

超視距雷達發展與運用

The Development and Application of Over-The-Horizon Radar

海軍少校 陳柏勳

提 要：

- 一、隨著現代戰爭各型武器性能不斷提升，超視距遠距離攻擊、匿蹤武器設計、低空突襲等軍事科技成為顯學，而這些技術也成為了防空作戰上的一大隱憂，因此世界各強權紛紛開始發展超視距雷達。
- 二、超視距雷達依據電磁波傳播方式，又可區分為天波超視距雷達和地波超視距雷達兩類，前者利用電離層折射，後者利用地球表面繞射，探測視距外的艦船與低空飛行的目標，藉以彌補一般雷達的低空盲區。

關鍵詞：超視距雷達、高頻天波雷達、高頻地波雷達

Abstract

1. With the developments of all kinds of modern weapons, long-range BVR (Beyond-Visual-Range) attack, stealth weapon design and low-altitude raid have become prominent subject nowadays. These new technologies have become a major threat when conduct anti-air warfare. As a result, many countries around the world start to develop over-the-horizon radar.
2. The over-the-horizon radar mainly can divide into two groups, the High Frequency Sky Wave Radar and the HF Surface Wave Radar, according to their propagation methods. The former radar uses ionospheric refraction of the sky. The later radar uses diffraction effect from earth surface. They can detect ship and low-flying targets beyond visual range to compensate the blind area of normal radar.

Keywords : Over-The-Horizon Radar, OTHR、High Frequency Sky Wave Radar、HF Surface Wave Radar

壹、前言

隨著現代戰爭各型武器性能不斷提升，超視距遠距離攻擊、武器匿蹤設計等軍事科技成為顯學，而這些技術也成為了防空作戰上的一大隱憂，因此世界各強權紛紛開始發展超視距雷達，藉以即早掌握目標，延長預警時間。

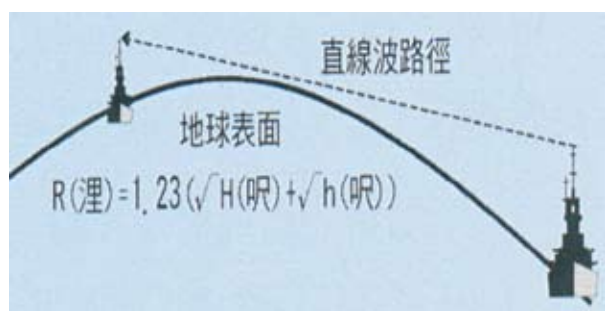
超視距雷達依據電磁波傳播方式，可區分為天波超視距雷達(Sky Wave Over-The-Horizon Radar)和地波超視距雷達(Surface Wave Over-The-Horizon Radar)兩類，前者利用電離層折射，後者利用地球表面繞射，探測視距外的艦船與低空飛行的目標，藉以彌補一般雷達的低空盲區。天波雷達及地波雷達各有不同的優缺點，試以本文針對天、地波雷達的原理、傳播特性及應用上的優缺點作一概述。

貳、天波雷達系統介紹

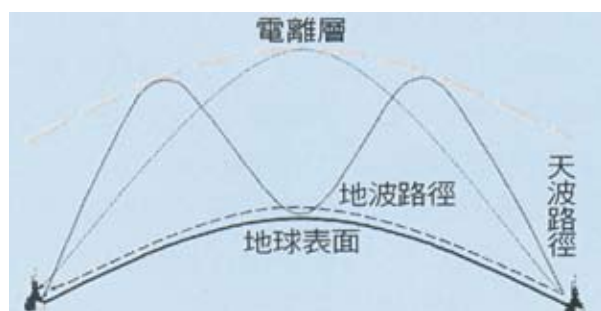
在我們所居住的地球上空，被一層厚厚的大氣層包圍著，地表上空50公里到幾百公里的範圍內，大氣中部分氣體分子由於受到

太陽光的照射產生電離現象，產生帶正電的離子和自由電子即稱之為電離層，而高頻天波雷達(High Frequency Sky Wave Radar)就是利用電離層的反射使電磁波能夠傳播到遠方藉以探測目標，實驗證明電離層對於不同波長的電磁波有出不同的傳播特性，電磁波的波長越短，電離層對它吸收的越少而反射的越多。因此短波(波長範圍10至100公尺，頻率3兆赫(MHz)到30兆赫(MHz)最適合以天波的形式傳播，可被電離層反射到幾千公里以外(如圖一a, b)。

天波雷達系統組成主要該分為四：發射裝置、接收裝置、頻率管理系統與控制中心四個部分。發射裝置主要組成為天波雷達的發射機以及部分頻率管理系統中的發射單元，通常天波雷達發射機保持較高平均發射功率(約200至1,200kW)，發射波形採用調頻連續波(Frequency-Modulated Continuous Wave; FM-CW)，而雷達發射機具有數個發射天線陣列，用以對應不同工作波段，一旦外在環境或是發生干擾狀況，可適時透過環境觀測得到的電離層資訊，即時調整合適的發射頻率。



圖一a 一般雷達傳播方式



圖一b 天波與地波雷達傳播方式

資料來源：姜誌成，〈中共超視雷達之研究〉，《海軍學術月刊》，第39卷，第6期，2005年6月。

接收裝置用以接收反射電磁波以及監測系統接收設備，此外尚包含了接收天線與終端顯示裝置等。值得一提的是天波雷達系統中發射站與接收站通常是位於不同位置的，且兩者間的距離多超過100公里以上，此外接收天線的陣列更大，通常分佈可達數平方公里。接收天線系統中的每一線單元設有一數位接收機，其接收的資料將送至高速信號處理機，完成目標檢測與電離層環境監測狀況，而雷達信號處理機透過長時間的信號積累與都普勒濾波器來解算運動目標回波，藉以分析動態目標航向與航速。

頻率管理系統的主要功用係依據電離層監測狀況與外部環境干擾情形來即時選擇天波雷達工作頻率與發射調變波形，藉以確保天波雷達電磁波的相容性。操作控制中心的任務係負責整個天波雷達系統運作，其位置可以遠離雷達發射和接收站，或者是與接收站設在一起。此外操作控制中心尚負責高頻雷達頻譜管理與環境狀況監控，藉以選擇最佳的操作頻率。

天波雷達的優點如下所述：

一、雷達探測距離遠，涵蓋範圍大

天波雷達藉電離層的反射使電磁波能傳播到遠方以探測目標，探測距離可達1,000至4,000公里。

二、超低空偵測能力

天波雷達電磁波透過電離層的反射行進，因此可以克服地球曲度限制，探測低空飛行或隱在山脈背後的目標。

三、反反輻射飛彈能力

現今的反輻射飛彈尋標器受限於尺寸關

係，尚無法有效克制天波雷達，因此毋須擔憂無法察覺來自反輻射飛彈的攻擊。

四、可有效偵測匿蹤飛機

現今匿蹤飛機等武器系統主要係反制雷達頻率為0.2~29千兆赫(GHz)、操作波長在釐米波段範圍，然而天波雷達的操作波長為米波波長，使得匿蹤飛機所使用的雷達波吸收材料失效；此外現今匿蹤飛機的尺寸與天波雷達的波長相近，使得這些匿蹤目標的雷達回波反射最強，進而失去了匿蹤的效果。因此對於探測遠距離、低空入侵的隱形轟炸機與攻擊機，天波雷達是目前最有效的偵測裝置。

天波雷達做為一遠距離的預警設備雖然具有許多優點，但是其缺點卻也包括了：

一、容易受到氣候影響

大氣中的電離層高度、密度和厚度容易受到太陽活動影響，並呈現時間和季節性變化，因此天波雷達系統需要對環境因素進行即時評估以選定合適的工作頻率。

二、外在環境干擾較多

在高頻波段(3-30MHz)中，人為雜訊、大氣雜訊甚至是來自宇宙的雜訊對於接收機靈敏度將產生很大影響。此外現今高頻頻譜窄，使用用戶相當多，故天波雷達必須即時選擇乾淨頻帶範圍以避免和其他頻率相互干擾。

三、對於慢速目標不易掌握

因大氣中電離層的非平穩狀況會對天波雷達的回波信號產生隨機相位擾動，進而導致都普勒頻譜展寬，尤其是對雜波頻譜的展寬將嚴重影響慢速目標的偵測。此外在某些

工作頻率中，雷達信號可能經不同的電離層反射(多徑傳播)，也將會影響對於慢速目標的偵測。

四、目標精準度低，無法探測近距離目標

天波雷達係透過電離層反射，所以發射時係以一發射仰角來進行反射，對於偵測目標僅能解析目標方位和距離資訊，無法得知目標的高度，且所獲目標精準度低，僅能運用在早期預警上。另外天波雷達利用電離層反射傳播，存在跳躍距離效應，故其最小有效距離在1,000公里以上，對於1,000公里以內的目標無法測得，故存在近距離盲區

五、天線陣列龐大，易遭敵人偵知

天波雷達系統的發射與接收天線陣列龐大，因此世界上僅有國土面積較大的國家(如美國、中國大陸、俄羅斯等)才會考慮發展天波雷達。

參、天波雷達系統應用

一、美國AN/FPS-118、AN/TPS-71超視距雷達

AN/FPS-118超視距雷達系統起源於1970年代，為因應冷戰時期大批前蘇聯的遠程戰略轟炸機，FPS-118超視距雷達可以提供早期預警。該型雷達主要組成為系統控制中心及分隔兩地的發射站與接收站(兩站台相隔約160公里)。該型雷達的操作頻率為5至28兆赫(MHz)，可區分為6個工作頻段，搜索距離最遠可達3,300公里。美國空軍最初分別在緬因州及俄勒岡州分別各建立了一套 AN/FPS-118超視距雷達系統。每座系統分由3個

搜索範圍為60度的雷達陣列所組成，藉以擔負整個東西海岸的戰略預警任務。

AN/FPS-118超視距雷達系統雖然偵測距離最遠可達3,300公里，然而該系統發射與接收天線陣列龐大(發射天線陣列長達1公里；接收天線陣列長達1.5公里)，且受到電離層變化影響較大，加上高頻波段範圍干擾情形較為嚴重，故對於追蹤目標探測精確度相當的不理想，僅能做為早期預警使用。然而在冷戰結束後因不符作戰需求最終在2005至2007年間陸續拆除淘汰(如圖2a, b, c, d)。

AN/TPS-71超視距雷達則為美國海軍所發展的一套可移動式超視距雷達(Relocatable Over-the-Horizon Radar)，搜索範圍距離可達3,000公里左右，最初僅用以支援美國海軍艦隊，提供早期預警功能，藉以提供海上艦隊指揮官較長的反應時間。在1991年時首次部署於阿拉斯加阿留申群島的安奇卡島上，藉以監視舊蘇聯時期海岸飛機與船隻動態，然而隨著冷戰結束，該站在1993年時裁撤。後續遂轉用於海洋監偵任務，分別設置在維吉尼亞州及德州，偵測範圍涵蓋了整個墨西哥灣及南美洲北部，用以做為反走私毒品偵測利器(如圖3a, b)。

二、法國NOSTRADAMUS天波雷達

法國在1990年起即開始發展天波雷達系統，藉以掌握北大西洋周邊海空域目標動態，2003年成功研製了Nostradamus天波雷達系統，在2005年部署在巴黎附近。該型雷達使用Y型結構的天線陣列，操作頻率範圍6-28兆赫(MHz)，但是不同於多數的天波雷達系統，Nostradamus天波雷達接收與發射



圖二a AN/FPS-118系統涵蓋美國東西部海域



圖二b AN/FPS-118雷達發射站衛星空拍圖



圖二c AN/FPS-118雷達發射天線陣列

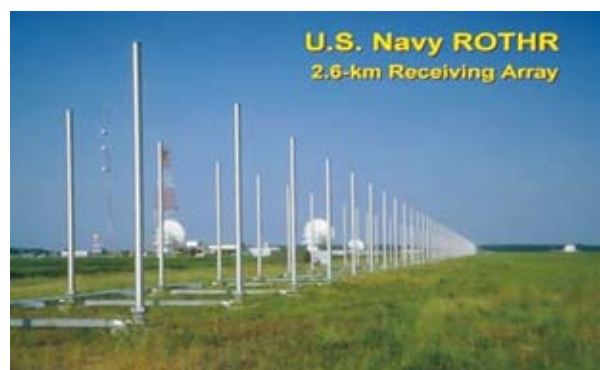


圖二d AN/FPS-118雷達接收天線陣列

資料來源：1. <http://www.fas.org/nuke/guide/usa/airdef/an-fps-118.htm>
2. http://www.interceptradio.com/wiki/index.php/OTHB_Radar

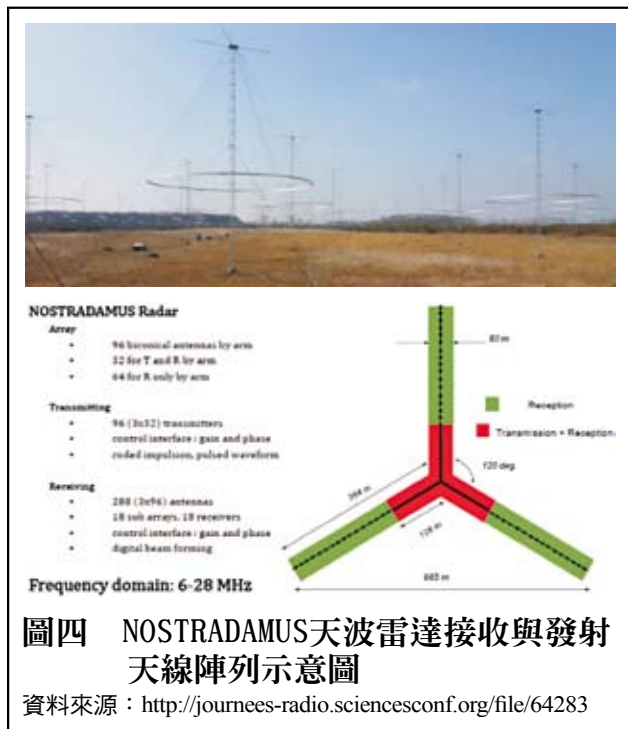


圖三a AN/TPS-71雷達站位置及涵蓋偵測範圍



圖三b AN/TPS-71雷達接收天線陣列

資料來源：http://en.wikipedia.org/wiki/Over-the-horizon_radar

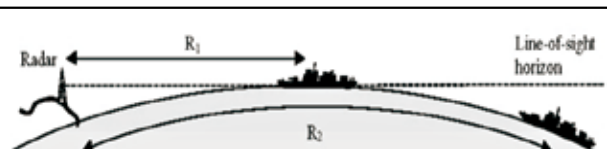


陣地均位於相同位置，搜索範圍為360度，搜索距離最遠可達2,000公里(如圖四)。

肆、地波雷達系統介紹

高頻地波雷達(HF Surface Wave Radar，簡稱HFSWR)係一種新興海洋監測技術，具備超視距、全天候、大範圍與低發展成本等優點，現在許多先進國家運用高頻地波雷達對自身專屬經濟海域(EEZ)進行監測，因此高頻地波雷達也被視為是一種有效監測的高科技手段。

高頻地波雷達利用高頻(3~30MHz)電磁波在導電海洋表面繞射傳播衰減小的特點，能夠超視距探測視距外的艦船、飛機等運動目標，其雷達偵測距離可達300公里以上，可以填補一般雷達較弱的遠距離偵測能力以及天波雷達的近距離偵測盲區。此外高頻地



波雷達利用海洋表面的散射，亦可由地波雷達回波獲得風浪、流場等氣、海象資訊(如圖五)。

地波雷達可用以探測水面目標，以及海上低空飛機與掠海飛行目標等，將逐步成為擔負各國岸對海警戒任務的主要雷達系統。地波雷達的優點包括了：

一、偵測範圍廣泛

地波雷達探測涵蓋面積通常可達數萬平方公里，其利用電磁波在導電海洋表面繞射傳播衰減小的特點，由發射天線向海面發射高頻無線電波，使電磁波貼著導電海水表面傳播可達超越海平面視距，並透過目標反射沿海面傳播回來的電磁波進而分析可得各種資訊。

二、提供長預警時間

以地波雷達做為遠端預警偵測，雖然其方位與距離解析度較一般雷達差，但是其超視距偵測的能力可以提供較長預警時間。

三、全天候操作的能力

地波雷達受到氣候環境影響較小，即使在颱風來臨期間仍可以操作。

四、可靠性高

地波雷達全數位化模組設計，使整體系統抗干擾能力和可靠性顯著增強，具備高度自動化可大大降低操作及維修成本。

高頻地波雷達現今多被運用於海洋環境監測領域，該型雷達具備覆蓋範圍大、全天候、即時性好、功能多、性價比高等特點，此外尚在氣象預報、防災減災、航運、漁業、污染監測、資源開發、海上救援、海洋工程、海洋科學研究等方面有廣泛的應用前景，相較於天波雷達的不穩定性，地波雷達現今已被各國廣泛運用於科學及軍事等相關領域。

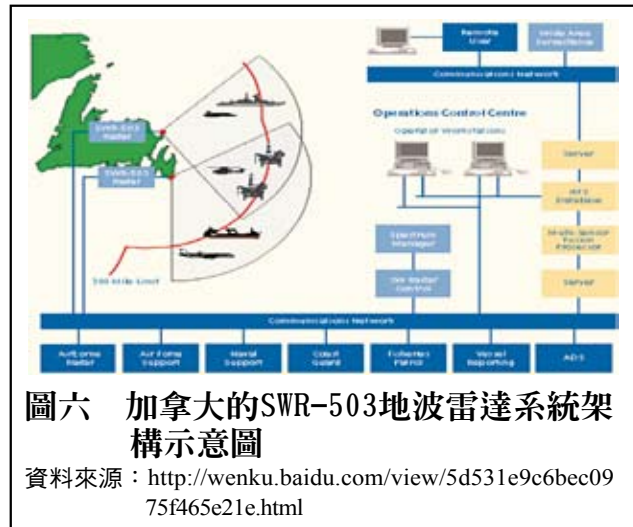
伍、地波雷達系統應用

一、加拿大SWR-503地波雷達系統

SWR-503地波雷達為美國雷神公司(Ra-
thion)與加拿大軍方在2000年時所共同發展
成功的高頻地波雷達系統，該型雷達設置於
加拿大的紐芬蘭島(Newfoundland)，主要用
途為大範圍的經濟海域監偵及防制販毒、走
私、海盜、非法捕魚及偷渡等活動，該型雷
達操作頻率為3-10兆赫，發射功率峰值為
16kW，平均發射功率為3.2kW，偵測區域為
120度的扇區，偵測距離可達400公里(如圖
六)。

二、德國 WERA 地波雷達系統

德國 WERA 地波雷達係由德國漢堡大學物理海洋研究所開發，並由 Helzel 公司製造，該型雷達最大發射功率 50W，最遠探測距離約 200 公里，研究學者在海岸邊設置多個 WERA 地波雷達系統，每個 WERA 地波雷達發射站由 4 根天線組成矩形陣列，而接收站分為 2 種，第一種由 4 根天線組成的矩形陣列，可用於監測海流，而另一種由 8 到 16 根天線所組成的單排陣列可以用於監測波浪和

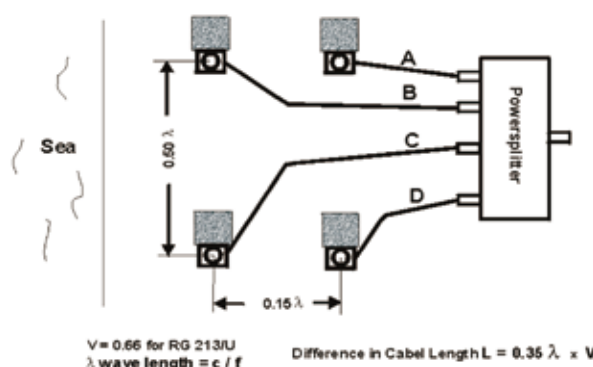


風向。由於單部雷達站僅能獲得海流等資料相對於雷達的單向資料數據，若要獲得真正的流場數據，需要2座以上的雷達站觀測數據，透過軟體運算方能獲得。WERA雷達系統在2000年10月首次實驗成功，至今已經在德國、英國、法國、美國、澳大利亞、義大利等國設置多個WERA地波雷達系統，用以做為海洋科學研究及海洋環境觀測(如圖七a, b, c, d, e, f)。

除了德國外，世界上許多國家現亦使用高頻地波雷達做為海洋環境監測的工具，舉美國為例，國家海洋和大氣總署(National Oceanic and Atmospheric Administration)主持的整體海洋觀測系統(Integrated Ocean Observing System)運用了多達142部的高頻地波雷達，分別建構在美國東、西部海岸，組成全美高頻地波雷達網路(U. S. HF Radar National Network)，藉以涵蓋東、西岸長達數千公里的海岸線，觀測東、西部海域的氣、海象資料，並運用在海洋環境研究、海上救援與搜索等用途(如圖八a, b)。



圖七a 由4根天線所組成的發射天線矩陣



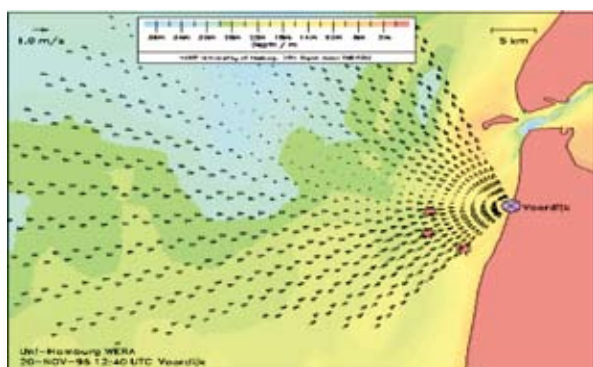
圖七b 發射天線矩陣設計示意圖



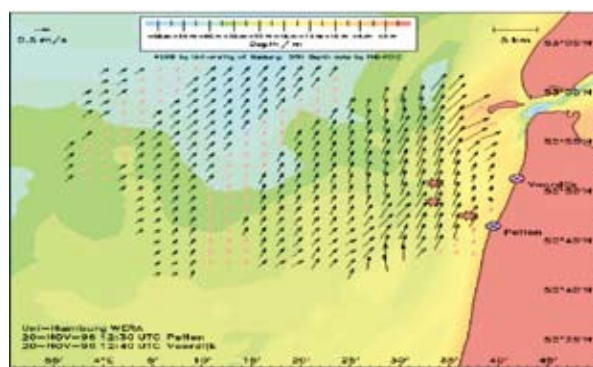
圖七c 由4根天線所組成的接收天線矩陣



圖七d 由16根天線所組成的接收天線陣列

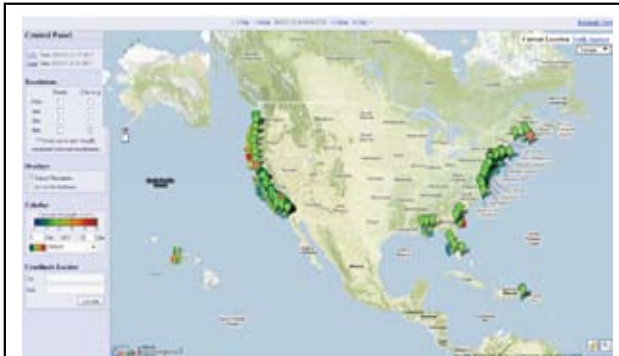


圖七e 單部WERA地波雷達所測得的徑向流場資料



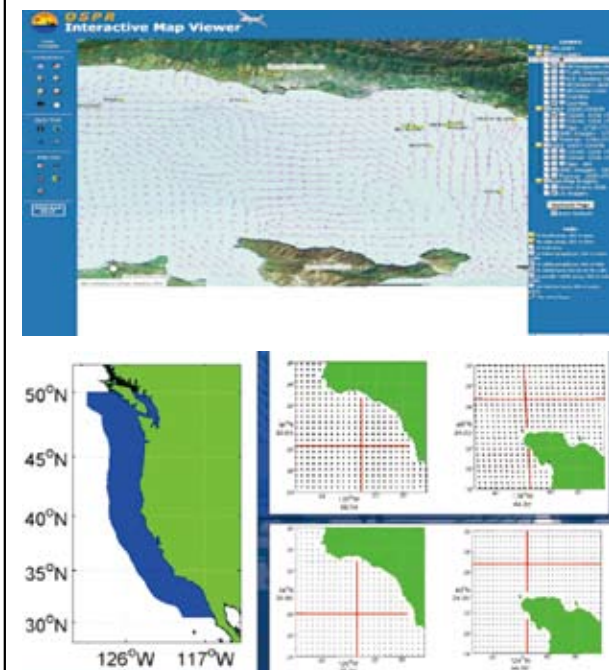
圖七f 由2部WERA地波雷達解算出海洋流場資料

資料來源：德國漢堡大學物理海洋研究所，<http://ifmaxp1.ifm.uni-hamburg.de/PETTEN.shtml>



圖八a 整體海洋觀測系統所建置的高頻地波雷達站示意圖

資料來源：NOAA, http://www.ioos.noaa.gov/globalhfr/hfrnet_datamangmnt_geo2013.pdf



圖八b 整體海洋觀測系統(I00)所觀測得到的加州沿海流場資料

資料來源：NOAA, http://www.ioos.noaa.gov/globalhfr/hfrnet_datamangmnt_geo2013.pdf

三、中國大陸OSMAR地波雷達系統、401型地波雷達

中國大陸的高頻地波雷達系統最早起源於1980年代，在中國大陸國家自然科學基金

和其他相關科技計畫的支持下現已迅速發展，在中國大陸眾多的大學及研究所之中，以哈爾濱工業大學、武漢大學及西安電子科技大學均有相當優異的研究成果，其中武漢大學OSMAR地波雷達系統發展最為成熟，其研究不僅運用在海洋環境觀測上，亦有相關技術運用在軍事用途，用以做為長距離目標搜索(如圖九a, b, c, d、表一)。

中國大陸自2006年至2007年間共建造了5座401型地波超視距雷達站，預計對空搜索距離可達500公里，對水面目標涵蓋範圍可達300公里，主要用途為提供空中及水面目標的早期搜索及預警(如表二)。

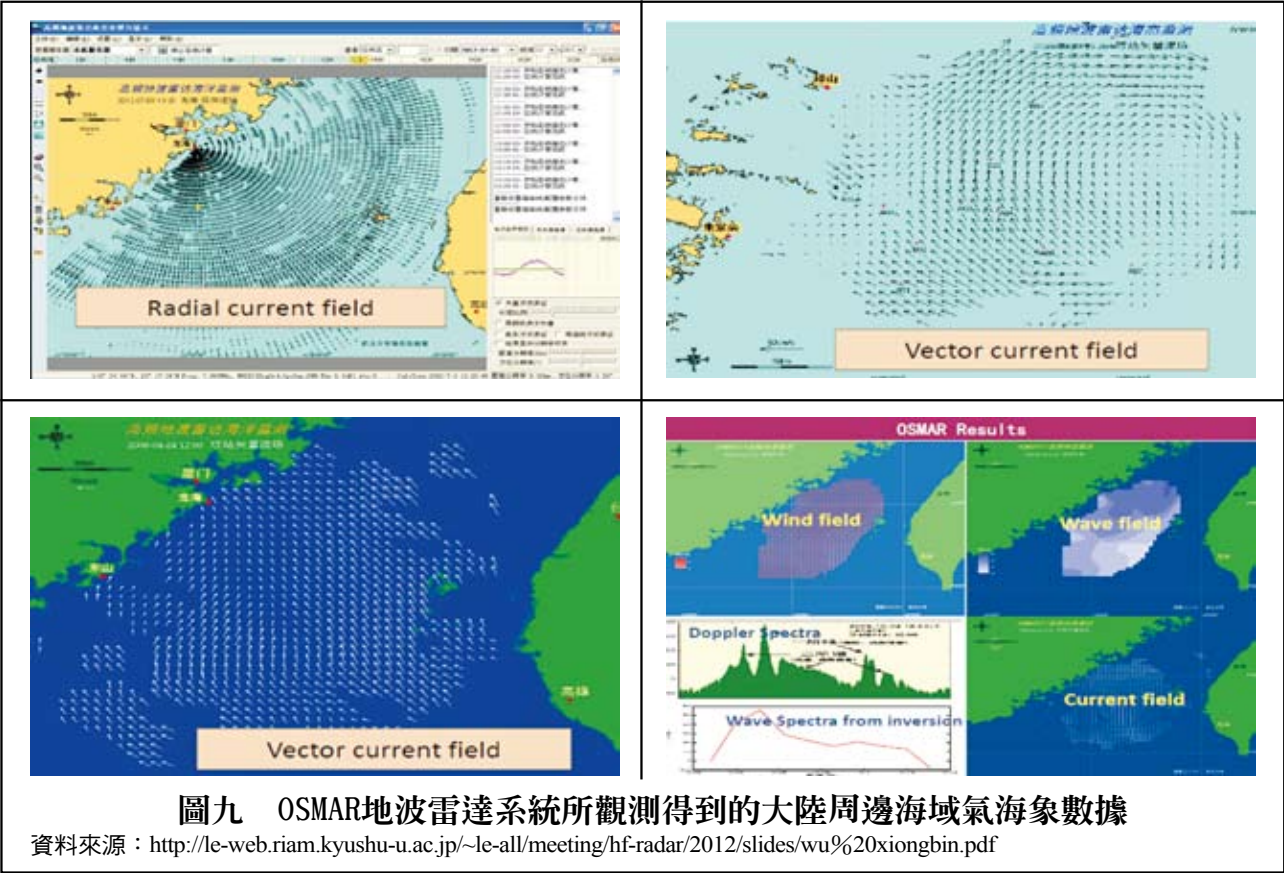
除了岸基型的401型超視距地波雷達之外，中共亦發展了艦載型超視距雷達，即為現代級飛彈驅逐艦配備之俄製「米涅拉爾」雷達系統(Band stand或Titanit/Mineral)，據稱偵蒐距離可達140浬，主要功能係為SS-N-22日炙超音速攻船飛彈之目標指示用，但是該型雷達使用之工作波段目前仍未有定論。

陸、超視距雷達未來發展

由作戰需求及技術發展趨勢來看超視距雷達未來發展，可由以下數點探討：

一、系統設計朝向分散化、網路化

超視距雷達系統受限於操作波長長的關係，天線陣列相較於一般微波雷達天線來得龐大許多，現在最新的發展係將原先長達數公里長的大型天線陣列，分解為十餘個數百公尺長的天線陣列，透過數位信號處理方式，可以得到更佳的偵測效果，此類技術未來



表一 OSMAR地波雷達系統性能

參數名稱	流場探測	浪場探測	風場探測
探測距離	最大探測距離350公里	最大探測距離180公里	最大探測距離250公里
測量範圍	流速0-300cm/sec 流向0-360度	浪高1.5m-10m 浪向0-360度 浪週期為0-15秒	風速5-75m/sec 風向0-360度
位置分辨率	0.5/1.25/2.5/5公里	0.5/1.25/2.5/5公里	0.5/1.25/2.5/5公里
方位分辨率	2.5度	15度	10度
平均測量誤差	流速=±5cm/sec 流向=±5度	N/A	N/A
均方測量誤差	流速=13cm/sec 流向=±15度	浪高=0.5cm+20%量測值 浪向=25度，浪週期=1sec	風速=2m/sec+20%量測值 風向=25度

資料來源：毛滔、夏衛民、曲翠萍、羅軍，〈高頻地波超視距雷達特點及應用研究〉，《現代雷達》，第31卷，第3期，2009年3月。

亦將可用於艦艇或陸岸站台使用。

此外透過雷達網路化，可搭配不同操作頻率，達到多輸入多輸出(Multi-input Multi-output, MIMO)，不僅可以提升目標偵

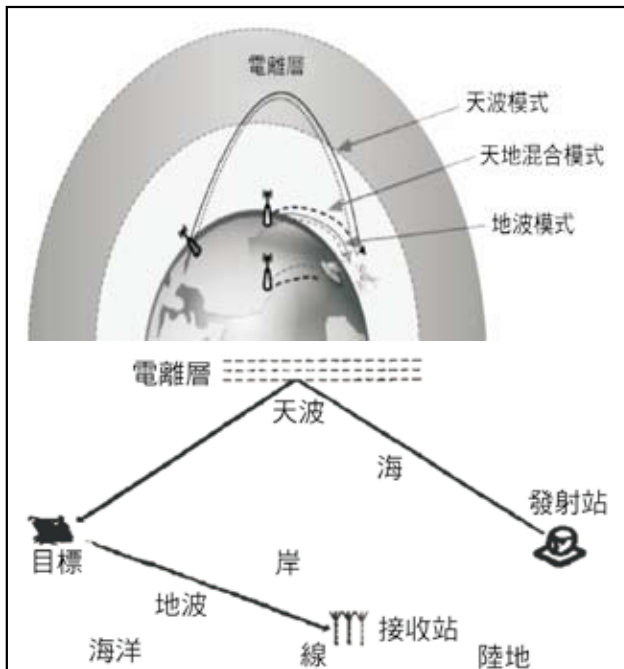
蒐精確度，對於抵抗戰損能力亦能大幅度提高。

二、更加精確的信號演算處理

由於超視距雷達系使用高頻波段操作，

表二

名稱	401型地波超視距雷達。
用途	早期海、空預警搜索
組成	發射天線、接收站、控制中心
相關技術	工作頻率：HF波段。 探測距離：對空搜索距離約500公里。 水面搜索距離約300公里。 探測精度：距離誤差約1至2哩，方位誤差約2-3度。 特點：探測距離遠、具備反匿蹤、反低空突破之搜索能力。



圖十 天波發射、地波接收的高頻超視距雷達系統示意圖

資料來源：1.費川、曹松棣、楊強、周傳晟，〈高頻超視距雷達系統發展現狀及趨勢〉，《四川兵工學報》，第34卷，第5期，2013年5月。
2.姜維、鄧維波、楊強，〈高頻超視距混合天地波雷達海雜波特點分析〉，《電子與信息學報》，第33卷，第8期，2011年8月。

受到氣象的影響程度相較於微波雷達更加嚴重，因此如何透過數位濾波加上搭配先進的演算法，濾除天氣及環境所造成的雜波，藉以得到最佳的目標追蹤效果，亦是未來的研

究目標。

三、天波發射、地波接收超視距雷達系統

天波發射、地波接收的混合體制超視距雷達系統其工作原理為以岸基的雷達站做為發射端發射高頻電波，透過電離層反射到監測海域，偵測到目標後所散射的能量以地波繞射的方式，沿著海面回傳到接收站，接收站台可採岸基或是艦載均可。這種方式可以擷天波及地波雷達兩者之長，並補兩者之短。

對於天波雷達系統而言，由於天波受電離層影響甚鉅，且有近距離盲區的缺點，使用混合體制超視距雷達系統可提高天波雷達對艦船等低速海面目標的發現機率，且近距離盲區可大幅減小；對於地波雷達系統而言，使用混合體制超視距雷達系統可大幅提高偵測能力範圍，且接收端透過地波傳輸採無源接收反射信號，使得艦艇單位亦能得到遠距離偵測能力，且又毋須暴露己身位置(如圖十)。

柒、結語

綜觀世界先進各國，超視距雷達不僅運用於科學研究上，在軍事運用與戰略預警體系中均佔有極為重要的地位，超視距雷達的功能亦正持續不斷的更新和進步，如此才能符合新時期的戰略需求。超視距雷達在未來發展的關鍵技術研究之中，尚有許多仍待解決的問題，最主要的就是偵蒐效能受到環境影響較大，以及目標搜索精確度仍有精進空間。但是隨著科技不斷發展，其未來超視距雷達效能提升亦是可以預期的。我國受限於

國防預算緊縮，在面臨中國大陸不斷發展新式武器威脅下，我們更應用心思考，不斷汲取新知，調整用兵思想，方能得到克敵制勝之道，藉以提升我國軍戰力水準。 ㄚ

作者簡介：

陳柏勳少校，海軍官校93年班、國立成功大學系統所機電控制組碩士，現服務於馬公軍艦。

老軍艦的故事

洛陽軍艦(二) DD-14

我國海軍第二艘以洛陽命名之軍艦，原為美海軍Allen M. Sumner級驅逐艦，編號DD-746，由美國紐約伯利恆鋼鐵公司建造，1944年5月20日完工成軍，曾參加第二次世界大戰、韓戰與越戰。民國63年美國將該艦售予我國，由總司令宋長志上將核定取代原Benson級之洛陽艦，並沿用其艦名與編號，同年5月26日正式服勤。

民國68年，同時執行「武進一號」系統改裝及復陽工程，為我海軍第一艘完成復陽及改裝武進系統之飛彈驅逐艦，由於火力猛、速度快、戰力強，並多次精確擊中靶船及飛靶，而贏得「洛陽神艦」的美譽。

該艦在海軍服勤期間，擔任海峽偵巡、外島運補護航、巡弋警戒及各項演訓等任務，為海軍建軍備戰與確保海權，寫下不可磨滅的功勳與輝煌之史蹟，尤其在該艦歷任艦長中，共有四位曾先後擔任我國海軍總司令的職務，成為洛陽軍艦傳為美談之佳話。

該艦於民國89年2月16日功成除役，走入歷史。(取材自老軍艦的故事)

