

研討會名稱：中央氣象局104年天氣分析與預報研討會

參與之議題：海象測報與應用 Observation, Prediction, and Applications on  
Marine Meteorology

## 以同調性微波雷達監測近海海象之應用與驗證

錢 樺<sup>1</sup> 鄭皓元<sup>1</sup> 林昭暉<sup>1</sup> 張瑀峻<sup>1</sup> 呂理弘<sup>2</sup>  
國立中央大學水文與海洋科學研究所<sup>1</sup> 中央氣象局海象測報中心<sup>2</sup>

### 摘 要

本研究採用商用航海微波雷達主機與天線等硬體配置為基礎，設計中頻訊號處理電路，開發出一套移動式岸基同調微波雷達海象觀測系統，實現海面波浪與流場等的觀測。與非同調性微波雷達不同，本研究所開發之雷達系統，採用單頻式脈衝發射電磁波，通過獲取發射訊號與海面回波訊號之間的相位差，來估算海表徑向流速，再採用流函數模型反演得到觀測海域之矢量流場。為驗證雷達觀測結果之準確性，本研究於2015年4月在宜蘭頭城近海進行觀測實驗，並在雷達測區內以漂流浮球同步進行海表流速量測。為盡量減小比測試驗之系統誤差，本研究設計了一套極小化可拋棄式漂流浮球陣列系統：球體體積小、重量輕，避免了對海表流場的干擾；成本低廉、大量佈放，可對測區內空間多點進行同步連續觀測。比對分析顯示，二者測量結果基本吻合，徑向流速比測誤差在可接受範圍內，可期待同調性微波雷達系統在近海海象監測中發揮重要作用。

關鍵字：同調性微波雷達，海象監測，漂流浮球陣列

### 一、前言

近海海象對沿岸港堤、海上交通等有著重要影響，詳細了解和掌握近海水域的水動力環境，研究清楚近海海水流場浪場的交互作用，及時採取針對性措施，從海岸防災的角度而言，是極其重要的。近岸水域水體中，其柯氏力影響程度大幅減弱，海底底床摩擦力與波浪輻射應力顯著增強。

近海水體之運動特徵為各種外力動量平衡後的綜合效應，包括海表面風剪力，底床摩擦力，沿岸上下游之潮流與大尺度的洋流，離岸側之波浪輻射應力，最後加上水位梯度等。實際的近海海域狀況，往往比上述情況更為複雜，例如河口沖淡水注入改變水體密度分層、崎嶇海岸線與垂直海岸突出的人工結構物引致尾流(wake)與渦旋(eddy-shedding)，甚至必須考慮波流的交互作用。因此近岸水動力特性在

時間上是非定常，空間上是非均勻的。要完整掌握近岸水動力的時空特性，不論從理論、數值模式計算或是傳統觀測資料都是非常困難的。

非同調性岸基微波雷達遙測技術自1985年首度被提出後發展迅速，它主動發射微波波段電磁波至海面，經由布拉格散射機制產生背向傳遞的海面回波，經天線接受後藉由影像訊號分析海面特徵。由於天線機械式旋轉掃描，因此可持續獲得時間上的演變。此技術已經逐步商業化，似乎可以為近岸水動力監測帶來一線曙光。可惜的是，深究其分析方法與實際應用的經驗，非同調性微波雷達應用於監測近岸流場有許多限制。

近岸海域由於水深變淺，波浪由外海入射時受折射效應影響，各頻率的成分波傳遞波向逐漸垂直海岸等深線切線，且不僅主波向漸趨一致，方向分散度(Directional spreading)也快速收斂。水深越淺，方

---

1 錢樺，國立中央大學水文與海洋科學研究所副教授，hchien@ncu.edu.tw，桃園市中壢區中大路 300 號科一館 S348 室，(03) 4227151#65690。

向分散度越集中。換言之，在近岸海域與碎波帶周邊，波浪傳遞方向越來越集中且漸趨一致，幾乎成為垂直岸線方向入射的單向行進波列。傳統非同調微波雷達的分析方法，只能分析得流速在該單向波列行進方向上的投影值。所以，若是海流方向與波列行進方向垂直，利用非同調雷達的分析方法就無法獲得結果。此處必須特別強調的是，台灣海岸波浪大部分是垂直岸入射、海流受潮汐驅動，多平行海岸方向，傳統非同調雷達應用在這類海岸環境上是有許多限制的。而避免這些限制，改善觀測數據品質就是本研究開發、使用同調微波雷達的主要原因。

本研究使用國立中央大學自行開發研製的車載式同調微波雷達，於水利署第一河川局所轄宜蘭地區侵蝕現象顯著之烏石港-頭城近海，進行海表流場的觀測，並結合自製的漂流浮球陣列進行比對分析，改善觀測數據品質，以期在近海海象監測中發揮作用。

## 二、方法與步驟

### 1. 移動式岸基同調性微波雷達

本研究使用商用航海雷達之天線與接收機的硬體配置，設計中頻訊號處理電路，開發出一套移動式岸基同調微波雷達海象觀測系統。該同調性微波雷達採用單頻式脈衝發射訊號，並藉由脈衝與脈衝之間的回波訊號之相位差來計算以獲得海面訊息，相關技術說明如下。

(1)訊號產生與放大：以磁控管產生電磁波訊號，經由相鄰脈衝與回波訊號之間的交錯相關分析(Cross Correlation Analysis)，消除發射相位隨機性；再進行相位訊號低通濾波，濾除因工作頻率不穩定而造成相位陡變的異常值。

(2)回波接收與處理：海面回波訊號經天線接收后先降頻至中頻(IF)，再依次經高頻線性放大、濾波與超外差線路降頻，最後以120MHz的頻率取樣獲得訊號I channel，經由Hilbert轉換可獲得Q channel相位訊號。

(3)流速反演與計算：考慮一般條件下海流流速所造成的都卜勒頻偏量，相對於微波波段10°Hz的頻率，其頻偏量非常小，需藉由每一個距離元上脈衝與脈衝之間的回波相位差值之時間變率來估算。相位值域為0~2π，雷達脈衝發射頻率(FPR)為2100Hz。計算得到每一個脈衝射線於各距離元上的都卜勒頻偏後，計算徑向速度：

$$V_r = \frac{d\phi}{dt} \times \frac{\lambda}{-4\pi} \quad (1)$$

兩站雷達觀測徑向速度可以向量計算東西向與南北向流速。若僅有單站觀測資料，也可以採用流

函數模型反演得到觀測海域之矢量流場。假設海面上某一關注區域內之海流在空間與時間上為一均勻之變化，此範圍內所觀測到之徑向速度則應當為此一海流向量之投影結果。利用方程式(2)之表示式，透過最小二乘法即可進行海流流速向量計算：

$$\begin{bmatrix} \cos d(\theta_1) & \sin d(\theta_1) \\ \vdots \\ \cos d(\theta_n) & \sin d(\theta_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} rvel_1 \\ \vdots \\ rvel_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中θ角為每個網格點上雷達射線與x方向之夾角，方程式右側為每個網格點上之徑向流速值 u與v為求解之值。

本研究所用的移動式同調雷達架設於移動載具(圖1)，配備2.8kW發電機與不斷電系統，可進行24小時不間斷觀測；氣壓升降桿可使天線上升7 m。每一小時觀測一次，每次觀測擷取128幅雷達回波場，觀測半徑設定為3 km，空間解析度為2.5 m，天線轉速24 rpm，取樣頻率0.4 Hz。觀測資料儲存後可即刻於現場進行波浪與流場分析。分析結果包含波浪(波高、週期與波向)與海面徑向流速資料。



圖1 同調性海象雷達作業情形及風速計佈設位置

### 2. 漂流浮球陣列

漂流浮球體積小、重量輕，可自由隨流漂移；即時定位、即時傳輸數據，能在惡劣的海況下全天候實施監測；成本低廉，可大量施放，實現海水動力特性的空間多點陣列觀測，在近岸海洋觀測和資料蒐集中的優勢日漸突出，成為一種海洋觀測的一種重要手段。

本研究在浮標製造技術上亦開展了一系列的研製與改進工作：漂流浮球選用圓球形標體，使風應力的影響較小，同時能夠充分響應波浪與海流的作用，呈自由漂流狀態；漂流浮球靠自身浮力，在海

上猶如一質點隨波流運動，通過設計讓浮球的浮心在重心上，使系統易於保持平衡穩定狀態。

### 3.比對實驗

本研究用於觀測近海海象的雷達為微波波段，其電磁波於海表面的穿透力接近於零，因此雷達觀測到的海表面運動幾乎為海表面質點的運動。相應的，漂流浮標所量測到的運動也近乎是海表面之運動，因此二者的比對相當合理。

漂流浮標觀測海流與雷達觀測海流的比對實驗，最早見於Barrick等人在1977年的實驗，二者的比對誤差(Root-Mean-Square)為27 cm/s。爾後新提出的比對實驗中誤差大為縮小，達到5~6 cm/s (Molcard et al. 2009; Ohlmann et al. 2007)。另有一些實驗則以浮標的Lagrangian漂流軌跡和HF雷達預測軌跡進行比對，結果發現二者1天內的漂流距離誤差為5~10 km，漂流速度誤差6~11 cm/s (Ullman et al. 2006; Shadden et al. 2009)。需要特別指出的是，前述比對實驗所用HF雷達的時空解析度分別為3 h、6 km (Ohlmann et al. 2007; Barrick et al. 1977)和1 h、1.5~3 km (Ullman et al. 2006; Shadden et al. 2009)。Molcard et al. (2009)採用了較高空間解析度(600 m)的VHF雷達進行的同類比對實驗，漂流距離誤差則減小為每天2 km。Rypina et al. (2014)運用時空解析度為0.5 h和400~800 m的HF雷達與漂流浮標進行比對，流速觀測誤差進一步縮小為3.8 cm/s。上述比對實驗研究結果表明HF雷達的時空解析度對預測軌跡有顯著的影響。Wu et al. (2005)比對了非同調X-band雷達與單一GPS漂流浮標所觀測流速，平均誤差約為9 cm/s。

本研究以漂流浮標陣列，於雷達遙測海域範圍中，同步進行現場流場觀測，實現與雷達觀測結果的比對(圖2)。

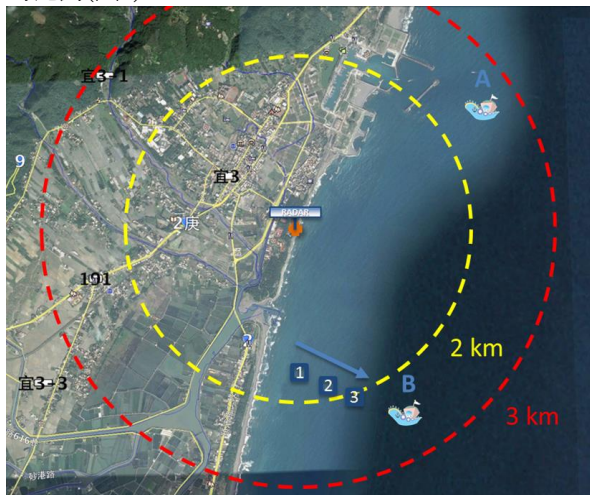


圖2 同調性微波雷達與漂流浮球陣列比對實驗示意

圖中黃色內圓半徑2 km，紅色外圓半徑3 km；藍色矢量實線為漂流浮球施放船往復航線；(影像拍攝時間為2014年1月7日，GoogleMap)；同時，在漂流浮

球下游方向雷達遙測範圍以外，佈置一艘浮球回收船，根據各個漂流浮球實時回傳的坐標訊息，追蹤並打撈雷達遙測範圍外且無迴轉跡象的浮球，以用於下一輪施放。所有漂流浮球資料，由通訊系統傳輸至岸上接收站並處理，包括資料品管、刪除浮標擱淺、碰撞近岸工程結構和下水前的資料，再刪除極端錯誤的資料，進而與雷達資料進行比對。

## 三、結果與討論

### 1.風場

實驗期間三維超音波風速計觀測的逐日風玫瑰圖如圖3，其顏色代表風速大小，藍色表示較小風速，紅色表示較大風速；其方向即為風的來向，虛線所呈現的圓圈為發生機率，不同方向風的發生機率以百分比表示，所有方向的發生機率總和為1。

從圖中可以看到，4月20日，風速大，其風向高度集中於東北方向；4月21日，風速比前一日減弱，雖風向仍以東北風為主，但同時亦衍生了其他方向更弱的風；4月22日，東北季風之機率更進一步減少，風速較小的陸風轉而成為機率加大的風。

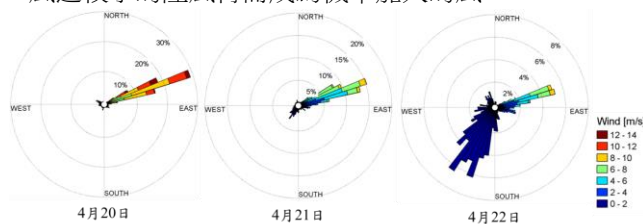


圖3 觀測作業期間逐日風速風向玫瑰圖

### 2.同調性微波雷達觀測結果

本研究中同調性微波雷達系統架設於宜蘭頭城海水浴場海岸，雷達前方即為近海海域。

圖4為雷達觀測之海域海面徑向速度空間分布圖(2015/04/20 18:00 到2015/04/21 05:00)，每小時一筆資料，觀測結果對比風速與潮汐變化可知，此時段為潮時經過退潮段、低潮段與漲潮段，而風速變化則在2 m/s~16.5 m/s間變化。風速最大發生在4/20 18:00~19:00間，風向變化較為一致，大約東南東風。由徑向速度分布圖可知，隨著風速增強(2015/04/20 18:00~20:00)、風速穩定(2015/04/20 21:00~2015/04/21 00:00)到風速減弱(2015/04/21 01:00~04/21 05:00)，海面徑向速度的變化從增強、穩定到減弱，可見雷達觀測到近海面之流速變化受風的影響極大。

經由單站雷達模式計算後之流速向量結果如圖5所示(2015/04/20 18:00 到2015/04/21 05:00)，每小時一筆資料，由流速向量空間分布圖可知，當風速逐漸變強、風向轉為吹東北風時，海面流速向量空間分布也呈現往南流之流況，且隨著風速增強，流速也逐漸增強到0.8~1.0m/s，隨著風速減弱，流速也逐



漸減弱，由此段觀測資料可明顯發現在觀測區域北側近岸海堤前存在一較強之流速分布，說明海堤附近確實為一沖刷較明顯之區域，而南邊河口處也可看出水流向外流之速度向量。

### 3. 漂流浮球陣列觀測結果

漂流浮球陣列軌跡基本覆蓋了雷達觀測區域(圖6)。圖中的顏色代表漂流速度。離岸流速較快。特別需要指出的是，在雷達南側約1公里處為竹安溪入海口，使得流經附近的漂流浮球軌跡均偏向外海。整體上看，與同調微波雷達觀測結果相近，下一步研究工作將注重比測誤差的定量分析。

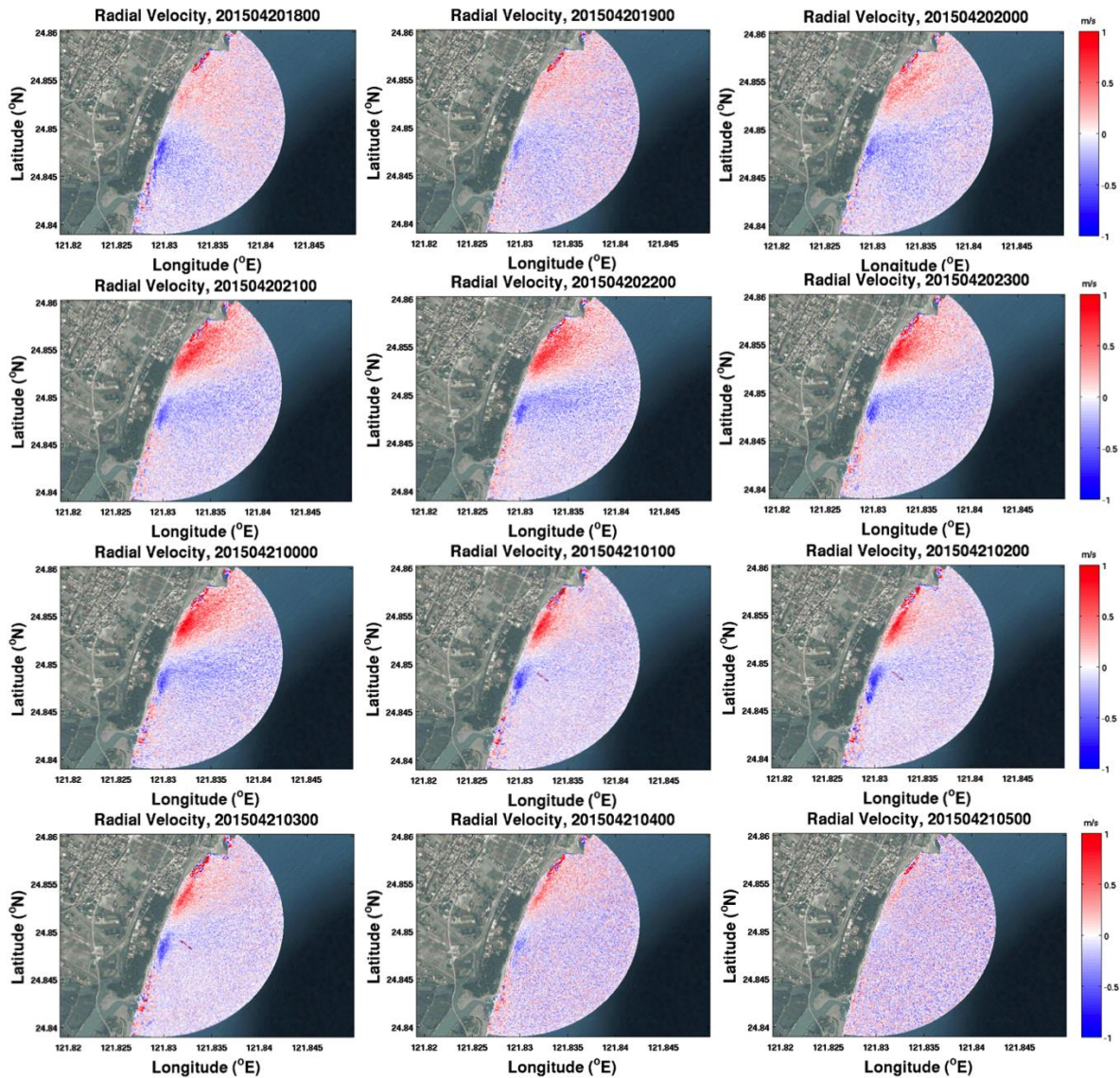


圖4 觀測期間4月20日18時～4月21日05時，雷達觀測獲得之海面徑向流速分布圖

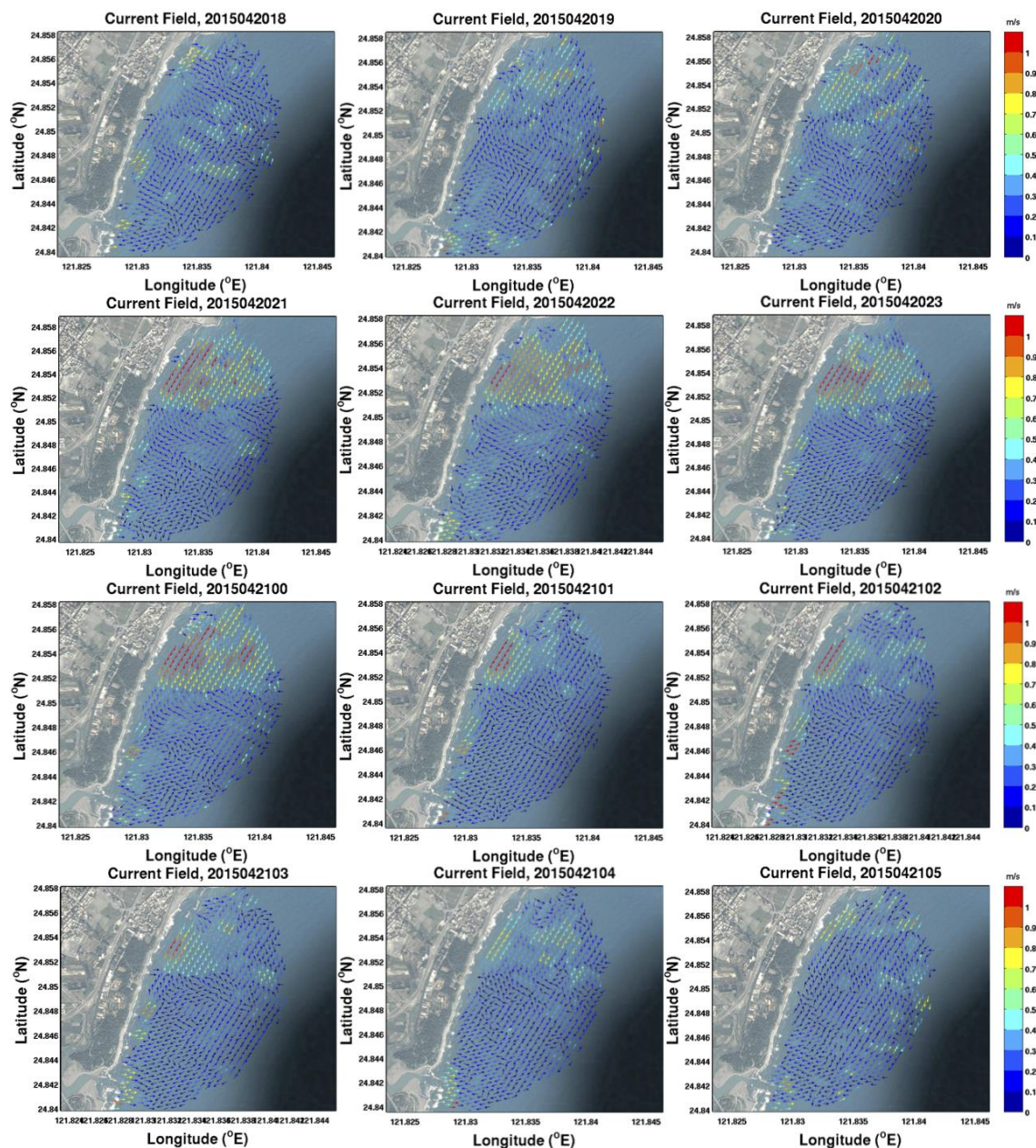


圖5 觀測期間4月20日18時～4月21日05時，雷達觀測獲得之海面流速向量分布圖



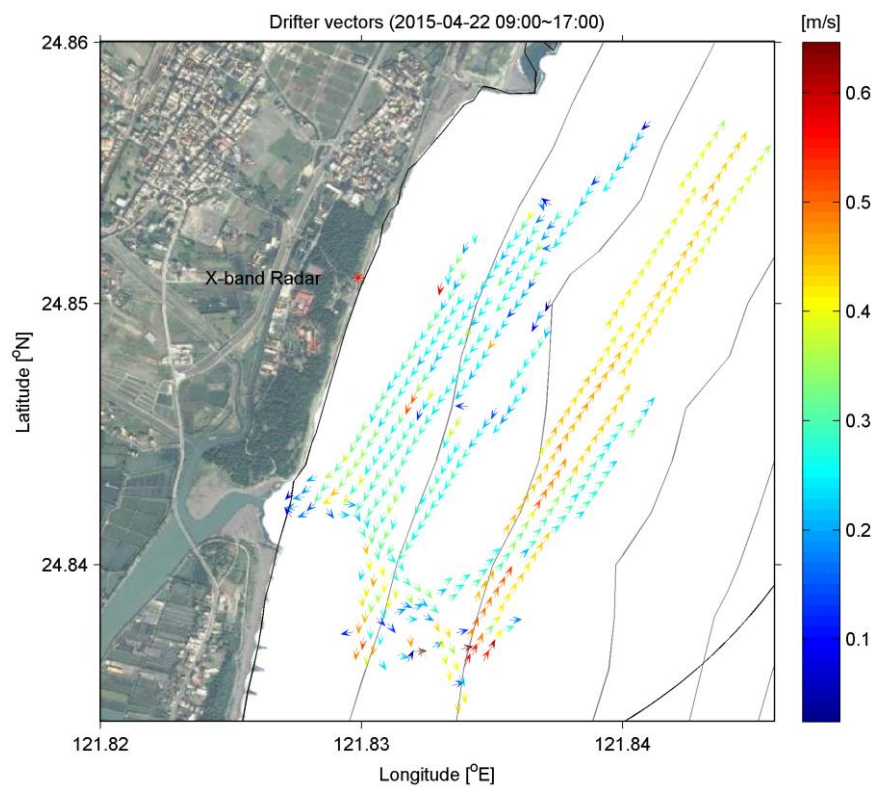


圖6 漂流浮球陣列觀測之海表流場

**104 年天氣分析與預報研討會\_摘要與全文投稿資訊**  
(填表範例如下，請依式提供)

資訊(information)	內容(content)/論文主題與報告方式勾選 (□)
作者(author)	錢樺、鄭皓元、林昭暉、張瑀峻、呂理弘
文章題目(title of paper)	以同調性微波雷達監測近海海象之應用與驗證
e-mail/電話(phone) /地址(address)	hchien@ncu.edu.tw / (03)4227151#6569 / 桃園市中壢區中 大路 300 號國立中央大學科一館 S348 室
<input type="checkbox"/> 大氣監測與分析 Monitoring and Analysis on Atmosphere <input type="checkbox"/> 天氣模擬與預報 Weather Simulation and Forecasting <input type="checkbox"/> 氣候監測與預報 Monitoring and Prediction on Climate <input type="checkbox"/> 氣象防災及氣候調適應用 Applications on Meteorological Disaster Mitigation and on Climate Adaptation <input checked="" type="checkbox"/> 海象測報與應用 Observation, Prediction, and Applications on Marine Meteorology <input type="checkbox"/> 氣象交通應用 Meteorological Applications on Transportation <input type="checkbox"/> 極短期災害天氣監測、分析及預報 Monitoring, Analysis, and Prediction on Very Short-Term Hazardous Weather	
<input checked="" type="checkbox"/> 口頭報告(oral) <input type="checkbox"/> 張貼論文(poster)	

\*張貼論文者也請勾選論文主題