

從岸基 X-band 雷達回波監測近岸溫排水之初步研究

吳立中^{1*} 莊士賢²

摘要

溫排水放流為臨海發電廠運作過程中之必要工作，為能掌握放流水對海洋環境之影響，實有賴於對溫排水放流結果之有效監控。本文提出利用岸基 X-band 雷達進行海面溫排水放流運動特徵偵測之初步研究結果。透過回波影像時序列的平均和無因次化，並以雷達電磁波之衰減效應進行修正等影像處理工作，將海面的特定回波特徵予以強化。經由現場觀測之海水溫度、潮汐及海流資料與雷達回波特徵之交互比對，證實了從電廠排水口延伸出的帶狀雷達回波特徵與溫排水時空分布之關聯性，也初步確認了岸基 X-band 雷達應用於監測近岸溫排水運動特徵之可行性。

關鍵詞：X-band 雷達、影像處理、溫排水放流偵測

1. 前言

人類早在數千年前即已在海洋地區進行經濟活動，為能掌握複雜多變的海洋環境，陸續發展出各種以船艦或浮標為平台的海洋探測技術。這些單點探測技術可透過 Lagrangian 以及 Eulerian 兩種方式描述海洋環境於時間域與空間域之變化特徵。第二次世界大戰之後，隨著衛星及雷達等遙測科技的發展與進步，讓大範圍海洋空間的探測不再遙不可及。

各種海洋遙測技術中，依據其所使用電磁波段的不同，可以發揮出不同的探測功能。根據電磁波理論，距離雷達天線較近區域的海面回波主要是由鏡面反射機制所主導；然而較遠距離的海面雷達回波則主要是受到 Bragg 散射機制所主導，因此如何選用適當的電磁波頻率進行海面監測就成為相關海洋遙測研究的關鍵。在各種電磁波段中，X-band 之 Bragg 散射波長約為 1.5cm，剛好就是在海水面普遍存在的毛細波之波長條件，也因此 X-band 電磁波已被公認是作為海面特徵觀測的理想工具之一。

往昔以 X-band 雷達為基礎的海洋探測技術多

聚焦於海面波浪與海流等海洋外力之監測，例如：Young *et al.* (1985)透過分析三維度的 X-band 雷達影像序列，從中求得海表面波浪與流場資訊，開啟了分析海面雷達影像序列的先河。根據 X-band 之 Bragg 散射機制，只要會牽涉到海表面毛細波粗糙度的物理現象，應都有可能利用 X-band 雷達探測出，因此本文嘗試利用 X-band 雷達遙測技術來偵測、解析、與研究臨海發電廠於近岸海域之溫排水放流(thermal effluent discharge)現象。

充足穩定的電力是國家發展以及民生需求之基石。到民國 102 年為止，台灣含離島地區共有 11 座火力發電廠以及 3 座核能發電廠(台灣電力公司永續報告書，2013)。不論是火力或是核能發電廠，其機組的冷卻是發電系統之運作關鍵。利用海水冷卻機組後再將溫熱水排放入海為一常見之方式。為能在海域環境管理與民生所需之間找到一平衡點，則有賴對電廠溫排水放流進行嚴密之監控。常見的水溫監測方式是在電廠放流口附近佈置大量的水溫測計(張國棟等，2011)或是透過移動載具(古碧源等，1999)進行量測工作，藉以確實掌握海域溫排水的流場分布以及擴散特徵。針對較大空間區域的溫排水偵測，則可透過衛星或是其他飛行載

¹ 國立成功大學近海水文中心 專案助理研究員

² 國立成功大學海洋科技與事務研究所 副教授

收到日期:民國 103 年 02 月 07 日

修改日期:民國 103 年 03 月 21 日

接受日期:民國 103 年 03 月 31 日

*通訊作者，電話: 0953816093, E-mail: jack18@mail.ncku.edu.tw

具進行海表面水溫(sea surface temperature, SST)的觀測。國外針對海面溫水監測之研究曾透過衛星或是飛機等載具於美國墨西哥灣進行溫水團的遙測(Askari *et al.*, 1993; Nghiem *et al.*, 2000)，這些研究所遙測的溫水團是屬於中尺度(meso-scale)的海洋物理現象。本研究所探討的岸基(land-based)式 X-band 雷達觀測技術則針對小尺度區域(micro-scale)內的海表面特徵進行觀測。岸基雷達可連續不間斷地對同一海域進行監測，得以長期且穩定地取得海面特徵之時間及空間變化(spatio-temporal information)，是一種兼具時間與空間特性的三維度觀測技術，對於一些近岸物理過程的長時間追蹤提供了更為有效的方式。透過此一觀測方法搭配影像分析技術可更進一步判斷出目標水體的時空分布，這對於後續近岸海洋科學研究以及海岸管理領域都能提供更為豐富的資訊。

2. 研究設備說明

本研究所使用 X-band 雷達設備之電磁波頻率為 9.41GHz。由於在海面波浪還未碎波的情況下，水平(HH)極化天線能較垂直(VV)極化天線測得更強烈之海面電磁回波(Hwang *et al.*, 2008)，為能獲得明顯之海表面回波特徵，本文使用水平極化天線作為觀測設備。雷達天線之轉速為 42r.p.m.，亦即雷達影像序列之頻率(frame rate)為 0.7Hz，這樣的觀測頻率對於偵測溫排水的擺動特徵已相當足夠。雷達設備的功率為 25KW，經現場測試發現，其有效的觀測範圍可達數公里。為確保不易發生影像取樣失真(aliasing)，雷達訊號透過高速取樣，以 20MHz 的取樣頻率擷取雷達訊號，所對應雷達影像空間徑向解析度為 7.5m/pixel。雷達影像之側向解析度則正比於雷達觀測距離與雷達訊號水平束寬的乘積。較窄的水平束寬可以改善雷達影像之側向解析力，本研究所使用之 X-band 雷達水平束寬為 1.2°。

本研究之現場試驗位置為高雄興達海域，雷達天線之架設高度約距海面 15m，波場影像之觀測半徑則為 4.5km。雷達影像之觀測範圍如圖 1 的虛

線所示，距離雷達架設位置約 3km 處設有底碇式波浪流速儀。該項設備除可提供流速資料外，也可取得海面潮位資料。

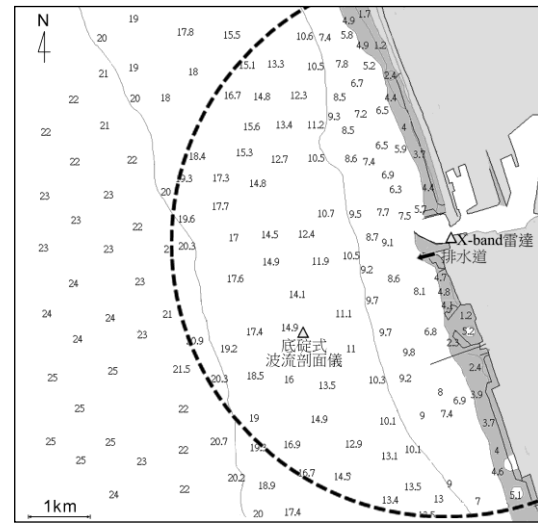


圖 1 現場試驗之布置

3. 影像處理流程

為能更有效凸顯出溫排水放流之海面回波特徵，本研究透過下述之影像處理流程進行影像特徵強化。由於 X-band 之電磁波對於海面之重力波(風浪)會產生較為強烈之回波(Mattie and Harris, 1978)，而這些重力波之波紋會影響本研究目標物之判讀。有鑑於海面之重力波會以約略每秒數公尺的速度移動，透過將連續影像序列對其時間域進行平均，可有效將海表面影像的重力波特徵移除，藉以解析海面影像中所測得的其他特徵：

$$g(r, \theta) = \frac{1}{N_t} \sum_{t=1}^{N_t} f(t, r, \theta) \quad (1)$$

上式中， $f(t, r, \theta)$ 為連續雷達影像序列函數； $g(r, \theta)$ 為平均之後的極座標系統空間影像函數； r 為雷達觀測距離； θ 為觀測方位角； N_t 為對影像時序序列進行平均之總張數。理論上， N_t 愈大，愈能有效消除海表面影像的重力波特徵。然而過大之 N_t 值則影響溫排水放流海面回波特徵之偵測效果。經測試後發現，使用約 3 分鐘($N_t=128$)的

影像時序列進行平均，已能有效消除海表面影像的重力波特徵。

本文所研究的海面溫排水放流之回波是針對溫水放流之運動特徵進行偵測，並無考慮海面回波之量化結果。雷達所測得之回波強度一般可用 db (decibel 量測系統)或是 dbm (以 1 milliwatt 作為參考基準)。為方便進行後續之數位雷達影像訊號處理，本文透過下式將雷達影像予以無因次化：

$$g'(r, \theta) = g(r, \theta) / G \quad (2)$$

上式中， G 為 $g(r, \theta)$ 範圍內之回波最大值。一般而言，此一回波最大值都發生在最靠近雷達天線之位置，亦即在有效觀測距離 r 最短時所測得之回波量值。

除了消除海表面影像的重力波特徵之外，為能更完整呈現出海面回波特徵，海面雷達回波的距離衰減效應也需要被考慮。理論上，電磁波的衰減特徵與距離 r 的四次方呈反比；但實際上大氣中不同成分對電磁波的吸收效果皆不盡相同，致使電磁波在不同大氣條件的衰減特徵極為複雜。為能修正雷達回波隨距離 r 衰減之影響，本文首先選取出無陸地回波影響的方位角觀測範圍後，再以對數尺度呈現回波強度：

$$h(r) = \log_e \left(\frac{1}{N_\theta} \sum_{\theta=\theta_a}^{\theta_b} g'(r, \theta) \right) \quad (3)$$

上式中 $\theta_a \sim \theta_b$ 為無陸地回波影響的方位角觀測範圍； N_θ 為極座標影像中 $\theta_a \sim \theta_b$ 範圍內的雷達觀測的離散方位角總數量。

如圖 2 中的十字符號所示，為其中一組雷達影像案例經式(1)~(3)轉換後所得之海面回波強度與觀測距離之關係。其中距離天線約 0.75 km 以及 1.5 km 處之回波強度呈現明顯不連續之現象，這是因為計算範圍內雖無陸地回波之影響，但海上船艦的回波效應仍不可忽略。為量化出能代表該組雷達影像案例的回波衰減關係，需移除不連續回波強度之影響。理論上，在海面無任何船艦回波以及雜訊的干擾下， $h(r)$ 應隨距離 r 遞減。在此一假設下，先將空間序列中距離較遠但回波反而增強的回波

強度予以移除，被移除的回波再透過相鄰距離回波的線性內插進行資料補遺，經補遺後的回波特徵如圖 2 中的圓圈符號所示。再進一步針對上述之雷達回波強度進行移動平均，藉以減緩資料補遺對於後續量化衰減效應之影響。透過上述流程，將平滑後的數值(如圖 2 的曲線所示)修正到整個雷達觀測範圍中不同距離的雷達回波強度，藉以求取較不受距離衰減影響的雷達影像。考慮到每組雷達案例所遇到的海面雜訊條件皆不盡相同，因此每組雷達案例都須單獨進行上述修正流程。

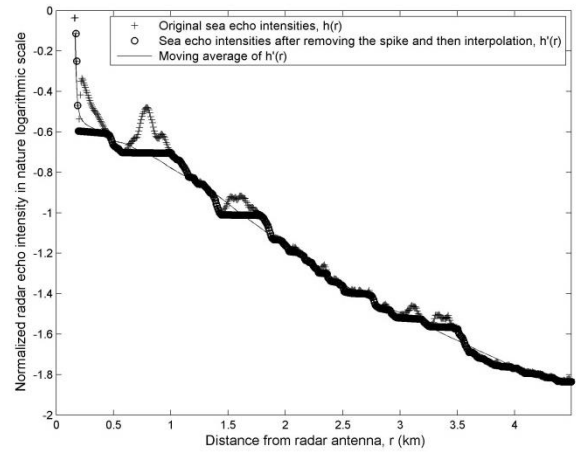


圖 2 海面回波強度隨觀測距離之增長而衰減

4. 溫排水放流偵測結果之研究

根據研究發現，主導海面電磁回波強弱的其中一項因子為海面粗糙度(Kanevsky, 2008)。這是因為入射的電磁波長與海水表面波長滿足特定的數學關係時，就會產生布拉格散射(Bragg scattering)的現象，因而在海面產生強烈的雷達回波。依據上述的理論來檢討海面溫水放流所引發的雷達回波機制，可發現這主要是因為海面溫度的改變造成了大氣成層(atmospheric stratification)的變動，也進而造成海面風剪力的改變。因受到海面風剪力的作用，造成了海面粗糙度改變，海面上的毛細波增加，進而於海表面引發強烈的電磁回波(Askari *et al.*, 1993)。此外，從排水道所排出溫水屬於一射流之現象，在出水口附近的流速較為強勁，且流向大致會與波浪的前進方向相反。這是因為受到海底地形

的影響，波浪於近岸淺水地區會產生折射，致使波浪於近岸淺水區域的行進方向會大致與海岸線垂直(Sorensen, 2006)。受到射流之影響，排水道出口附近的波浪尖銳度會變大，甚至造成波浪破碎，不論是較陡峭的波面(增強電磁波反射)或是海浪碎波都會產生強烈之電磁回波(Lee *et al.*, 1998)。

透過前述之流程對不同雷達影像案例進行修正後，本研究可針對研究區域所測得之雷達影像案例中所呈現的回波特徵進行檢討。如圖 3 所示，為鄰海發電廠溫排水之排水口附近所測得海面雷達影像，可以明顯看到觀測區域內不同目標物之回波。陸上結構物之回波包括有：港口防波堤、海上棧橋以及電廠排水道等，海面上船隻的回波反射則會在雷達影像中呈現出斑點狀之回波特徵。除上述之回波特徵外，從圖 3 的海面回波影像中可發現：電廠排水道外側之海面上(虛線方框處)有一道明顯之雷達回波帶，此一帶狀特徵之回波強度雖然較陸上結構物之回波微弱，但仍可明顯辨識出其特徵從電廠排水道向外延伸，並朝北方彎曲。

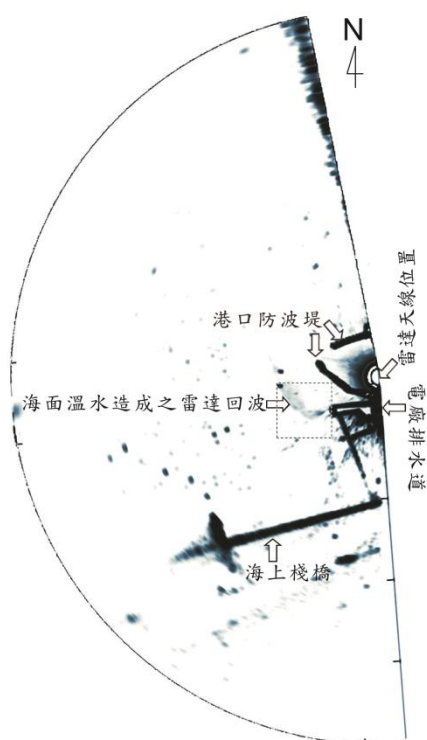


圖 3 電廠出水口之海面雷達影像

從圖 3 中雖能辨識出從電廠排水道所延伸出的帶狀回波特徵，但還未能確認此一帶狀回波與溫

水放流之間的關係。為能證實 X-band 雷達偵測溫水放流之可行性，本文於雷達觀測區域內進行現場水溫資料之量測，如圖 4 所示，為電廠溫排水口外之海面回波影像與現場同步船測之海表面水溫值之嵌套結果。水溫量測深度距海表面 0.5m 之內。為避免海溫隨時間變動所造成的誤差，本研究所使用的船測資料為一個小時內的觀測結果。從大範圍的現場海溫量測結果發現，海面上確實有一條明顯的溫排水區域，從排水道向外延伸並擴散。相較於整個船測區域的平均水溫值(29°C)，溫水帶內的平均水溫可達 31°C。而這條溫水帶的分布區域與前述的強烈海面雷達回波帶的空間分布區域一致，由此比對結果確認了 X-band 雷達影像中的帶狀回波與海面溫排水分布之間的關聯性。

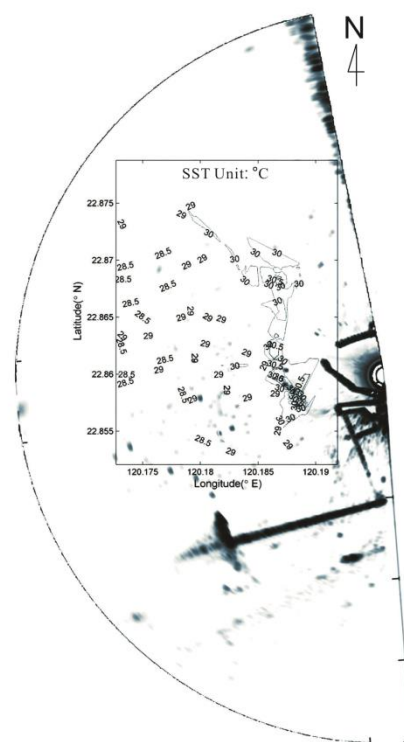


圖 4 現場海面水溫量測結果

本研究進一步針對逐時的海面回波影像進行解析，為避免陸上結構物的強烈回波影響到溫水帶特徵的判讀，於是從雷達影像中切選出小區域的子影像進行探討，圖 3 的虛線方框所標示出的區域即為所選取之子影像範圍。圖 5 為透過雷達連續監測 24 小時的海面特徵變化情形，可發現到此一近岸溫水回波帶具有空間域的擴散以及隨時間擺動的

現象。

在 24 小時內，溫水回波帶有兩次向北擺動的現象發生，第一次向北擺動的時段為：06, 07, 08, 09 o'clock；第二次向北擺動的時段為：19, 20, 21, 22 o'clock。除了回波帶有向北擺動的特徵之外，從部分時刻的影像案例中也可辨識出回波帶向南擺動(15, 16 o'clock)之特徵。相較於帶狀回波向北方擺動的案例，向南方擺動的帶狀回波較不明顯，這是因為雷達天線所在位置位於帶狀回波的東北方，故向北方擺動的回波帶在地理位置上距離雷達天線較近。受到雷達回波隨距離衰減之影響，導致向南邊擺動的帶狀回波特徵並不明顯。此外，從圖 4 的結果也發現到，於緯度 22.87°附近有一處高水溫區域，但相較於距雷達較近區域(緯度 22.85°~22.86°)之溫排水回波，緯度 22.87°附近之溫水帶雷達回波強度並不明顯。雖然本研究在影像前置處理過程中，已針對雷達回波隨距離衰減之影響進行修正，但在修正過程中，影像內的雜訊也會被強化，導致較遠距離的溫水帶回波較不易被辨識出。

從圖 5 的雷達回波特徵可發現到，放流水進入海域之後的擺動現象具有一定程度的週期性(每天兩次的擺動)，初步判斷此一溫水帶的水體運動是受到潮流之牽引。為確認此一論點，本研究利用距離雷達架設位置約 3km 處之現場潮位及近海表面流速的觀測資料與雷達回波特徵進行比對(如圖 6 所示)，圖中的表面海流之流向定義為：0°代表由南向北流；90°則代表由西向東流。由於本研究試驗區域位於台灣西岸，受到台灣海峽南北狹長地理條件之影響，研究區域內之海流方向約略呈南北向。圖 6 中灰色區塊所標記的時刻為可明顯辨識出溫水回波向北方擺動之同步雷達影像案例。經比對後發現，這些回波向北方擺動之案例發生時，現場所測得之海流方向大致是由南往北流，此外，潮位特徵也大多發生於由低潮位漲潮至高潮位的時段。這是因為漲潮時，潮水從台灣海峽之南側流入，帶動研究區域內的水體由南往北流動，並牽引溫水帶朝北擺動。從比對結果確認了經 X-band 雷達所測得之近岸溫水放流回波帶之運動主要是受到潮流之牽引。

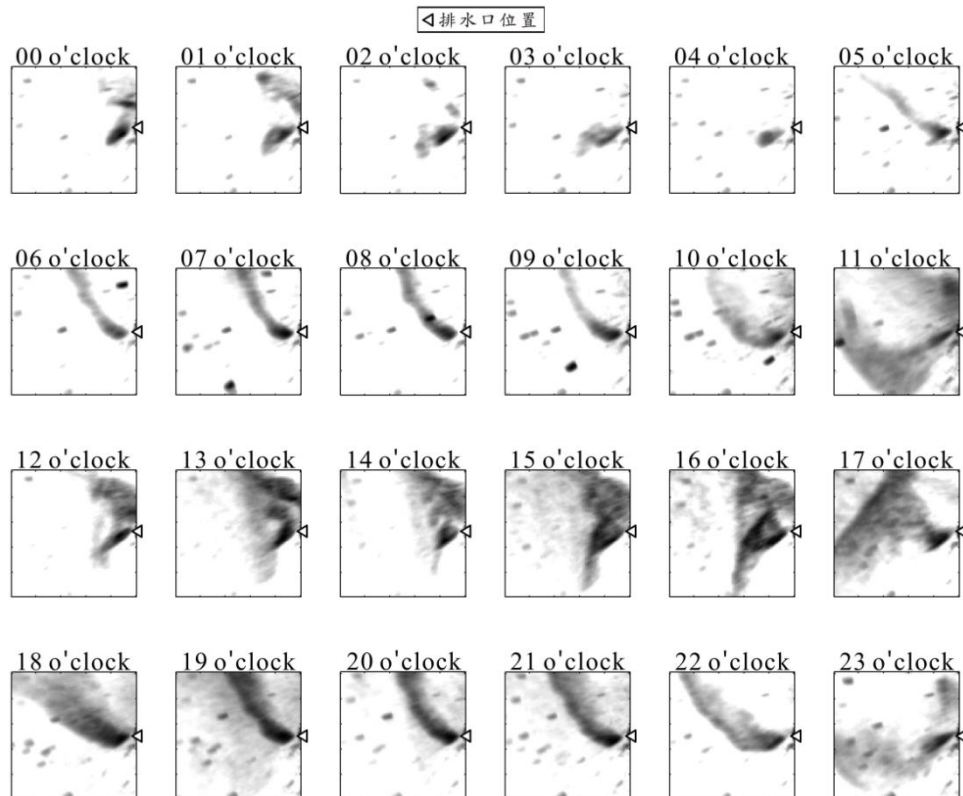


圖 5 電廠出水口外溫水放流回波帶之擺動特徵

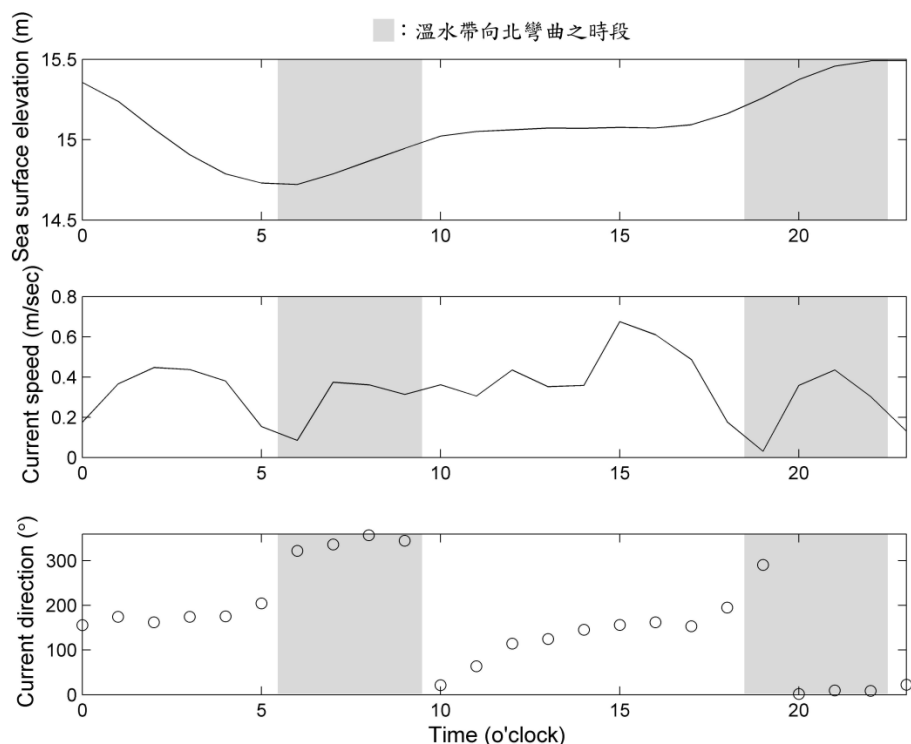


圖 6 與雷達影像案例同步之現場潮汐以及近表面海流觀測資料時序列

5. 結論

極近岸海域環境與人類的生存發展密不可分，也因此本研究討論的近岸溫排水放流現象是海岸地區規劃管理所必須掌握的資訊。但因為受到了陸域地形以及海底水深的影響，近岸水域的物理過程往往比外洋深水區域更為複雜多變。如何精準地解析以及掌握溫排水放流現象，一直都是學界所努力的目標。

X-band 雷達遙測之優勢為不受日夜影響，能全天候持續監測大範圍海域之海表面特徵。相較於現場出海作業之量測方式，雷達觀測方法能在極短的作業期間即能掌握近岸海面於時空域之變化特徵，為一極具潛力且實用的觀測方法。本研究發現從海面 X-band 雷達影像中能偵測出溫排水放流特徵。這是因為溫排水產生的大氣成層變動會造成海面風剪力的改變，而海表面受到海面風剪力的作用會使得海面粗糙度改變；此外，排水口所產生的射流現象也會讓波浪尖銳度改變。這些綜合機制造成了海面較強烈之回波發生，因而可藉由雷達偵測出溫排水放流之特徵現象。本研究再將雷達影像案例與

現場海溫、潮汐、及海流觀測資料進行交互比對後，初步確認了利用 X-band 雷達影像偵測溫排水放流之可行性，此外放流入海後的水體運動會受到海域潮流外力引導之現象在此研究中被觀察到與證實。

本研究雖然目前還未能從雷達回波影像決定出放流水之溫度資訊，但從雷達影像中取得之溫水帶回波具有隨時間變化以及在空間域中擺動之特性，這代表本觀測技術可在不同時間點有效掌握溫排水放流在海域空間的變化，以及對海域環境影響的範圍。這些資訊除了能作為數值模式模擬溫排水流體運動結果之校驗外，也將有助於後續溫排水工程規劃設計以及海域生態管理之應用。

致謝

承蒙國科會經費（編號 NSC102-2221-E-006-078-MY2）之補助以及財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心提供雷達原始觀測資料，使本研究得以順利完成，謹致感謝之意。

參考文獻

- 古碧源等，1999。應用無人載具系統監測電廠溫排水之海域擴散，第 21 屆海洋工程研討會論文集，台中，381-388。
- 張國棟、陳俊吉、謝佳紘，2011。台中電廠近岸海域溫排水分布調查，第 33 屆海洋工程研討會論文集，高雄，781-786。
- 台灣電力公司永續報告書，2013。
- Askari, F., Geernaef, G.L., Keller, W.C., Raman, S., 1993. Radar imaging of thermal fronts, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 14, No. 2: pp. 275-294.
- Hwang, P.A., Sletten, M.A., Toporkov, J.V., 2008. Breaking wave contribution to low grazing angle radar backscatter from the ocean surface. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113: C09017.
- Kanevsky, M.B., 2008. *Radar Imaging of the Ocean Waves*. Elsevier Science.
- Lee, P.H.Y., Barter, J.D., Beach, K.L., Lake, B.M., Rungaldier, H., Thompson, H.R., Yee, R., 1998. Scattering from breaking gravity waves without wind. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 46: pp. 14-26.
- Nghiem, S.V., Li, F.K., Walsh, E.J., Lou, S.-h., 2000. Radar backscatter across the Gulf Stream sea surface temperature front, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 38, No. 2: pp. 926-941.
- Mattie, M.G., D. Lee Harris, 1978. The Use of Imaging Radar in Studying Ocean Waves, *Proceedings of 16th Conference on Coastal Engineering*, Hamburg, Germany, Vol. 1: pp. 174-189.
- Sorensen, R.M., 2006. *Basic Coastal Engineering*. Springer.
- Young I.R., Rosenthal, W., Ziemer, F., 1985. A Three Dimensional Analysis of Marine Radar Images for the Determination of Ocean Waves Directionality and Surface Currents, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90: pp. 1049-1059.

Preliminary Study of Coastal Thermal Plume Oscillation Using X-band Radar Images

Li-Chung Wu ^{1*} Laurence Zsu-Hsin Chuang ²

ABSTRACT

This study discusses the detection of thermal plume using X-band radar images. After a series of image processing, we can detect an obvious echo band pattern at the drain outlet of a coastal power plant. We confirm this echo band pattern is induced by the thermal plume after comparing with the simultaneous in-situ sea surface temperature records. We also reveal that the plume pattern is oscillated due to the influence of tidal current. Although the X-band radar image cannot provide the water temperature information within the plume, we can obtain the spatio-temporal features of the thermal plume which is useful for coastal management and environmental protection.

Keywords: X-band radar, Image processing, Thermal plume

¹ Project-Appointed Assistant Research Fellow, Coastal Ocean Monitoring Center,
National Cheng Kung University

² Associate Professor, Institute of Ocean Technology and Marine Affairs,
National Cheng Kung University

*Corresponding Author, Phone: 886- 953816093, E-mail: jack18@mail.ncku.edu.tw

Received Date: Feb. 07, 2014

Revised Date: Mar. 21, 2014

Accepted Date: Mar. 31, 2014