均影像量測之灘線位置一致。

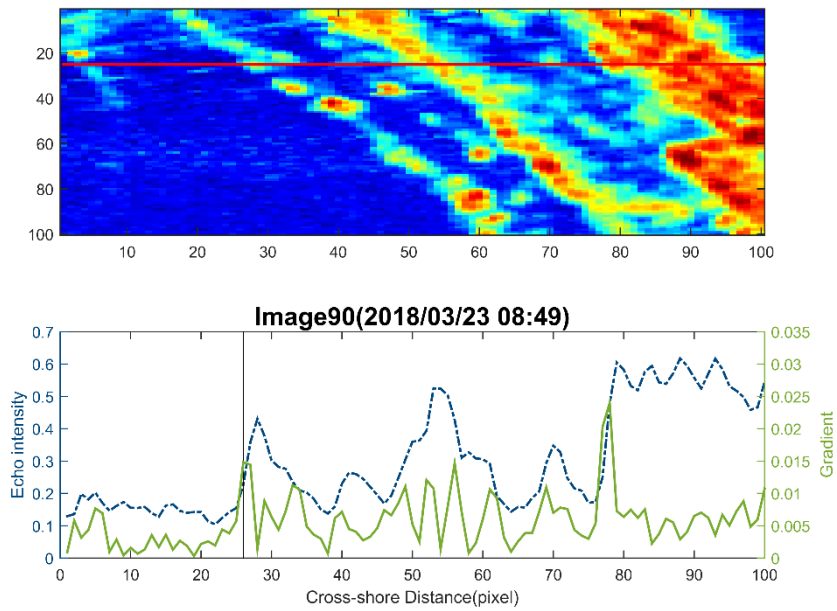


圖 10 雷達回波影像序列中第 90 張影像與其橫斷面( $y=25$  pixel 處)的回波強度及其梯度值之變化

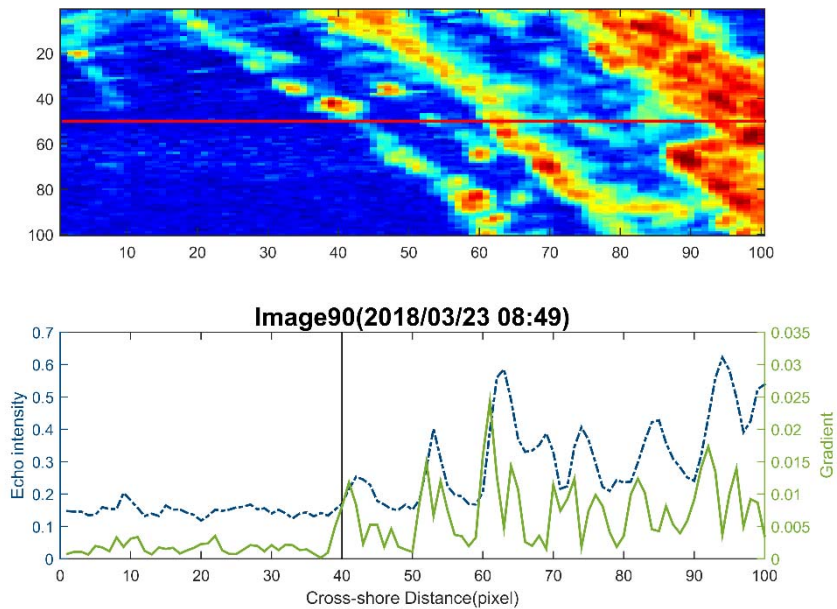


圖 11 雷達回波影像序列中第 90 張影像與其橫斷面( $y=50$  pixel 處)的回波強度及其梯度值之變化



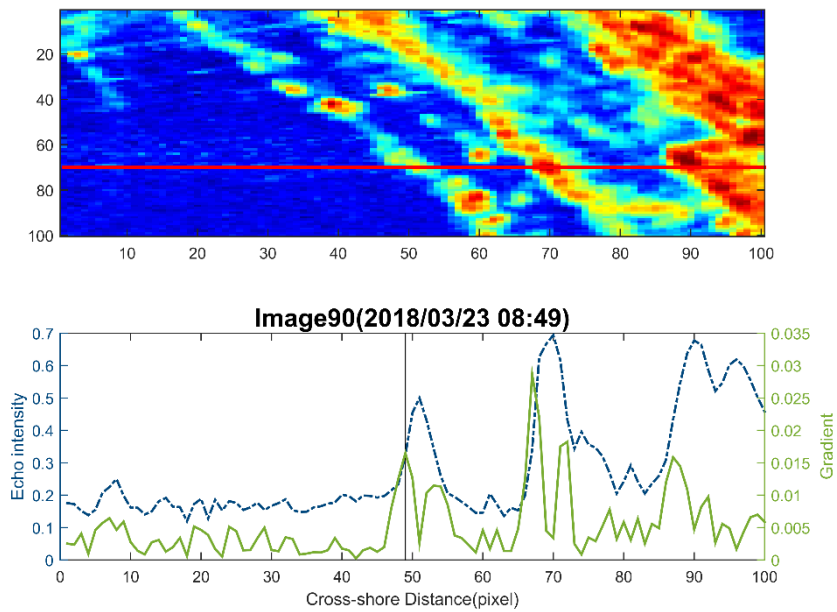


圖 12 雷達回波影像序列中第 90 張影像與其橫斷面( $y = 70$  pixel 處)的回波強度及其梯度值之變化

綜整不同橫斷面上所呈現之結果，可發現從雷達回波影像序列中的單張影像判別之灘線與雷達回波平均影像量測之灘線位置，其結果為呈現一致或相差一個像素。而相差一個像素的情形皆為平均影像辨識的灘線位置在單張影像橫斷面上回波強度之梯度值峰值的左側。然在更多斷面的分析結果(本文省略)顯示，相差一個像素的情況也有可能發生在右側，其原因在於單張影像的不同斷面處之灘線可能會隨著海水的進退而隨機發生在平均影像量測之灘線的左側或右側。由於本研究採用的雷達系統的空間解析度為 7.5 公尺/pixel，因此在一般海況條件下，本測試海灘的瞬時灘線與平均灘線大多為相距一個像素左右。

為進一步確認雷達回波平均影像所偵測之灘線是否為 128 張連續回波影像序列中的平均灘線，本文選取與圖 6 之紅框區域同樣範圍的感興趣區域，針對此區域內的每個橫斷面在 128 張回波影像中所分別偵測出來的灘線位置進行平均，得到每一個橫斷面之灘線在 3 分鐘回波影像序列中的平均位置，再與雷達回波平均影像所得到的灘線位置套疊進行比較，其套疊結果如圖 13 所示。圖中紅線為利用本文圖 4 流程所辨識出的灘線結果；藍線則是應用本小節方法，從 128 張連續回波影像序列中之每張影像，分別取 100 條垂直於海岸線之橫斷面所辨識出的各瞬時灘線位置(濕沙左側之回波強度梯度值最大處)，再分別計算每條橫斷面的 128 個瞬時灘線位置點之平均值而得之平均灘線；而綠線則是兩者有重疊之部分。

圖 13 的 100 條垂直於海岸線之橫斷面中，有 51 處的像素位置為兩者有重疊之部分，而有 46 處為兩者相差一個像素，其餘 3 處則是由於雷達回波平均影像所辨識之灘線有邊緣缺漏之現象，因此無法計算其差距。雖然有大於半數的橫斷面其雷達回波平均影像量測之灘線與 128 張回波影像中灘線之平均位置為一致，但仍有多達 46 個橫斷面其量測結果為雷達回波平均影像量測之灘線在 128 張回波影像中灘線之平均位置的左側相距一個像素的地方。

造成此現象的可能原因之一為本研究利用雷達回波平均影像辨識灘線之流程中，主要是進行 Canny 邊緣偵測來進行海岸灘線之辨識，Canny 演算法並非直接以二維梯度之最大值來判定是否為邊緣，而是會先經過高斯濾波處理來消除影

像中之雜訊，且除了針對水平與垂直方向的像素值變化量來作偵測，還會檢測斜角方向之邊緣。然而本小節以單張影像來辨識灘線時，是以二維梯度峰值處作為灘線位置，僅考慮水平與垂直方向的像素值變化量，而忽略了斜角方向有可能存在梯度峰值，因此兩者結果會有所差異。

第二個可能原因是單張影像容易受到雜訊之干擾，使得回波強度之梯度峰值的地方容易受到影響而產生偏差，而造成其結果與雷達回波平均影像量測之灘線位置有所不同。整體來說，雷達回波平均影像所辨識之灘線與整個影像序列中的平均水線大致上呈現一致，因此直接以圖 4 演算法對平均影像進行海岸灘線之辨識較為適當，且該法較容易建立自動化程序，可快速地偵測出濕沙與海面交界處的灘線位置。

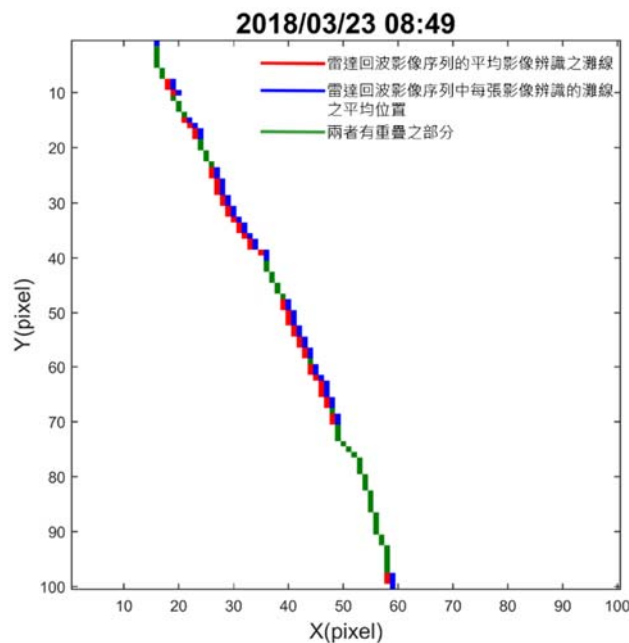


圖 13 雷達回波影像序列之單張影像與平均影像量測之灘線套疊結果

### 3.3 雷達回波平均影像辨識灘線之驗證

為確認雷達觀測所得之灘線是否準確，須透過其他觀測資訊進行交互比對與確認，因此本研究使用無人飛行載具(UAV)攝影測量系統之光學影像與雷達回波平均影像所提取之灘線資訊進行交互比對，於雷達觀測期間同步進行海岸地區之航拍作業。本研究使用的 UAV 為四旋翼飛行器(型號為 DJI Matrice 100)，裝載在 UAV 上的相機為 DJI 一體式雲台相機(型號為 DJI Zenmuse X3)，如圖 14，其硬體規格如表 1。

本研究於 2018 年 3 月 23 日 07:54 時進行雷達與空拍機之聯合觀測，所規劃的航拍範圍為安平商港南側沙灘區域，涵蓋範圍南北向約 650 公尺，東西向的範圍約

300 公尺。雷達影像原本就為正射影像，空拍影像則是經過正射糾正(ortho-rectification)處理後產製正射影像，其正射影像之結果如圖 15 所示，從圖中可目測辨識出由於碎浪現象所出現的白泡沫區域，而白泡沫前緣即為灘線之位置。圖 16 為經由本研究所建立的雷達回波平均影像應用於量測灘線之方法所辨識出的灘線，與現場同步觀測之空拍機航拍所獲得的正射影像(圖 15)進行套疊之結果，從圖中可以發現雷達影像所量測的灘線位置與空拍影像中目測辨識的灘線位置非常接近，結果相當吻合，進而確認利用航海雷達之平均影像偵測海岸灘線之可行性。

表 1 本文所使用四旋翼飛行器之硬體規格

DJI Matrice 100 技術參數	最大起飛重量	3600 g
	最大可承受風速	10 m/s
	最大航行速度	22 m/s
	最長飛行時間(雙電池)	40 min
	工作環境溫度	-10°C 至 40°C
DJI Zenmuse X3 技術參數	尺寸(Sensor size)	6.17 x 4.55 mm
	有效像素	1240 萬
	ISO 範圍	100~3200
	視角	94°
	光學參數(焦距/光圈)	20 mm(35 mm 等效焦距) f/2.8



資料來源：DJI 官方網站

圖 14 DJI Matrice 100 四旋翼飛行器與 DJI Zenmuse X3 相機



圖 15 空拍機攝影並校正後所獲得之正射影像(拍攝日期：2018 年 3 月 23 日)

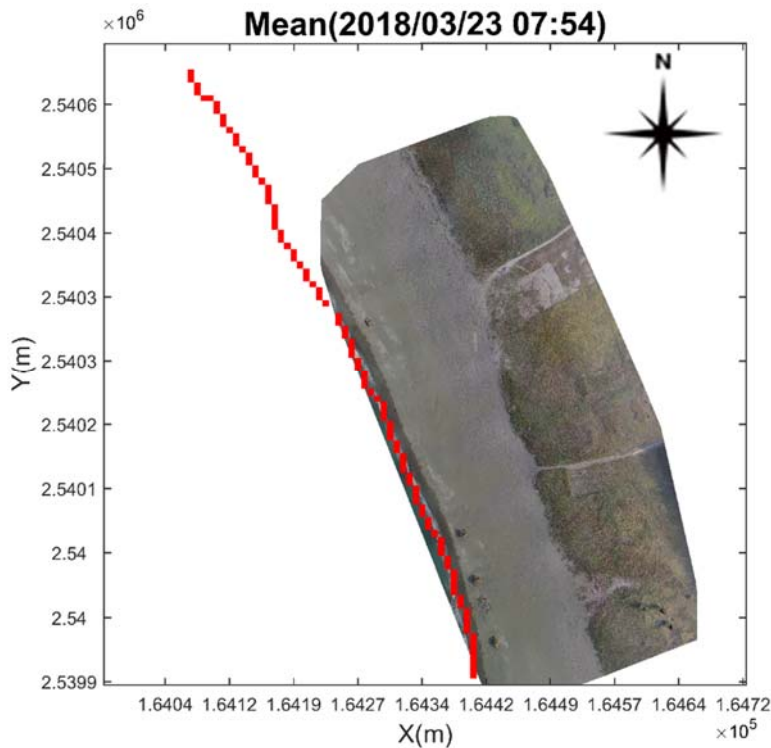


圖 16 2018 年 3 月 23 日 07:54 時雷達回波平均影像量測之灘線與空拍影像套疊之結果

#### 四、結論

本研究採用的雷達設備與現有多數船艦所搭載之航海雷達相同，由於此類商用雷達原本皆僅作為船艦導航用途，並未具備灘線監測的功能，為能擴展其應用價值於灘線監測，本文利用雷達回波影像中的海面與沙灘區域會顯現不同的回波特性，提出從 X-band 雷達回波平均影像進行灘線位置量測之分析方法與演算流程。雷達回波平均影像可經由 Canny 邊緣偵測與形態學之細線化處理，取得海面與濕沙交界之灘線位置，結果顯示本研究之方法能夠成功地辨識出濕沙與海面交界處

之灘線位置，但在濕沙回波強度較弱處或濕沙與周圍強度值很接近時會出現邊緣斷裂的現象。

本研究以雷達回波影像序列中的單張影像來進行橫斷面分析，觀察橫斷面上不同離岸距離處之回波強度與其梯度值的變化情形。可發現海面與沙灘之間的回波強度峰值會出現在濕沙區域，推測可能是先前波浪溯升時，將水裡較大粒徑砂石、雜質、或垃圾堆置在濕沙區域所造成。而峰值左側(即向海一側)的回波強度之梯度值最大的地方則是本文判斷為濕沙與海面交界處之灘線位置。本研究進一步將雷達回波平均影像所辨識出的灘線與



現場同步觀測的空拍機光學影像進行比較，其套疊結果可發現雷達影像所量測的灘線位置與光學影像中日測辨識的灘線位置相近，進而確認利用雷達回波平均影像偵測海岸灘線之可行性。

X-band 雷達具有機動、即時、涵蓋大範圍、且可持續性的優點，可固定架設於岸邊，只要提供穩定電力即可於近岸範圍進行即時且連續地觀測。因此本文提出從 X-band 雷達回波平均影像進行灘線位置量測之方法，可有效地辨識出不同潮位時的灘線位置，對於未來長期作業化監測海岸地區之灘線變化及海岸變遷狀況將有非常大的幫助。然而，雷達監測海岸灘線的效能會受到雷達架設高度、目標相對於雷達之距離、雨量強度、海況條件(風、波浪、及海流)等影響，這些因素對於灘線偵測之影響程度需要更深入測試與清楚地界定。

## 謝 誌

本研究感謝科技部計畫編號 MOST 106-2221-E-006-120 之經費提供，另外感謝國立成功大學近海水文中心提供 X-band 雷達之技術支援。

## 參考文獻

Bell, P. S., Bird, C. O., and Plater, A. J. (2016) "A temporal waterline approach to mapping intertidal areas using X-

band marine radar," *Coastal Engineering*, Vol. 107, pp. 84-101.

Borge, J. N., and Soares, C. G. (2000) "Analysis of directional wave fields using X-band navigation radar," *Coastal Engineering*, Vol. 40, no. 4, pp. 375-391.

Canny, J. (1986) "A computational approach to edge detection," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, no. 6, pp. 679-698.

Chien, H., Wei, S. T., Cheng, H. Y., and Hsu, C. M. (2012) "The applications of microwave radar and CCD image analysis to topographic survey in the intertidal flat," *Proceedings of the 34th Ocean Engineering Conference in Taiwan*, Tainan, Taiwan, pp. 667-672. (In Chinese)

Gens, R. (2010) "Remote sensing of coastlines: detection, extraction and monitoring," *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 31, no. 7, pp. 1819-1836.

Graham, D., Sault, M., and Bailey, C. J. (2003) "National Ocean Service shoreline—past, present, and future," *Journal of Coastal Research*, pp. 14-32.

Hubbard, S. S., Peterson Jr, J. E., Majer, E. L., Zawislanski, P. T., Williams, K. H., Roberts, J., and Wobber, F. (1997) "Estimation of permeable pathways

- and water content using tomographic radar data,” *The Leading Edge*, Vol. 16, no. 11, pp. 1623-1630.
- IPCC. (2007) “Climate change 2007: The physical science basis,” *Agenda*, Vol. 6, no. 07, p. 333.
- Lin, J. T. (2007) *The Study on Water Line Extraction From Time Series of SAR Image*, Master Thesis, National Central University, Taiwan. (In Chinese)
- Long, M.W. (2001) *Radar Reflectivity of Land and Sea*, 3rd Ed. Boston: Artech House.
- Morton, R. A., and Speed, F. M. (1998) “Evaluation of shorelines and legal boundaries controlled by water levels on sandy beaches,” *Journal of Coastal Research*, pp. 1373-1384.
- Seemann, J., Ziemer, F., and Senet, C. M. (1997, October) “A method for computing calibrated ocean wave spectra from measurements with a nautical X-band radar,” *OCEANS'97. MTS/IEEE Conference Proceedings*, Vol. 2, pp. 1148-1154.
- Takewaka, S. (2005) “Measurements of shoreline positions and intertidal foreshore slopes with X-band marine radar system,” *Coastal Engineering Journal*, Vol. 47, pp. 91-107.
- Wu, L. C., Chuang, L. Z. H., Doong, D. J., and Kao, C. C. (2011) “Ocean remotely sensed image analysis using two-dimensional continuous wavelet transforms,” *International journal of remote sensing*, Vol. 32, no. 23, pp. 8779-8798.
- Young, I. R., Rosenthal, W., and Ziemer, F. (1985) “A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents,” *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 90, pp. 1049-1059.