

長程海象雷達(陣列式岸基波流雷達)建置現況

許皓淳¹、尤心瑜²、周思運¹

中央氣象局

第四組¹、馬祖氣象站²

摘要

臺灣四面環海，近年來相關法令鬆綁，海岸解嚴，在「藍色革命、海洋興國」的海洋政策之下，開放兩岸客輪直航，擴大商機及就業機會。可是由於海峽風浪瞬息萬變，加以海上觀測資料不足，每年都有漁船、舢舨、膠筏，甚至數千至數萬噸級貨輪的船難事件發生。

中央氣象局為「順應氣候變化，預防海洋與海岸災害」，於 104 年提報「強化臺灣海象暨氣象災防環境監測」計畫，其中子計畫「建置岸基波流雷達觀測網」重要工作項目之一，就是要分別在彭佳嶼島建置 2 站與東莒島建置 1 站長程海象雷達(陣列式岸基波流雷達)，並結合現有之海域浮標監測站，由點到面全方位即時監測臺灣海峽北部海域環境變化。完成之後除可提升災防預警能力，提供藍色公路資訊外，也可直接應用於海域航行及遊憩活動，提升兩岸間日益密切往來客、貨運輸的航行安全。

本計畫自 104 年起分年編列預算並積極執行，預計自 108 年起，分別在彭佳嶼完成 1 座大型與 1 座中型長程海象雷達，109 年底前在東莒完成 1 座中型長程海象雷達，並進行兩次漂流浮標驗證實驗。

「建置岸基波流雷達觀測網」計畫原本撰寫的名稱為「陣列式岸基波流雷達」，雖為海洋界學者熟悉，但卻不為氣象界學者熟悉，爰奉本局葉局長指示改稱為「長程海象雷達」。本文將介紹長程海象雷達(陣列式岸基波流雷達)截至目前已執行之工作項目，更期待大氣與海洋學界各位先進提供指正及建議，俾便中央氣象局於 109 年完成建置後，能及時將產品提供給預報單位及學界參考使用。

關鍵字：長程海象雷達、陣列式岸基波流雷達、

一、前言

金馬戰地解嚴，國軍部隊撤離之後，金馬地區的經濟頓時蕭條。在馬英九總統執政期間，提出「藍色革命、海洋興國」的海洋政策之後，大幅鬆綁法令並開放海岸遊憩。除了開放兩岸客輪直航外，也鼓勵臺灣地區民眾前往金馬地區觀光旅遊，以擴大當地居民的商機及就業機會。

民國 97 年行政院海洋政策白皮書中「培育海洋人才深耕海洋科研」目標策略與工作要項內容中，曾提及「有效運用海洋科技資源促進海洋資訊之整合與交流，提供方便且容易操作之海洋資料搜尋與利用網路介面」；「建立海洋環境監測能力，深入研究海洋與自然資源及災害之關連性，並應用於防災、環保及經濟發展等民生議題」。98 年第八次全國科學技術會議總結報告中，與會專家學者也特別就「結合科技能量，促進永續發展」之議題，提出「海域資源保育與利用，加速建構海洋長期觀測網與預報服務平台，完備天然災害預警、海域資源利用與環境保育之基礎架構，提升颱風監測、波浪與海岸溢淹預報能量」之具體建議內容供政府作為施政參考。民國 99 年 7 月 6 日行政院「海洋事務推動小組」第四次委員會決議事項更指出：「鑒於海洋環境與氣候變遷彼此牽動，需長期且穩定之海洋環境變化監測體系，並成立作業化支援船隊，爰決議請交通部研議海洋環境監測與防災中長期計畫」。

但是金門、馬祖與澎湖等地區，受限於空運能量的不足，大部分前往上開離島地區的客、貨交通仍有賴海運。惟臺灣海峽風浪瞬息萬變，加以海上觀測資料不足，每年都有漁船、舢舨、膠筏，甚至數千至數萬噸級貨輪的船難事件發生，例如：民國 99 年 8 月 8 日，客輪海洋拉拉號，因風浪變化快，在臺灣海峽發

生船艙撕裂落海嚴重意外，危及船上 300 名乘客的生命安全。

爰此，中央氣象局為「順應氣候變化，預防海洋與海岸災害」之海洋政策，「對於氣候變化可能產生之衝擊，加強研究和國際交流，整合海陸空偵防能力，研擬順應氣候變遷和因應海洋災害之體系，以減少民眾和自然資源之損失」之內容，於 104 年提報「強化臺灣海象暨氣象災防環境監測」計畫並奉准執行。

其中子計畫「建置岸基波流雷達觀測網」計畫內容包括兩大項，一為在北部沿海地區建置 4 部固定式與 1 部移動式「近岸海象雷達」，另一項即為在臺灣海峽北部海域建置固定式「長程海象雷達」(或稱「陣列式岸基波流雷達」)，並結合現有之海域浮標監測站，由點到面全方位即時監測海域環境變化，希望能提升災防預警能力，包括藍色公路資訊外，也可直接應用在兩岸日益密切往來客、貨運輸的航行安全。

二、計畫內容概述

「長程海象雷達」主要是利用遠距遙測的雷達觀測技術來監測大範圍海域的風、波、流場，不僅不受日夜變化的限制，又可以密集監測二維平面的風、波、流分布，近幾年已在國際上逐漸受到重視。目前常見的技術，主要是利用陣列式岸基高頻(High Frequency；HF)雷達觀測技術來觀測數十公里甚至到數百公里大範圍的流場。「長程海象雷達」(陣列式岸基波流雷達)建置計畫包括：在彭佳嶼島與東莒島兩地共 3 組陣列式長程風波流雷達站，並完成資料驗證與資料傳輸等系統架構。

計畫執行的項目包括：

1. 「陣列式岸基測波儀觀測系統」採購

本採購案包括「製造、安裝多組感應器及提供系統整合」以建立一個海洋波浪及洋流觀測系統(the Oceanographic Observation System)，這系統包含一座大型的陣列天線雷達及兩座中型陣列天線雷達。且此系統須能整合多個不同性能的越地平線陣列天線測波、測流雷達及資料品管輔助雷達。

每一個遙感觀測儀器子系統除了雷達本體外都必須包含支援作業的項目，如：作業機房、通訊、作業控制(局地 local/遠端 remote)、電力、資料儲存、資料展示及資料提供等。當然也必須包含整合多雷達的資料品管、分析、計算及展示整合海象觀測結果的子系統。

2. 資料驗證及整合測試

要求得標廠商必須執行 2 次海面觀測與地面岸基 HF 雷達的對比實驗。每一次現場雷達與海面觀測的對比，必須包含波浪儀(或資料浮標；Data Buoy)及 GPS Drifter 波流觀測的對比。

以東莒為例，得標廠商必須在第 1 次技術討論會議(TCMM1)中說明(1)所欲使用測波儀(或資料浮標)的觀測原理及詳細規格；(2)必須說明使用 Drifter 的原理及技術規範並提出 Drifter 在水工實驗室內對不同流速水的觀測誤差；(3)必須在對比實驗計畫書內說明佈放策略與船隻航行的方式，以供中央氣象局設計模擬 Drifter 漂流的方式。

在實際進行對比實驗時，必須包含：

(1)波浪觀測對比：測波儀(或資料浮標)必須在 2 個不同的地點，進行 5 天以上的測波觀測。

(2)測波儀(或資料浮標)的觀測必須能觀測出有效波高、主要波向、與波浪能譜，以供和雷達觀測做

比對。每一個地點的觀測至少要持續 72 小時。以每一小時一筆計算，總數不得小於 144 筆，每一定點的觀測筆數不得小於 48 筆。

(3)海表流場比對觀測：得標廠商必須提供漂流浮標(Drifter)並進行拉格郎日(Lagrangian)的軌跡追蹤。此項觀測必須進行至少 2 個不同地點的軌跡追蹤，兩個佈放起始點至少要相距 15Km。

(4)實地洋面 Drifter 佈放時，每次總數不得小於 40 顆，佈放必須在雷達有效的分析範圍內。在每一個要分析的有效雷達觀測解析元素內至少包含 3 個 Drifter。每一次佈放觀測，觀測範圍至少包含 5 個有效雷達觀測的解析元素。

3. 建置電離層監測系統

陣列式岸基波流雷達屬於高頻波段，當電離層各副層或者是電子密度不規則體出現的高度落在陣列式岸基波流雷達掃描距離範圍時，海洋回波訊號會受到電離層訊號的干擾，導致頻譜受到汙染，無法正確解析出洋流或者是浪高，造成判讀上的困難及資料品質的劣化。

為了避免陣列式岸基波流雷達資料判讀錯誤，故另案建置「電離層監測系統」以做為陣列式岸基波流雷達的輔助設施；除提供電離層相關資訊，做為陣列式岸基波流雷達的資料品質校驗外，亦可提供即時電離層監測資料給局內相關單位使用。

此建置案包括(1)採購「電離層監測系統」1 套，包括發射站台及接收站台；(2)在接收站台建置資料展示系統；(3)在中央氣象局指定之陣列式岸基波流雷達輔助系統站建置資料展示系統；(4)若廣區域通訊線路無虞時，在中央氣象局局本部建置此「電離層監測系統」之遠端監視與控制狀態及資料接收、產品產生及

資料展示的能力。

三、技術方法與理論基礎

二次大戰後，原本屬於軍事用途的雷達已全面被應用在氣象觀測上，例如利用 S 波段都卜勒氣象雷達對超視距外的天氣系統進行 24 小時全方位的監測並提供氣象人員發布天氣預報的參考。

船舶用的航海雷達則是利用電磁波反射海面或船體之粗糙性質而得知陸地、島嶼或航行船舶等資訊來增進船隻航行安全。然而，在做為船舶導航時，海浪雜斑常會干擾目標物的辨識，因此常被視為雜訊而加以濾除。若是能對這些海浪雜斑妥善偵測，即可對海浪、海流加以分析及利用。

「長程海象雷達，或稱為陣列式岸基波流雷達」，就是利用陣列式天線(Phase Array Type)對海面發射高頻(High Frequency, HF)的電磁波，並利用都卜勒效應來獲得超視距外的海表面海流訊息。再由一階資料解出背景海流(Currents)，二階資料解出 Orbit Velocity，同時計算出波浪(Waves)的波高、波向與週期；也可針對超視距外特定目標進行定位及判別。

「陣列式岸基波流雷達」的理論基礎是：蒐集入射的雷達電磁波波長與海水表面波長所產生的布拉格散射(Bragg scattering)之強烈反射回波，再利用波譜或影像處理等方法分析回波強度分布的灰階值，以獲得海面回波之向量波數與角頻率關係。最後利用波浪分散關係式，就可推算包括波浪之週期、波長、海表面之流速、流向等資訊。

不過，海岸地區受到陸地、海洋與大氣的交互作用，加上近岸海域的水動力、水文條件與海洋生地化

特性，在利用回波強度分布與波浪分散關係所獲致之訊噪比而演算海面物理資訊時，仍需參照現地經驗運算式，才能正確利用電磁波於海面的背向散射訊號所傳遞的相位變化資訊，以獲得正確、高解析的海洋表層水流速度，並據此推算出波浪水位、週期、方向波譜與海面流場分布等。

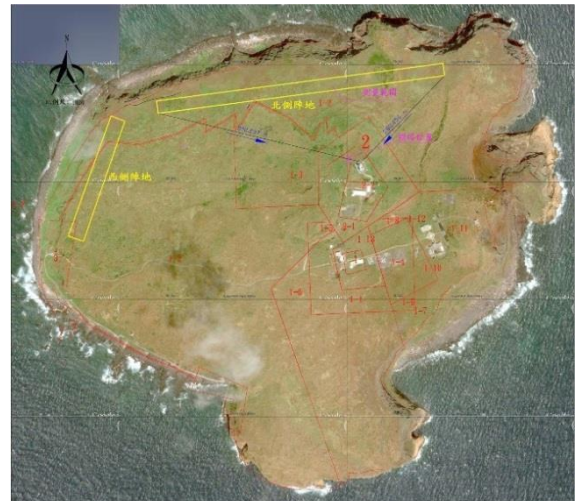
四、陣列式波流雷達的功能需求

「陣列式岸基波流雷達」計畫，主要是為了改善臺灣北部海域，尤其在馬祖列島至臺灣本島的北部、東北部及西北部海域往來航行船隻及漁船的作業安全。因此，選在彭佳嶼島及馬祖東莒島分別建置。

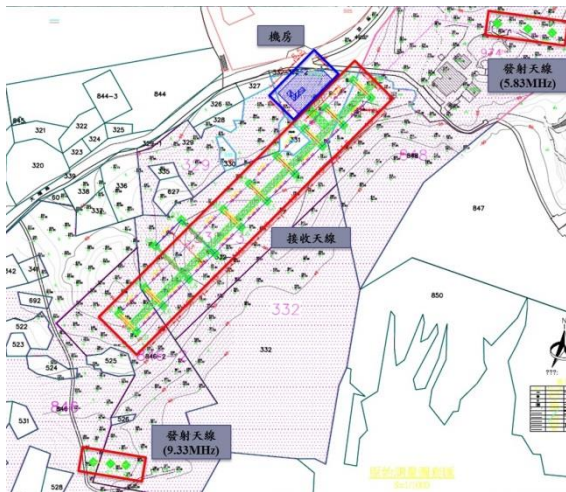
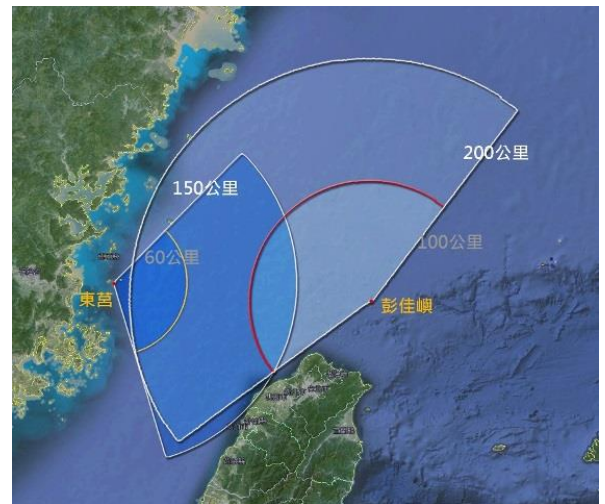
兩處陣地及其主要功能需求概述如下：

(一)彭佳嶼陣地：

在彭佳嶼島北側建立一座大型陣列天線，以及在彭佳嶼島西側建立一座中型陣列天線。兩座陣列天線均使用 HF(High Frequency)頻率，配置具 FMCW (Frequency Modulated Continuous Waveform) 及 FMICW (Frequency Modulated Interrupted Continuous Waveform)發射功能的發射機，來達到兼具有波浪觀測及洋流觀測能力的岸基風波流雷達。



彭佳嶼陣地具備 2 組接收天線陣列，2 組 HF/(FMCW/FMICW)發射機。兩座陣列雷達所需的 2 組頻率，已獲得 NCC 同意使用 9.33 MHz 及 5.83 MHz。每組陣列天線觀測涵蓋範圍為 120 度，在結合兩組陣列雷達後的觀測涵蓋範圍總角度預計可達 165 度以上，洋流觀測範圍預估可達 200 公里，波浪觀測則為 100 公里。



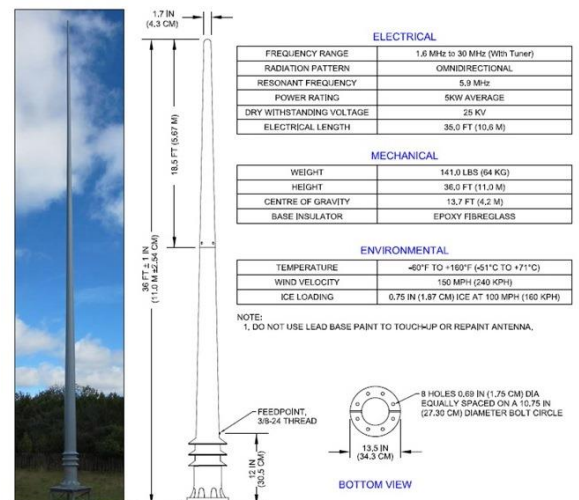
(二)東莒陣地：

配合彭佳嶼島雷達站建置的波流雷達，中央氣象局在臺灣海峽的另一側，也就是馬祖列島的東莒島東側建立另一座中型陣列天線雷達，使用頻率也獲 NCC 核准為 9.33 MHz 及 5.83 MHz 兩組。與彭佳嶼一樣，兼具有 FMCW 及 FMICW 發射功能，及波浪觀測及洋流觀測能力。完成後，將可精準的描繪出近馬祖海域的海象狀態。

惟受限於建置基地的取得，東莒雷達完成後之觀測涵蓋範圍的角度預估在 120 度，洋流觀測範圍約為 150 公里，波浪觀測預估為 60 公里。

(三) 發射天線模組要求：

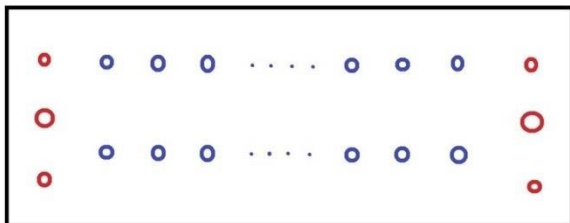
- 1、每一陣地有 2 組獨立的發射天線，以對應不同的發射頻率，2 組發射天線至少相距 180 公尺。每一組發射天線至少有 3 支天線(Yagi-Uda 天線組)，天線高度以 1/4 波長來計算。
- 2、中型雷達在 FMCW 作業模式下，每一發射天線組至少會對應 8 個接收天線組。大型雷達在 FMCW 作業模式下，每一發射天線組至少會對應 16 個接收天線組。
- 3、天線的抗風能力必須能達到 65 m/sec，避雷設計必須能滿足 Quarter wave-length Shorted stub 規範。
- 4、天線須為可拆卸，提高維護效能。



(四) 接收天線模組要求：

- 1、中型陣列的接收天線為 10~16 組，大型陣列的接收天線為 20~24 組。每組 2 支天線，以區別不同角度進入的電磁波(半 2 維陣列)。
- 2、使用 Digital Beam Forming 技術確定訊號來源。
- 3、每一支天線元件必須能夠個別更換，而不影響接收功能。
- 4、抗風能力必須達到 65 m/sec。
- 5、每一接收天線均有獨立的接收機。
- 6、接地設計必須能以地網緊密連結。

發射及接收天線排列及配置方式之參考示意圖如下



紅色圈圖：發射天線組
藍色圈圖：接收天線組

(五) 作業及維運方式：

- 1、作業模式必須設計成無人、可遠端操控。
- 2、RPG 必須為容錯的雙備援系統：當主作業 RPG 故障時，備援 RPG 能自動或由遠端遙控啟動。
- 3、雙發射機設計：每一雷達站的每一發射機皆能雙頻作業，備援發射機能自動或由遠端遙控啟動。
- 4、通訊雙路由設計：針對環境條件較為惡劣的彭佳嶼兩個雷達陣地的通訊皆設計為雙路由。
- 5、可以在取得外部訊號(大氣電離層狀態)時，自動比對，自動控制並切換作業中的 RF(Radio Frequency)。

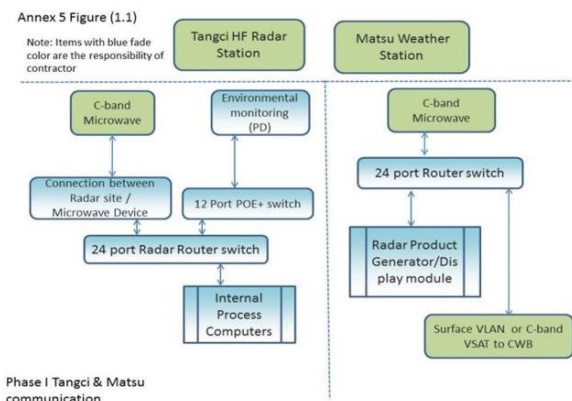
(六) 雷達產品要求：

- 1、船隻追蹤：船隻位置產生週期為每 30 秒產生 1 次，且產品遞交時間不超過 10 秒。
- 2、海面洋流分析：表面洋流之產生週期為每 3~4 分鐘產生 1 次，且產品遞交時間不超過 60 秒。可提供間隔 3~4 分鐘、5 分鐘(每小時 12 次)、10 分鐘(每小時 6 次)等三種更新頻率。
- 3、海面波浪分析：表面海浪(示性浪高)之產生週期為每 10 分鐘產生 1 次，且產品遞交時間不超過 60 秒。可提供間隔 10 分鐘(每小時 6 次)、15 分鐘(每小時 4 次)、20 分鐘(每小時 3 次)等三種更新頻率。
- 4、IMC 測站代號：每 20 分鐘自動發送。
- 5、能提供兩陣地 3 部陣列式岸基波流雷達的聯集區域及交集區域之 2 維海面洋流分析與海面波浪分析之整合資料。

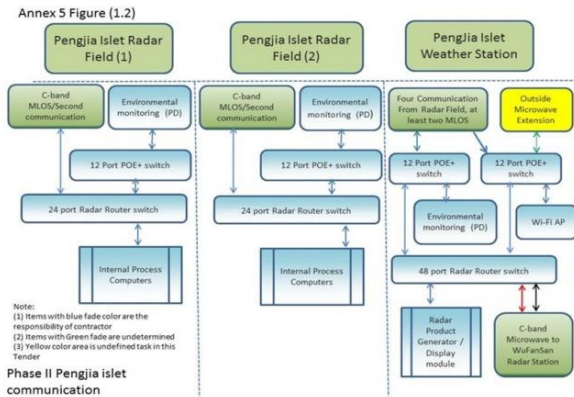
(七) 作業及操作設計：

3 個雷達陣地均設計為無人站台，在作業操控設計上是以位在臺北的局本部為主要控制中心。但由於近端監控的需要，亦選擇在馬祖氣象站、彭佳嶼氣象站以及五分山氣象雷達站設置 3 個就近輔助作業及控制系統站台。3 個雷達陣地與輔助站台之間的通訊系統架構分別如下：

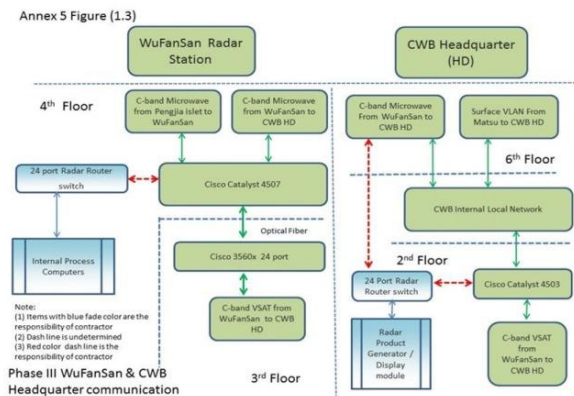
東莒雷達陣地與馬祖氣象站



彭佳嶼雷達陣地與彭佳嶼氣象站



五分山氣象雷達站與局本部



五、漂流浮標及整合測試

為確保資料的正確性，在分別完成東莒陣地及彭佳嶼陣地的建置工作後，都必須進行包括波浪儀(或測波浮標)及漂流浮標的海面實地觀測與雷達觀測的資料比對與驗證。

- 1、採用微型浮標，並於指定海域佈放 40 個以上的浮標且形成陣列，以滿足驗證需求。
- 2、漂浮浮標數量必須足以獲得海面流場的空間分佈

並與雷達量測結果驗證。

- 3、佈放的漂流浮標必須經過斷面水槽造流及造浪，且以流速計或雷射(或微波)流速儀進行校正過。

(一) 漂流浮標規格必須符合：

- 1、測波用浮標：直徑 26 或 35 公分的資料浮標，內建慣性姿態儀、雙星導航接收天線，衛星資料傳輸器與電池。觀測項目需包括：示性波高、週期、波向、一維能譜、方向波譜。每 30 分鐘觀測一次，透過鈹衛星傳輸即時資料，並匯入資料中心電腦展示、分析。
- 2、測流用漂流浮球：直徑 15 公分的微型漂流，雙星導航定位，海上作業能同步使用大批量浮球，用以獲得更多比對樣本點，觀測表面流場。

(二) 東莒場測驗證要求：

- 1、波浪儀(或資料浮標)需於 2 個不同的地點被放置，執行總共 5 天之波浪觀測。
- 2、2 個位置佈放起點至少相距 15 公里。每個位置觀測至少持續 72 小時，且以每小時產生資料為 1 筆計算，總數至少 144 筆。
- 3、表面洋流觀測漂流浮標於每次之佈放總數至少 40 顆。雷達觀測之每一個解析元素內，至少包含 3 個漂流浮標。
- 4、每個有效的漂流浮標追蹤觀測時間可持續至少 120 小時。

(三) 彭佳嶼場測驗證要求：

- 1、波浪儀(或資料浮標)需於 12 個不同的地點被放置，執行總共 7 天之波浪觀測。
- 2、每個位置觀測至少持續 156 小時，且以每小時產生資料為 1 筆計算，總數至少 1800 筆。
- 3、表面洋流觀測漂流浮標於每次之佈放總數至少 50

類。雷達觀測之每一個解析元素內，至少包含 3 個漂流浮標。

- 4、每個有效的漂流浮標追蹤觀測時間可持續至少 144 小時。

六、未來的挑戰與結語

陣列式岸基波流系統雖然有相當扎實的理論基礎，但畢竟是個全新的概念。在建置過程中，我們也陸續發現有些「比想像中更困難」的問題會浮現，包括：

- 1、在離島中如何維持電力、通訊、網絡、支援環境場的穩定？
- 2、在無人且自動作業的環境中，如何偵測到每一個系統出現異常時，可以自動提出告警並切換備援系統？
- 3、如何驗證每一個獨立的發射及接收天線場的相位都是正確的？

這些問題看似簡單，但又一環牽動一環，隨著系統的布建，也是建置團隊未來更大的挑戰！

長程海象雷達(陣列式岸基波流雷達)預計到 109 年才能全部完成。預期將可即時計算出臺灣海峽北部海域上的(1) 海流的平均波高、平均波長、尖峰週期、主波向；(2) 波浪波數、波譜密度、頻率、方向；(3) 表面流之東西向流速分量、南北向流速分量。

建置完成之後，可將臺灣北部海域波浪的監測由點推向面，全方位守視臺灣海峽北部海域波浪的變化，並加強鄰接海域活動的安全，同時也可以提高臺灣海峽北部海域海象預報有效解析度達 1 公里。若再結合其他的海象、洋流數值預報模式，預期可將海洋環境的預報時間延長至 6 日，使海岸災害預警時間提前 5

天，也將能更有效提高政府整體災害防救效率，並減少海岸撤離與海洋救難成本。

參考文獻

- 1、97 年，行政院海洋政策白皮書。
- 2、98 年，第八次全國科學技術會議總結報告。
- 3、99 年，行政院「海洋事務推動小組」第四次委員會決議事項。
- 4、行政院(2002)，「聯合國氣候變化綱要公約，中華民國臺灣國家通訊」。
- 5、104 年，行政院核定「強化臺灣海象暨氣象災防環境監測」計畫。
- 6、尤心瑜、許皓淳、周思運(2016)，「臺灣北部海域風波流雷達建置計畫」，天氣分析與預報研討會。