



利用微波雷達回波反算近岸海域地形

吳立中／國立成功大學近海水文中心 副研究員

馬家麟／經濟部水利署水文技術組 科長

賴堅戊／國家海洋研究院海洋產業中心 研究員

王良生／國立成功大學近海水文中心 助理

近岸海域地形是近岸水動力、海岸溢淹、數值模擬等課題或工具亟需的資料，它具有高度時變特性，過去的觀測時常以小艇或遙控船進行測量，不但耗時較久，費用也較高且受海況影響有時不易作業。本研究提出一個以微波的 X-Band 雷達回波解算近岸海域地形的辦法，它是透過分散關係式反算獲得。本文說明雷達遙測原理，並舉在臺南鹽水溪橋進行實測驗證為例說明，驗證結果顯示了反算地形的水深誤差在 1 米以內，考量雷達的機動性與觀測結果的準確性，未來利用微波雷達反算近岸海域地形成為可行。

前言

近岸海域水深地形資料是探討水動力變化、海岸侵蝕、海堤溢淹等課題之必要數據，也是數值模擬亟需的輸入資料。過去在不同政府部會的努力下，陸續對臺灣近岸海域水深地形進行現場調查研究。然而由於海洋水體的持續流動，易造成海底床沉積物的搬移，進而導致海底地形的持續變化。時常在一個颱風侵襲前後海域地形即有顯著的不同，倘若缺乏系統性、全面性與持續性的調查，則無法全面地掌握海底地形實際狀況。

由於聲音是水下傳遞最有效的能量形式，目前主流之海洋水深地形調查設備多是基於水下聲波的發送與回波接收時間差再搭配水中聲速來反推水面到海底床間之距離。如圖 1 所示，透過使用聲波之波束寬度不同或是增加波束的數量，即可更有效進行大範圍水深地形之量測工作。側掃聲納還可以提供海床的聲波散射強度影像，對於海底地貌的探勘有很好的成效。

透過聲波量測水深地形的特點，需搭配船艦或其他適當之載具出海執行觀測作業。現場聲波量測可取得極為準確的水深地形資訊，然而海上作業需要搭配船艦來

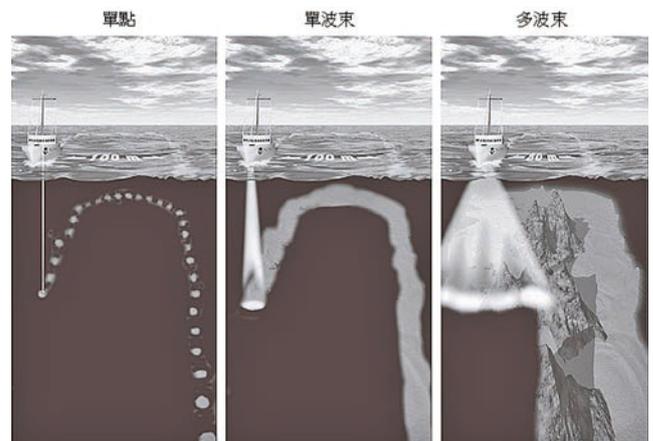


圖 1 各種現場水深地形聲學量測技術的海底觀測範圍比較 (資料來源：Dierssen and Theberge [1])

執行作業，其所耗費之成本，包括時間與人物力都很可觀。臺灣位處熱帶與亞熱帶交界處，海氣象條件複雜。每年夏、秋兩季恐受颱風威脅，冬季則受東北季風之吹拂，不利於中、小型船艦之海上量測作業。在近岸處的淺水區域，中、大型船艦在進行量測作業時，則有擱淺之風險。除了船艦在海上的作業安全有疑慮之外，海面波動對量測作業之影響，也是現場聲學量測所必須克服

之技術課題。如圖 2 所示，船艦在海上進行現場聲學量測作業時，必須持續修正觀測作業時刻的潮位變化以及波浪對船艦晃動所造成誤差影響。

為降低現場水深地形調查之作業風險與困難度，進而提升海域環境調查之作業效率，可仰賴非接觸式遙測科技。非接觸式觀測亦即遙測，一般泛指量測設備不與目標物直接接觸，藉由偵測目標物反射或散射的能量，據以判讀目標物物理性質的技術。相關遙測科技於二戰之後開始蓬勃發展，海洋的探測也開始走向遙測領域^[2,3]。在 1960 年代前後美蘇開始競相發射衛星開始，透過衛星或其他航空載具進行海洋遙測之方式被大幅應用於各種不同領域，其包括了波浪、全球海平面、海溫等海表面物理量之大空間範圍監測。由於遠離陸域的外洋水域空間尺度範圍大，衛星遙測在這樣的海洋環境研究上具有極大之潛力，早在 1970 年代德國研究團隊就嘗試應用衛星影像解算海面波浪參數^[4]。後續有許多研究團隊提出不同的衛星遙測影像演算技術，嘗試從衛星影像中解析不同的海洋環境特徵。

雷達 (Radio Detection and Ranging, 簡稱 Radar) 是透過發送特定頻率電磁波至目標區域，再同步接收目標區域內存在物體所反射以及散射之電磁回波，藉以獲取目標物資訊的一種觀測技術。雷達原被用來追蹤目標物，其實雷達訊號亦可用來分析海洋環境資訊。當雷達應用於海上船艦航行之用途時，海面雷達影像上所呈現之雜斑 (sea clutter) 是雷達電磁波與海水面交互作用下的所產生之現象。因海面雜斑易影響海上實際目標物之判識，商用雷達主機通常會設置濾波功能，將雜斑視為雜訊而濾除。但在海洋環境探測之研究領域，海面雜斑正是學界所感興趣而欲取得之訊號，也是解算水深地形的關鍵。

隨著海洋遙測技術的進步與發展，國內外皆有許多學者開始投入雷達遙測海表面影像的分析及其後端應

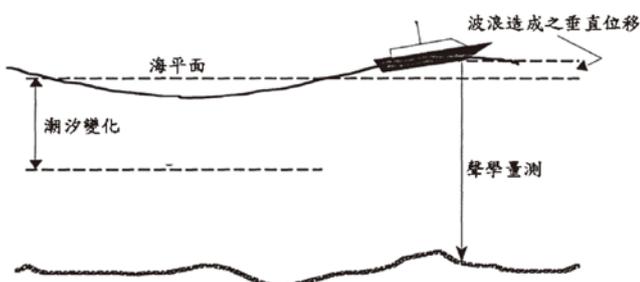


圖 2 現場聲學量測所必須克服之海面波動影響 (資料來源: Godin^[5])

用等研究議題，並輔以海洋相關理論，從雷達回波資訊中計算出風、浪、流等海氣象參數。不同頻段的雷達電磁波，可應用於不同領域的海洋遙測，國際上雷達觀測海洋環境之技術研發於近年來發展迅速，已達到實用階段。如國外海洋科學界發展出利用高頻 (HF) 雷達進行海表面流場的觀測，最大觀測範圍可達數百公里。相較於高頻雷達適用於大範圍海域的觀測，航海雷達設備大多使用 X-Band 之波段，此一電磁波段適合在小尺度區域內進行高空間解析度的海洋環境觀測。X-Band 電磁波在各種領域的應用廣泛。諸如：無線通訊、天氣探測、飛行目標監測等。在海上，因 X-Band 電磁波可精準定位不同方位之目標物，且能有效在海上目標物造成反射，進而在雷達影像中呈現出目標物，已成為航海雷達設備最常被使用之電磁波段。若將 X-Band 雷達設備架設於海岸地區，也就是岸基 (land-based) 雷達之型式，可連續不間斷地擷取空間範圍內的海面波紋特徵，屬於一種兼具一維度時間域與二維度空間域資訊的觀測技術。有鑑於 X-Band 雷達應用於海洋環境探測之優勢，國內也已開始投入此一遙測技術之相關研究^[6-15]。圖 3 顯示幾種遙測技術的優勢與其使用環境條件限制，針對航海雷達觀測技術，其空間解析度為公尺等級，而所能量測的水深範圍也在數十公尺之內，本文即是在發展以 X-Band 雷達反算近岸海域地形之技術。

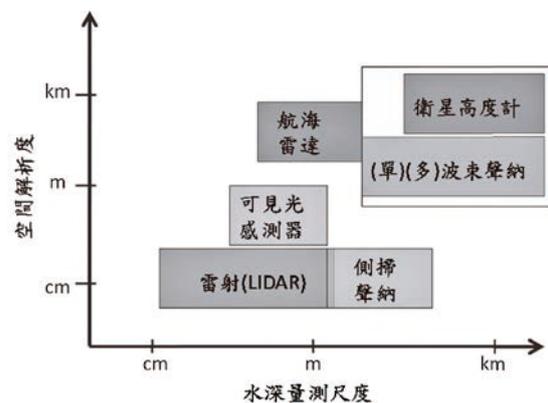


圖 3 各種水深地形量測技術的量測能力 (資料來源: Dierksen and Theberge^[11])

微波雷達觀測原理

本文使用的 X-band 雷達為一般船艦導航用之雷達，其硬體元件架構包括發射端、接收端兩部分。如圖 4，雷達發射機會產生一短暫時間之電磁脈衝波，透過雷達天線上的發射陣列點將電磁脈衝之能量聚成細束狀，並朝

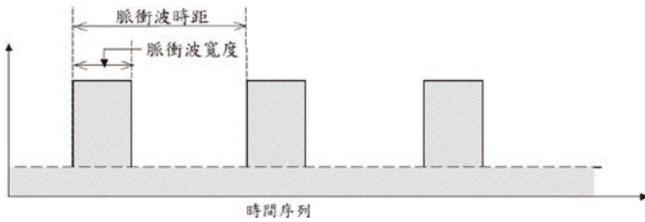


圖 4 雷達所發射之脈衝訊號示意圖

指定之方向發射。電磁波碰觸到位在此方向上的障礙物或是物體而反射或散射。反射或後向散射之電磁回波能量被雷達天線所接收，再傳送至接收機。一般而言，由天線送達之電磁回波訊號通常已相當地微弱，需要透過訊號放大技術將微弱之訊號進行增幅。不同用途的雷達會再針對增幅後的訊號進行不同形式的加工處理，藉以透過最有效之方式取得監測區域之電磁回波特徵。雷達探測距離遠近則由脈衝重複週期來決定，脈衝重複週期為前一個脈衝主波與後一個脈衝主波之相隔時間，其決定了雷達的最大測距。假定有一個目標離開雷達站非常遠，雷達仍可以收到從該目標反射回來的信號，不過回波可能是出現在第二個脈衝主波發射之後，如此則無法有效辨識出此一極遠目標物的真實距離。雷達測定的最短距離與雷達的發射脈衝寬度有關，當目標物離雷達站非常近，主波和回波可能相互靠攏合而為一，使無法分辨主波與回波，亦即無法測出很近的目標，此即為所謂的盲區。脈衝寬度較窄的雷達，其盲區會相對地較小。脈衝寬度除了和所能測定的最短距離有關外，還決定雷達的徑向之鑑別能力。譬如有二個目標，彼此間的距離小於脈衝寬度，那麼二個目標在螢光屏上的回波就合而為一，這樣就無法辨別到底是一個目標或兩個目標。脈衝的寬度愈狹窄，雷達的空間解析度就愈高。本研究所使用的雷達脈衝寬度為 70 ns，其對應之空間解析度可分辨出觀測範圍內二個徑向距離相距 10.5 m 的目標物。

要決定目標物的空間位置，除了要掌握目標物距離外，還需要確認目標物與雷達之間的方位角。由於航海用 X-band 雷達天線是屬於指向性天線，其發射的能量會盡可能集中為一波束，並向一個方向傳播。天線能量發射的角度大小稱為波瓣角。波瓣角愈小，就表示天線的方向性愈好。利用天線的指向性，可以測定出目標物所在的方位角，本研究所使用雷達的波瓣角於水平方向約 1.2°。

電磁波與海水面之間所產生的回波機制，已可歸納為兩種主要的物理現象。分別是鏡面反射 (Specular

reflection) 與布拉格散射 (Bragg backscattering)。當海面起伏大或波浪大時，較大波陡 (wave steepness)，也就是海浪波面的傾斜特徵讓海面形成類似鏡面之功能，將低掠角 (low grazing angle) 之雷達波射向鏡面產生反射。學界將這樣的雷達回波機制稱為 Tilt modulation，也就是不同傾角的波面對電磁波產生不同的反射現象。另一種電磁波與海水面之間的回波機制為布拉格散射 (Bragg Scattering)，當電磁波長與海面波動之波長滿足特定之比例關係時，電磁波會與海面波動的幾何形狀產生共振而導致強烈之回波。一般而言，雷達波的布拉格散射與主導海面電磁回波的機制 -Hydrodynamic modulation 有關。波浪在傳遞的過程中，水面下的水粒子也持續在運動。因迎波面與背波面水粒子運動方向之差異，造成迎波面上毛細波 (capillary wave) 的輻合 (convergence) 效應，進而增強了迎波面上的粗糙度。然而在背波面上的水粒子運動方向會造成背波面產生輻散 (divergence) 效應，致使背波面的毛細波減少，背波面會相對較迎波面平滑。而這些海面上的毛細波就是 X-band 電磁波產生布拉格散射 (Bragg scattering) 的主因。根據布拉格散射理論，當電磁波長 λ_r 與海面波長 λ_w 若滿足式 (1) 之數學關係時，電磁波與海面波動交互作用會產生較強烈的電磁波散射。

$$\lambda_w = \frac{\lambda_r}{2 \cos \theta_r} \quad (1)$$

上式中 θ_r 為雷達的觀測掠角。相較於衛星或其他空載方式，雷達無論是架設在岸邊或是船艦上的高度受限，電磁波路徑與海平面之間的夾角較小，也就是低掠角之狀況。此時 $\cos \theta_r \approx 1$ 。也就是說，海面波長條件為電磁波長的一半時就會產生布拉格散射。事實上，微波的電磁頻帶範圍很廣，介於 0.3 GHz ~ 300 GHz。X-Band 只是眾多微波頻段中的其中之一。X-Band 的頻率介於 8 GHz ~ 12 GHz 之間，換算其電磁波長則介於 3.75 cm ~ 2.5 cm 之間。一般航海雷達設備所選用的電磁波頻率大多為 9 GHz 左右，其對應的電磁波長約為 3 cm。在低掠角的條件下進行雷達觀測，其布拉格散射的波長條件約為 1.5 cm。有就是風之能量作用於海表面初期所生成的毛細波。對 X-band 雷達的工作波長而言，由於海面普遍存在的毛細波與 X-band 電磁波長之間所存在的布拉格散射關係，X-band 雷達相對於其他波段雷達於海面能有較好回波散射效果，進而在雷達影像中呈現出清晰之海面波紋特徵。

地形反算原理

由於雷達所發射之電磁波並無法穿透海洋水體抵達海底床，利用雷達技術獲取水深資料的原理是透過偵測海表面的波浪特徵來反算出水深值。波浪分散關係式 (wave dispersion relation) 描述出波浪因水深影響所產生變化之數學關係，是從海洋遙測波場影像解算水深資訊的關鍵方程式。

X-band 雷達遙測所得之海表面影像中包含有海面波浪的資訊於其中。透過波譜轉換理論能將三維海洋影像序列 $I(x, y, t)$ 轉換成三維度之影像波譜 $S^{(3)}(k_x, k_y, \omega)$ ，其中包含了波浪角頻率 ω 以及波數 $\vec{k} = (k_x, k_y)$ 的資訊於其中。透過式 (2) 的波浪分散關係式，可利用波浪角頻率 ω 以及波數 \vec{k} 值解析出遙測影像區域的水深值 d ：

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kd)} + \vec{k} \cdot \vec{U} \quad (2)$$

式 (2) 中含有兩項未知數 - 水深 d 以及流速 \vec{U} 。圖 5 呈現出水深對波浪分散關係之影響。理論上透過單一組分散關係式無法解算出兩項參數，但水深 d 以及流速 \vec{U} 對於分散關係曲線的影響，分別是在低頻帶以及高頻帶。為避免海流影響到水深之解算，在應用式 (2) 時，需針對其低頻項進行分析與計算，藉此將海流值視為可忽略，方可獲得準確的資訊。為能更快速有效進行計算，Bell [16] 調整了分散關係式之表示方式，從中求解出水深資訊：

$$d = (L_0 / 2\pi)(C / C_0) \tanh^{-1}(C / C_0) \quad (3)$$

上式的 L_0 與 C_0 分別為深水區波浪的波長與相位速度。根據線性波理論，可透過波浪週期 T 推導出：

$$L_0 = gT^2 / 2\pi \quad (4)$$

$$C_0 = gT / 2\pi \quad (5)$$

式 (3) 的 C 為波浪相位速度。根據式 (3) 的數學關係可知，如何從雷達影像序列解算不同觀測位置的波浪相位速度，是求取海域水深資訊的關鍵。從影像序列資料計算特徵物速度的方法頗多，Bell [16] 曾利用影像序列中連續海面波紋影像的交錯相關分析 (cross-correlation analysis) 解算出波浪相位速度。Chuang and Wu [17] 則曾提出透過小波轉換數學理論計算影像能譜，再從影像譜中解算出波浪的相位速度。如圖 6 的等值線分布圖所示，為在固定角頻率條件下的雷達實測影像譜之能量密

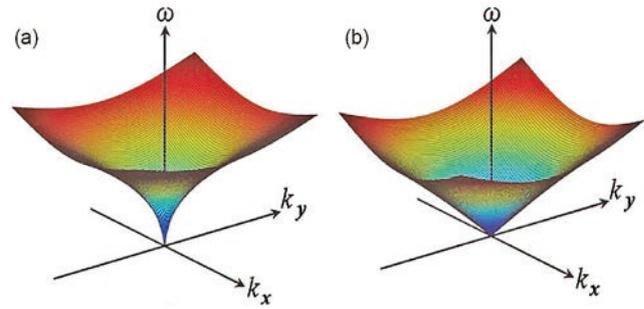


圖 5 水深條件對波浪分散關係之影響：(a) 深水條件；(b) 淺水條件

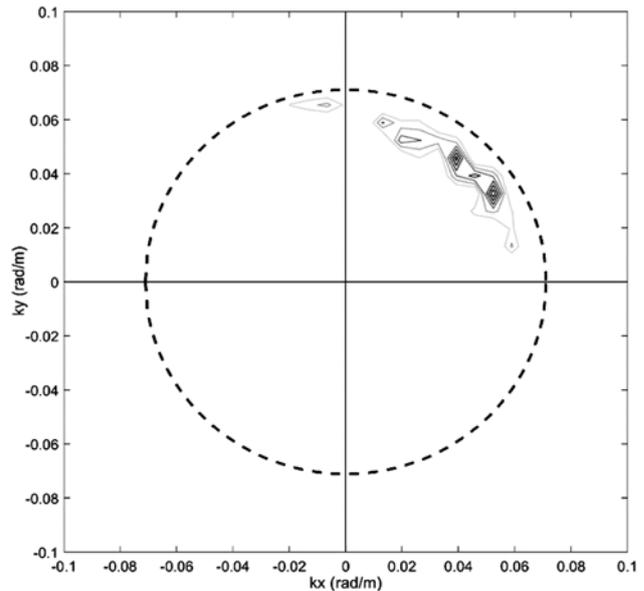


圖 6 雷達實測影像譜之能量密度分布 (固定角頻率條件)

度之分布特徵。圖中的圓形虛線框標記出深水條件下的波浪分散理論關係。由於雷達實際觀測區域為近岸淺水區域，致使能量密度分布之波數條件會與深水波浪分散理論關係之波數條件不同。透過雷達實測影像譜之尖峰能量密度所對應之波數資訊，搭配已知的角頻率 (ω) 條件，可計算出波浪相位速度 C 。

有別於前文所討論的交錯相關分析與小波轉換理論，本研究利用希爾伯特轉換 (Hilbert transform, HT) 作為波浪相位速度解算之依據。為便於討論，本文先將訊號簡化成單一維度進行討論。根據希爾伯特轉換數學理論，一維度訊號 $s(t)$ 的希爾伯特轉換可定義如下：

$$H\{s(t)\} = s(t) * (1/\pi t) \quad (6)$$

上式的符號 $*$ 代表函數之摺積 (convolution) 運算。根據希爾伯特轉換之理論，一維度訊號的瞬時相位 (instantaneous phase) 可透過訊號與其希爾伯特轉換後的關係來獲得：

$$\phi_i(t) = \arctan\left(\frac{H\{s(t)\}}{s(t)}\right) \quad (7)$$

一維度訊號的瞬時角頻率則可進一步透過訊號瞬時相位的微分求得：

$$\omega_i(t) = \frac{d\phi_i(t)}{dt} \quad (8)$$

前述是透過希爾伯特轉換解析時序列訊號，並進一步解算出訊號的瞬時角頻率資訊。針對二維度空間影像，也就是本文所使用之海面雷達回波影像則可透過希爾伯特轉換，分別解析空間域中的 x 方向與 y 方向訊號，從中求解出空間域內所對應的局部 (local) 相位資訊，再進而求解出 x 方向與 y 方向的局部波數 k_x 與 k_y 。在影像處理領域， k_x 與 k_y 也被稱為空間頻率 (spatial frequency)。根據上述方法，求解出波浪瞬時角頻率 ω 以及局部波數 \vec{k} 的資訊，再透過下式解算出雷達觀測區域內不同空間位置的相位速度^[18]：

$$C = \omega / |\vec{k}| \quad (9)$$

透過上式，從雷達影像序列中解算出相位速度資訊之後，即可透過式 (3) 的數學關係解算出雷達觀測水域的水深資訊。

實例驗證

本文之雷達影像案例為 106 年 6 月 2 日於臺南鹽水溪河口所取得^[19]。由於臺南四草大橋為鄰近區域的制高點，雷達設備架設在四草大橋上進行觀測試驗，如圖 7 所示。圖 8 則為雷達回波圖之一例。

根據前文之方法，針對臺南鹽水溪河口所取得之海面雷達影像進行水深地形資訊的解算，其結果如圖 9 所示，解算之水深範圍大多在 15 m 以下。為能確認雷達



圖 7 現場雷達作業情形 (106 年 6 月 2 日)

解算水深結果之準確程度，蒐集了 105 年 5 月現場船測資料進行比對。比對結果如圖 10 所示，雷達解算水深結果與現場船測水深資料之間的相關係數為 0.91，均方根誤差則約 1.0 m。

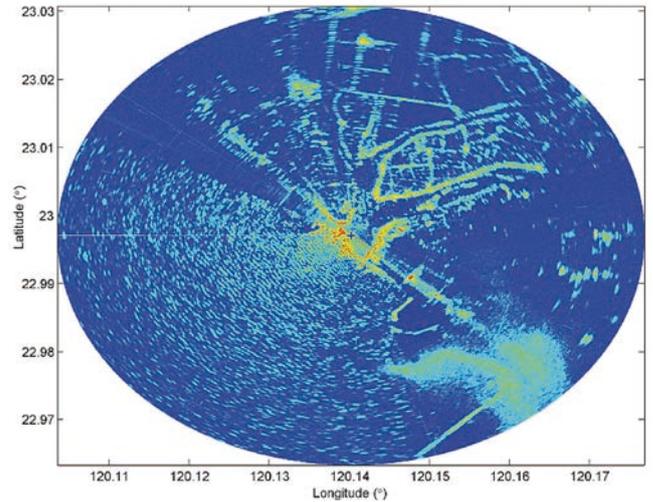


圖 8 雷達回波圖之一例 (106 年 6 月 2 日)

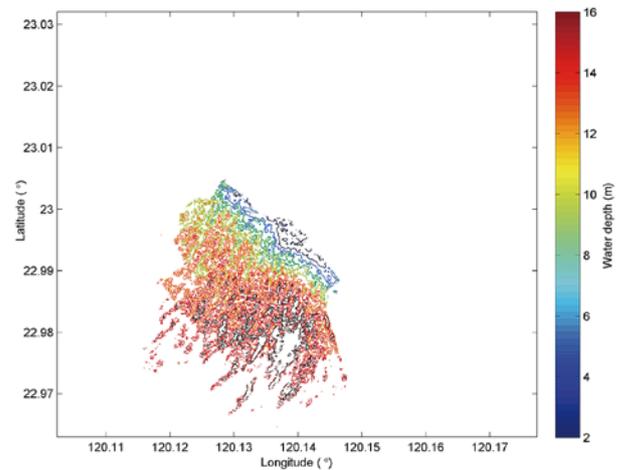


圖 9 鹽水溪河口案例之水深地形解算結果

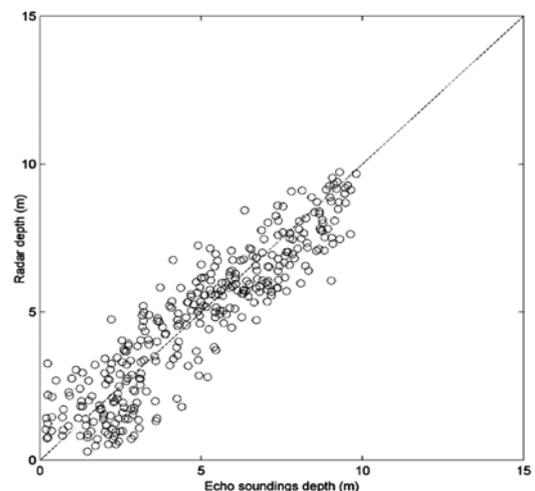


圖 10 鹽水溪河口案例之水深地形比對結果

除了上述所述之臺南鹽水溪口海域地形反算案例外，研究團隊還另外在多處地點進行測試研究，均獲得良好的結果，顯示根據微波雷達反算海域地形確為可行。少部分案例有較大偏差的原因研判是海面回波的強弱（即波紋清晰度）所影響，如前文所討論，9 GHz 等級的電磁波長，也就是 X-band 的波長易與海面上的毛細波產生布拉格共振，進而更有效獲得後向散射之電磁回波，並從雷達影像中獲得海面波浪紋路之圖像。依據風浪理論，海面風速約 2 ~ 3 級風以上即可引發海面毛細波。此外，根據電磁回波理論，雷達電磁波發射之方位若與波向反向，也就是 upwave 的情況下，雷達電磁波可鏡面反射回雷達天線端的機率較高，進而在雷達影像中產生較明顯的波紋，作為解算高準確度水深地形資訊的依據。然而，若雷達電磁波的行進方向與波浪行進方向接近正交（兩者方向相差約 90° 或 270°）時，雷達電磁波鏡面反射的機制不易產生或是回波會反射至其他方向，相對電磁波返回雷達天線端的機率較低，其所呈現影像的波紋則相對會較為不清晰。雷達回波強度因距離衰減的現象也會造成距雷達天線較遠處的波紋較不清晰。此外，若現場浪高過小，也將造成海面回波機制不足，致使影像中波紋會不清晰。從現場試驗所取得之影像波紋特徵可發現，在某些觀測區域的影像中的波紋特徵較為不清晰，判斷是造成水深解算誤差的原因之一。

結論與建議

為了取得近岸海域水深地形資料，本研究發展以 X-Band 微波雷達反算海域地形的技術，其優勢包含有：(1) 遙測屬於空間面的觀測技術，可獲取近岸大範圍海域的水深資訊；(2) 遙測設備可設置於岸邊，適合作為長期監控作業，維護成本亦較低；(3) 發展非接觸式水深遙測技術是國際間之趨勢，投入此項技術之研發能提升國內水文觀測技術的水準。當然更重要的是其觀測結果亦具有一定之準確性，本文舉在臺南鹽水溪橋上的觀測為例顯示雷達反算結果和實測結果比對之相關係數為 0.91，均方根誤差則約 1.0 m。相較於現場量測所獲得可視為最正確的真相（ground truth）之水深資訊，X-band 雷達觀測技術雖然還無法到達與現場量測一樣的精度等級，但在岸邊遙測即可在半小時內獲取方圓數公里近岸海域範圍內的水深資訊，未來可與現場水深量測技術相互配合，獲取範圍更廣的觀測資料，提供各類水利及海岸工程所需。

誌謝

本研究承蒙經濟部水利署與國家海洋研究院補助研究經費始得以完成，特表謝意。

參考文獻

1. Dierssen, H.M. and A.E.T. Jr. (2014), Bathymetry: Assessing Methods, in Encyclopedia of Natural Resources. Volume II – Water and Air, Y. Wang, Ed., New York: Taylor & Francis Group, pp. 1-8.
2. Tucker, M.J. and Pitt, E.G. (2001), Waves in Ocean Engineering, Elsevier, Oxford.
3. Kanevsky, M.B. (2009), Radar Imaging of the Ocean Waves, Elsevier, Oxford.
4. Alpers, W. and Hasselmann, K. (1978), The two-frequency microwave technique for measuring ocean-wave spectra from an airplane or satellite, Boundary-Layer Meteorology, Vol. 13(1-4), pp. 215-30.
5. Godin, A. (1998), The Calibration of Shallow Water Multibeam Echo-Sounding Systems, Technical Report No. 190, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Canada.
6. 吳立中、董東璟、錢樺、高家俊 (2002)，應用岸基測波雷達於方向波譜觀測之研究，第 24 屆海洋工程研討會論文集，第 517-524 頁。
7. 吳立中、董東璟、高家俊、張國強 (2004)，發展微波雷達於海況觀測之研究，海洋及水下科技季刊，第 14 卷，第 1 期，第 55-60 頁。
8. 吳立中、董東璟、高家俊、曾鈞敏 (2005)，應用航海雷達於空間波場觀測之研究 – 空間波流場之分析，第 27 屆海洋工程研討會論文集，第 28-34 頁。
9. 吳立中、董東璟、林家豐、高家俊，(2006)，從雷達影像萃取近岸海域表面流場之研究，海洋工程學刊，第 6 卷，第 2 期，第 81-94 頁。
10. 吳立中、董東璟、莊士賢 (2008)，雷達於海洋觀測之應用，海洋及水下科技季刊，第 18 卷，第 2 期，第 3-7 頁。
11. 吳立中、董東璟、莊士賢、高家俊 (2009)，航海雷達應用於海面波流監測可行性之探討，水利，第 19 期，第 4-10 頁。
12. 吳立中、莊士賢、陳云瑄、孫永大、王心怡 (2020)，X-band 雷達監測近岸海底地形的季節性變遷 – 以七股潟湖海岸為例，第 42 屆海洋工程研討會論文集，國立臺灣海洋大學。
13. 簡昭群、馬家麟、王仲豪、吳立中、陳秋份 (2017)，海堤堤前與河口水深地形非接觸式觀測科技之研發，第 23 屆水利工程研討會論文集。
14. 莊士賢、吳立中、孫永大、黃瓊珠、鍾育仁、蔡昀展、鄭仁杰 (2019)，X-band 雷達於近岸水深量測精度之改良，第 41 屆海洋工程研討會論文集。
15. 陳云瑄、莊士賢、吳立中、孫永大 (2020)，以卡爾曼濾波改良 X-Band 雷達近岸水深量測誤差，第 42 屆海洋工程研討會海報。
16. Bell, P.S. (1999), Shallow water bathymetry derived from an analysis of X-band marine radar images of waves, Coastal Engineering, Vol. 37(3-4), pp. 513-527.
17. Chuang, L.Z.H. and Wu, L.C. (2014), Study of Wave Group Velocity Estimation from Inhomogeneous Sea Surface Image Sequences by Spatio-temporal Continuous Wavelet Transform, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 39(3), pp. 444-457.
18. 財團法人成大研究發展基金會（成功大學近海水文中心）編著 (2016)，海堤堤前與河口水深地形非接觸式觀測科技之研發 (1/2)，經濟部水利署出版。
19. 財團法人成大研究發展基金會（成功大學近海水文中心）編著 (2017)，海堤堤前與河口水深地形非接觸式觀測科技之研發 (2/2)，經濟部水利署出版。