

微波超視距雷達發展之研究

海軍中校 林彥岑

提 要

- 一、超視距雷達的電磁波傳播機制、目標特性、電磁環境、設計原理及工作方式等完全不同於常規視距雷達。其超視距探測擴大了探測範圍及應用功能，且有能力發現大氣層中來自敵方的任何威脅，提供海上作戰半徑及海岸警戒距離延伸重要的技術保障。
- 二、面對低空與海面目標突防問題，除了佈防更多的低空雷達網、發展機載及星載預警系統外，採用及持續研究超視距雷達是一種經濟實用的方法。
- 三、對我國海軍而言，在廣大的海洋三度空間戰場上，其所有仰賴電磁波的裝備均深受大氣導管影響，直接影響的不只是海軍的作戰或武器效能的發揮，而是整體的國家安全。微波大氣導管超視距雷達發展，對我國在國防發展遠距離低空及海面目標探測工作上，實存在相當的重要及必要性。

關鍵詞：超視距雷達、電磁波、微波、大氣導管

壹、前言

超視距雷達不受地球曲率限制影響，雷達發射和接收並非以直線傳播，而是以向地球表面彎曲路徑傳播，超視距雷達可分為高頻天波超視距雷達、高頻地波超視距雷達、微波大氣導管超視距雷達等三種。高頻天波超視距雷達是利用電離層後向返回散射傳播機制，高頻地波超視距雷達利用表面波在海面繞射傳播原理，微波大氣導管超視距雷達

則是運用電磁波在不同大氣環境下，因傳播路徑之不同而造成不同大氣導管現象之原理。運用不同電磁波傳播原理研究不同的應用範圍，使得海上監偵的範圍得以擴大。

由於超視距雷達在遠程、大區域範圍內的偵蒐性能是其他傳統雷達所不可比擬的，世界各軍事大國均十分重視。惟其研製技術難度相當高，至今試驗與開發工作仍不斷的持續中。

貳、超視距雷達傳播原理與應用

自高頻超視距雷達於1990年代正式服役起，目前國外陸續開始應用的有高頻(HF)天波超視距雷達(OTHR)、高頻(HF)地波超視距雷達(HFSWR)、微波(SHF)大氣導管超視距雷達。另正在試用與改良的艦載超視距雷達可分為艦載高頻電波超視距雷達以及艦載微波大氣導管超視距雷達。以下就已應用之部分原理及運用方式分別說明：

一、超視距雷達傳播原理

(一) 高頻天波超視距雷達

簡稱天波雷達，即利用電磁波電離層折射、後向反回散射路徑下視傳播，以達目標偵蒐。

當電磁波斜向傳播至電離層後，被折射至遠方地平線外之海面或地面，粗糙表面及電磁波特性使電磁波向四面八方散射，一部分電磁波沿著原來入射路徑再次經電離層折射回到發射點被接收機接收。後向返回散射過程有許多方式：有原路徑一次返回、原路徑多次返回、非原路徑側向返回(地側後向散射傳播)等不同方式。

(二) 高頻地波超視距雷達

簡稱地波雷達，即利用電磁波能量沿著地球海洋表面以繞射傳播方式探測海面及低空目標。

電磁波在對流層傳播行為可分為視距內的光學傳播及視距外的繞射傳播。由於近地表面之大氣非理想導體介質，電磁波在兩介質面上傳播，電磁波的場結構發生變化，不

同於在各向同性的介質中的直線傳播，而在對流層內以繞射方式進行傳播。Sommerfeld〔註一〕最早對兩層半空中間介質表面相交處產生的垂直電場特性進行分析計算，為地波場強的特性及計算方法進行分析。

(三) 微波大氣導管超視距雷達

利用大氣導管現象，使雷達波傳播距離增加，達到遠距離作戰效果。一般來說，電磁波在對流層中傳播會隨著距離而衰減，因此在一般情況下雷達偵蒐距離有一定的限制。但當某些特殊天氣現象(如逆溫層)發生時，會造成大氣折射指數在垂直梯度上之異常分布，進而導致大氣導管的產生。當電磁波傳播環境中有大氣導管現象發生時，某些頻率的電磁波會被導管所陷捕，在此情況下電磁波能量隨傳播距離之衰減將減少，而傳播距離將增加。

二、超視距雷達之應用

(一) 高頻天波雷達

1. 性能

運用大功率電磁波在電離層的折射現象向下傳播可增大探測距離的原理。其能提供的海平面監偵半徑可達3,000公里，海平面水平監偵面積可達數百萬平方公里，隨探測高度的不同，其探測立體空間呈扇形分布，最大可達數億立方公里。

(1) 水平探測距離半徑：800至3,500公里。

(2) 探測扇區角度：每組天線可探測扇區角度為60度，3組天線可達180度。

(3) 最大探測高度：300公里。

註一：Sommerfeld A. Propagation of Waves in Wireless Telegraphy. Ann.Phys., 1909, Vol.28, PP.636-665.

(4)測距精度：絕對精度10公里至40公里，相對精度3公里至5公里。

(5)測角精度：0.3度至1.5度。

(6)分辨能力：距離為4公里至30公里，方位為0.25度至2度，徑向速度為每秒1至10公尺(空中目標)或每秒0.2至1公尺(海面目標)。

(7)系統時間可用度(中緯度地區)：1,000公里至2,200公里90%以上，其他距離70%以上。

2. 應用

(1)遠程戰略預警、戰略情報與戰術警戒：早期可用於彈道導彈發射強大噴焰回波監偵。隨雷達技術發展及定位技術提高，可利用目標物雷達散射截面回波監偵遠程轟炸機、潛射導彈、戰鬥機群及艦隊動向。

(2)探測隱形飛機：雷達吸波材料及隱身形狀技術發展對於由上而下的雷達波束，有著難以克服的科學瓶頸。

(3)核爆炸監測。

(4)海洋及高空電離層環境監偵及預報。

(二)高頻地波雷達

1. 性能：

(1)探測距離：中、大型船艦為400公里，飛機為200至300公里，掠海導彈為150公里。

(2)探測方位扇區：90度至120度。

(3)探測高度：垂直波束寬為30度至45度(從海平面算起)。

(4)定位精度：海面目標為距離小於1.5公里，方位小於3度；空中目標為距離3公里，方位1.5度。

(5)分辨能力：海面目標為距離3至8公里，方位6至20度，速度每秒1.08至0.16公尺；空中目標為距離8至15公里，方位4至8度，速度每秒0.75至1.5公尺。

(6)可用時間：全天候。

2. 應用：

(1)海面及海上低空警戒。

(2)國家領海資源的海上綜合監視。

(3)海港及海上交通監控與管理。

(4)海洋環境監測。

(5)艦載地波超視距雷達。

(三)微波大氣導管雷達

1. 性能

(1)天線架設高度：10至30公尺。

(2)工作波段：超高頻段，波長3至5公分為多。

(3)探測距離：100至450公里。

(4)定位精度與分辨能力：接近同頻率的視距雷達。

(5)系統時間可用度：對蒸發導管發生機率百分之80以上之海面，系統超視距探測時間可用度大於百分之60以上。微波雷達進行超視距探測可利用機率不僅取決於導管厚度、強度、延伸範圍和持續時間，還取決於雷達系統主要參數，如工作頻段、天線架高及輻射功率增益等。

2. 應用

微波視距雷達常用大氣導管傳播效應對海面艦船、超低空飛行目標實施超視距探測，它具有微波視距雷達的分辨能力與定位精度。與岸基雷達一樣分為岸基、車載及艦載等多種載體。為擴大海上作戰半徑，提高艦

備導彈超視距作戰能力具有重要意義。

微波大氣導管雷達超視距探測主要應用範圍在海上，其應用效果取決於大氣導管發生機率，海面蒸發導管視為大氣導管超視距雷達最具作戰價值的環境條件。由於時間可用度限制，目前微波雷達在海上的超視距探測通常建立在艦載微波視距雷達工作的基礎之上，一但發生大氣導管，便可擴展該雷達的探測距離範圍。

參、微波大氣導管超視距雷達發展現況

一、理論研究發展現況

(一) 基礎原理

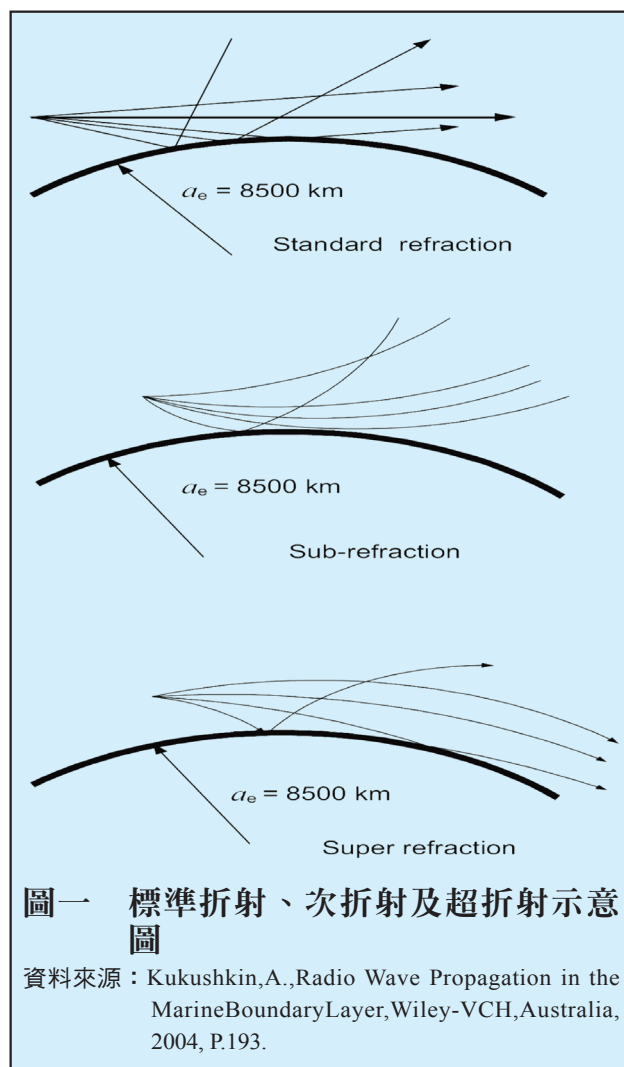
依大氣折射率〔註二〕的垂直變化，可將電磁波傳播類型歸納出四種類型：正常、次折射、超折射和陷捕(如圖一)〔註三〕。電磁波因大氣折射被限制在某個區間中行進的現象，則稱之為大氣導管。導致電波傳播距離遠超過正常傳播情形，且宛如在導波管傳播。因生成的位置不同可區分成三類；在海面上的稱作蒸發導管。在陸地上，可分為地面導管及空中導管(如圖二)〔註四〕。

(二) 大氣導管理論各國研究發展

20世紀中期，人們對大氣導管開始逐步認識。五〇年代蘇聯亦逐漸在海上大氣導管傳播條件下，進行不同頻段電磁波傳播損耗隨距離變化的測量工作，在撒哈林島與庫什

島建立固定觀測塔，搭配大型測量船實施傳播損耗及研究。

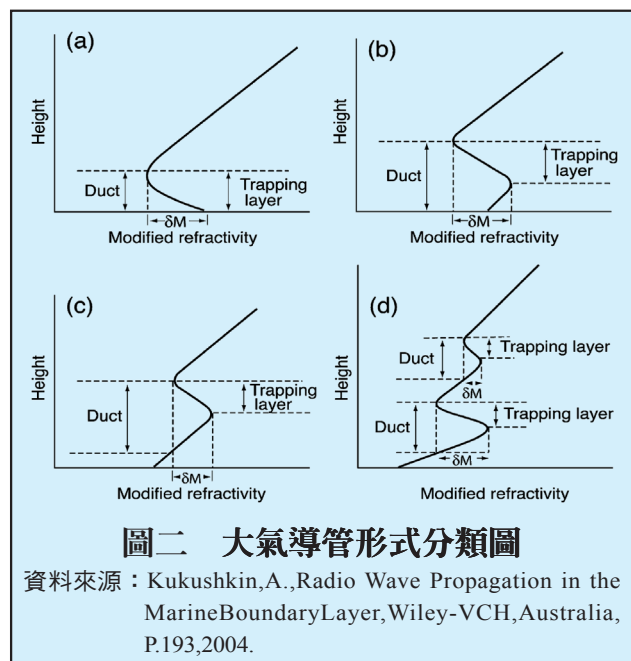
六〇至七〇年代隸屬美國環保局下對流層電磁波傳播研究所開始較具系統性之研究。聖地牙哥航海電子研究中心、輻射實驗室、日本電報電話公司、德國漢堡大學等收



註二：Bean, B. R., and Dutton, E. J., Radio meteorology, Darmstadt, Germany, 1968, P.435.

註三：Kukushkin, A., Radio Wave Propagation in the Marine Boundary Layer, Wiley-VCH, Australia, 2004, P.193.

註四：橫座標為修正折射率，縱座標為垂直高度。Duct是導管厚度，為向下最趨近與 $dM/dh < 0$ 的局部最大高度有相同修正折射率的高度差。Trapping layer是陷捕層，為 $dM/dh < 0$ 的局部厚度層。是導管強度，為 $dM/dh < 0$ 的局部厚度層間的修正折射率的差異量。圖a為蒸發導管，圖b為地面導管，圖c、d為高空導管。



集世界各地數據，進行開闊海域蒸發導管電磁波傳播實驗。美國海軍環境預報研究所展開蒸發導管粗略的預測計算與模型研究。六〇年代後期，Monin-Obukhov近似理論(MOS)在陸地上經實驗被證實(Businger et al., 1971)〔註五〕而且迅速地適用於海上微波傳導模式。

義大利、烏克蘭等國在低空大氣導管的研究也曾在印度洋、大西洋和太平洋地區進行實驗，獲得了北半球海洋洋面至南緯40度

海洋洋面上的大量數據。

中共1960年代開始在青島至上海之間展開了跨海傳播實驗和大氣導管研究工作，1970年代開始在沿海展開低空大氣導管專題研究，近年來在黃海及南海完成大規模海上探測實驗。通過對大氣導管傳播理論的研究，分別從射線理論推導出大氣導管臨界角及臨界頻率的計算公式。

Doviak and Zrnic(1992)〔註六〕也指出在美國維吉尼亞州Wallops Island 的都卜勒氣象雷達，因為近地層強烈的逆溫造成雷達波束迅速偏折至海面，致使位於海灣的橋樑及海岸線可被清楚的觀測到。

學者Borsum(1995)〔註七〕研究曾指出由於雷達波束異常傳播，而導致雷雨雲的高度誤判。

Babin (1995)〔註八〕利用直升機觀測探討綜觀天氣個案與大氣折射狀況的關係；Brooks et al. (1999)〔註九〕利用C-130氣象研究飛機於波斯灣(Persian Gulf)進行地面導管觀測；Falodun and Ajewole (2006)〔註十〕在奈及利亞西南部建立100公尺之觀測塔，長期觀測低邊界層之折射指數氣候變化狀況。

註五：Businger, J. A., Wyngaard, J. C., Izumi, Y., and Bradley, E. F., "Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer," Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 28, 1971, PP.181-189.

註六：Doviak, R. J., and Zrnic, D. S., Doppler Radar and Weather Observation, Academic Press, America, 1992, P.562.

註七：Borsum, D. L., Doppler dilemma delineates danger from dirt, National Weather Service Western Region Tech. Attachment 1995.7, PP.95-97.

註八：Babin, S. M., "A case study of subrefractive conditions at Wallops Island, Virginia," J. Appl. Meteor., Vol. 34, 1995, PP.1028-1038.

註九：Brooks, M. I., Goroch, A. K., and Rogers, D. P., "Observations of Strong Surface Radar Ducts over the Persian Gulf," Journal of Applied Meteorology, Vol. 38, 1999, PP.1293-1310.

註十：Falodun, S. E. and Ajewole, M. O., "Radio Refractive index in the lowest 100-m layer of the troposphere in Akure, South Western Nigeria," Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2006, PP.236-243.

近年來，由於電腦運算速度及儲存容量的發展，學者開始運用電腦資源及地球物理科學基礎展開導管研究及預報。

Atkinson et al.(2001)〔註十一〕運用MM5大氣數值模式，探討海洋邊界層(Marine Internal Boundary Layer, MIBL)內，導管在強、弱風條件下的演變。Haack and Burks(2000)〔註十二〕利用美國海軍中尺度海氣耦合預報系統(Coupled Ocean - Atmosphere Mesoscale Prediction System, COAMPS)，對海陸邊界層大氣折射狀況進行模擬與預報。Zhu et al.(2005)〔註十三〕以MM5 V3針對波斯灣進行海陸分佈及日夜變化模擬。

其模擬結果顯示模式是有能力掌握地面導管82%的正確預報率，但是，模式也顯示出海陸邊界層高度過低及導管強度過弱等現象。

二、裝備發展現況

前蘇聯在綜合利用直升機定位和艦載主被動超視距雷達技術的基礎上，加上數位通訊技術，成功完成了艦載主被動超視距雷達Mohojit(蒙娜利特)系統的研製及生產。該系統於1984年定型，為前蘇聯海軍各類大中小型水面艦艇提供了近150套設備。至今該系統已發展至第三代，是一個多波段的綜合雷達探測系統，可對海面目標進行超視距探測、定位及識別。

附表 國內大氣導管理論研究發展概況

研究學者	研究方式	研究成果	備考
朱(1984a) 〔註十四〕	統計1969至1981年板橋探空資料。	初步分析台北地區大氣折射率變化。	
朱等(1994) 〔註十五〕	板橋探空資料及海洋研究船實驗結果分析。	顯示大氣導管與地理位置、天氣系統型態有密切關係。	
丁等(1994) 〔註十六〕	不同季節、天氣系統大氣導管研究。	瞭解季節變化大氣導管特性。	
呂等(1998) 〔註十七〕	台灣地區大氣導管統計。	得知季節、日夜間變化方面之特性。	

註十一：Atkinson, B. W., J.-G. Li, and R. S. Plant, 2001: Numerical Modeling of the Propagation Environment in the Atmospheric Boundary Layer over the Persian Gulf, J. Appl. Meteor., 40, PP.586-603.

註十二：Haack, T., and Burk, S. D., "Mesoscale Modeling of Coastal Refractivity," IEEE., 2000, PP.360-362.

註十三：Zhu, M. and Atkinson, B. W., Simulated Climatology of Atmospheric Ducts over the Persian Gulf," Boundary-Layer Meteorology, Vol. 115, 2005, PP.433-452.

註十四：朱延祥，〈台北地區地面大氣折射率之特性研究〉，《交通部電信研究所研究報告彙編》，第14卷，第2期，1984年，頁191-200。

註十五：朱延祥、許舜清、呂芳川、丁珏、江火明，〈台灣地區大氣導管特性之研究〉，《第3屆國防科技研討會論文集》，台灣桃園，1994年，頁917-925。

註十六：丁珏、呂芳川、朱延祥、江火明、張石軍，〈不同天氣系統內大氣導管特性之研究〉，中央氣象局天氣分析與預報研討會，1994年，頁493-501。

註十七：呂芳川、朱延祥、江火明、陳曉華，〈台灣海域大氣導管效應與雷達傳播〉，國防科技學術合作技術報告，中正理工學院應用物理系，1998年，頁162。

周與李(2001) 〔註十八〕	五分山氣象雷達資料。	對受大氣折射效應影響不正常回波型態進行分類。	
薛(2000)	雷達仰角誤差統計分析。	雷達仰角誤差隨著季節呈現高斯分布，大氣總路徑的遲延量呈韋伯分布。	
黃(2004) 〔註十九〕 〔註二十〕	大陸冷高壓不同出海路徑統計與大氣導管關係。	大氣導管發生高度、位置等特性。	
呂與朱(2004)	台灣東南海域進行海上蒸發導管實驗。	蒐集東南海域實驗資料。	
林(2007)	運用實驗資料以AREPS〔註二一〕進行導管分析及WRF〔註二二〕大氣模式預報。	瞭解分析影響因子權重，並執行導管預報研究。	

資料來源：作者彙整

該系統利用大氣折射及對流層非均勻散射傳播效應理論基礎，分別對應系統主動及被動工作方式。具體應用需要有特定的大氣條件，且與地區、季節及環境等因素有關。目前俄羅斯導彈驅逐艦上的米涅拉爾主被動超視距雷達，工作頻率從L波段至X波段，探測距離從幾十至上百公里，測向精度為0.5度至2度。

另外義大利的TPS-755、TPS-828岸對海超視距警戒雷達和SPS-828(V)艦載超視距警戒雷達等，這些雷達多數作用於X頻段，均是利用海上大氣導管進行超視距傳播的雷達。

肆、國內微波雷達的超視距探測技術發展分析

一、大氣導管實驗及分析能力

歷年來在行政院國科會研究經費資助下，大氣導管理論研究及分析能力已有相當成果，(如附表)。2004年國防大學開始執行單艦海上觀測及氣象塔實驗，獲得高密度之低層觀測資料。

陳等(2006)〔註二三〕對2003年五分山異常回波個案進行影響權重分析，(如圖三)由各曲線的變動特徵來看，水氣與折射率梯度關係密切，觀察各參數的影響，其權重以水汽所佔影響權重最大。林(2007)〔註二四〕運用海上觀測實驗資料探討大氣參數影響權重及海上蒸發導管影響分析。綜合前人理論研究發展基礎及所發表研究報告，國內已實質具備大氣導管研析能力。

二、數值模式模擬預報能力分析

(一)高空導管數值模擬分析

註十八：周仲島與李文兆，〈台灣地區都卜勒雷達資料發展應用計畫(I)〉，中央氣象局委託計畫，2001年，頁90。

註十九：黃崇展，〈大氣導管效應影響雷達偵蒐定位之個案研究〉，國防大學中正理工學院應用物理所碩士論文，2004年，頁113。

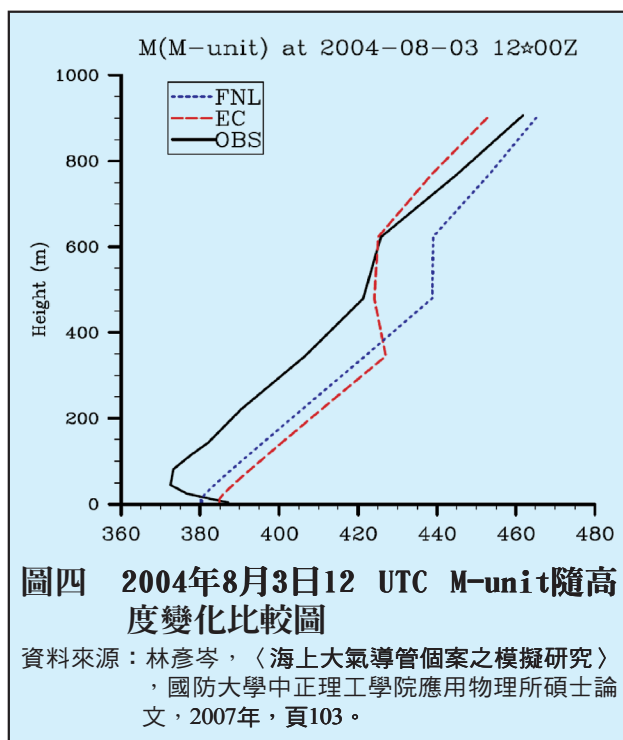
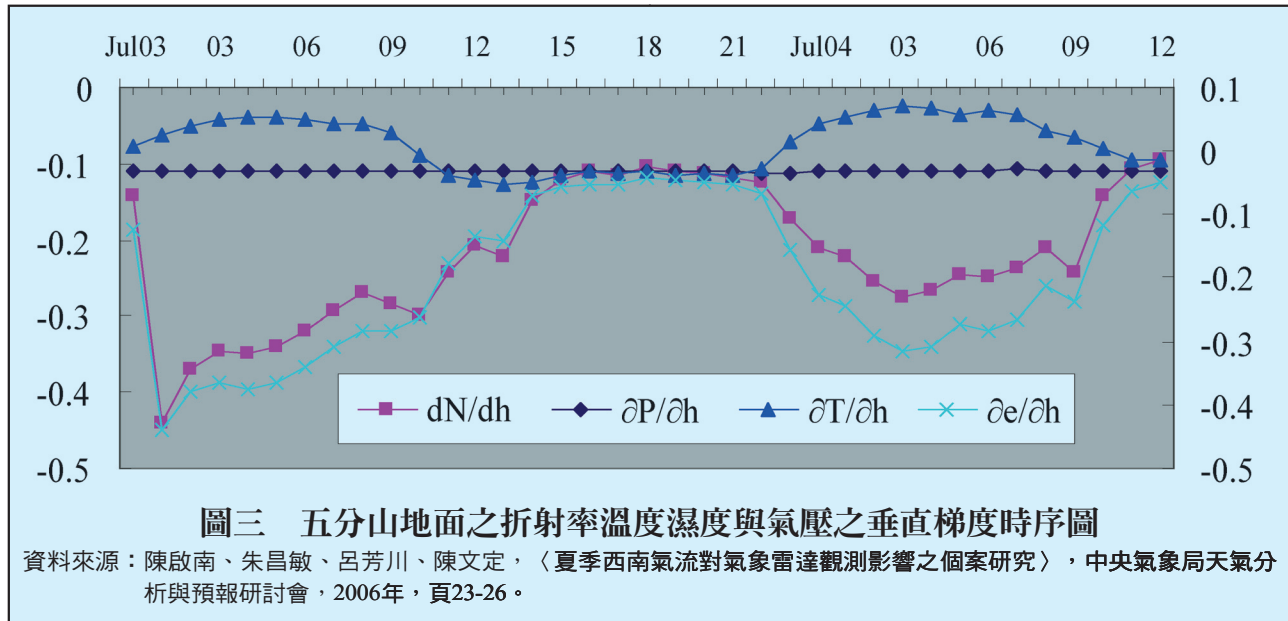
註二十：黃崇展、陳啟南、呂芳川、陳文定，〈春季台灣地區受高壓迴流影響期間大氣導管特性之個案研究〉，《第八屆全國大氣科學學術研討會暨2004年中央氣象局天氣分析與預報研討會論文集》，2004年，頁843-848。

註二一：美國海軍之大氣折射效應預報系統(Advanced Refractive Effects Prediction System, AREPS)。

註二二：WRF中尺度大氣數值模式模式(Weather Research and Forecast model)。

註二三：陳啟南、朱昌敏、呂芳川、陳文定，〈夏季西南氣流對氣象雷達觀測影響之個案研究〉，中央氣象局天氣分析與預報研討會，2006年，頁23-26。

註二四：林彥岑，〈海上大氣導管個案之模擬研究〉，國防大學中正理工學院應用物理所碩士論文，2007年，頁103。



傳統大氣折射指數計算均是利用探空儀量測所得的壓力、溫度及溼度等氣象因子，推估大氣折射指數隨高度變化與分布狀況。2000年開始許多國外研究運用數值模擬來模擬真實大氣的環境大氣情況。

林(2007)運用大氣模式模擬近海面大氣參數與觀測點實施比對驗證，顯現相當接近的模擬成果，進而進行大氣導管日夜變化模擬，(如圖四)〔註二五〕所示。

(二) 蒸發導管數值模擬能力

林(2007)有關蒸發導管之研究以WRF模式所預報之大氣環境量場，輸入採用Kiefer (1941)〔註二六〕的方程式來計算飽和水氣壓之PJ模式〔註二七〕後已可執行蒸發導管預報。

註二五：時間2004年7月30日21UTC至2004年7月31日18UTC，台灣南端平行緯度線之剖面修正折射率隨高度變化分佈及虛位溫垂直剖面圖。縱軸為高度(公尺)，橫軸為距離(Grids=5 公里)，色標為修正折射率隨高度變化值之電磁波行為分類範圍，紅色表示陷捕、黃色表示超折射、白色表示標準、藍色表示次折射。每3小時1張，藍線為虛位溫。

註二六：Kiefer, P. J., "The thermodynamic properties of water and water vapor," Mon. Wea. Rev., Vol. 69, 1941, PP.329-331.

註二七：Babin, S. M., Young, G. S., and Garton, J. A., "A New Model of Ocean Evaporation Duct," J. Appl. Meteor., Vol. 36, 1997, PP. 193-204.

伍、結語

未來雷達的發展是趨向短波長，電磁波傳播將會因更小的折射特性產生效應，也就是對波長1公尺以下的折射梯度將會有重大影響，短波長也就更容易被蒸發導管所陷捕。因此，在未來蒸發導管模式的評估也會變得更加重要。

大氣導管這一個科學研究領域，在國內較少有科學家參與研究，但理論應用研究已有初步具體成果，實屬難得。惟國內缺乏具備整合能力機構，可執行大型實驗驗證及儀台整合；反觀國外早在三〇年代已有科學家開始投入研究，不斷從大型研究實驗去求得經驗參數，並執行儀台整合及運用，得以不斷發展。

對我國海軍而言，在廣大的海洋三度空

間戰場上，其所有仰賴電磁波的裝備均深受大氣導管影響，直接影響的不只是海軍的作戰或武器效能的發揮，而是整體的國家安全。微波大氣導管超視距雷達發展，對我國在國防發展遠距離低空及海面目標探測工作上，實存在相當的重要及必要性。

微波大氣導管超視距雷達利用海面上所產生之大氣導管效應對海面及海上低空目標實施監偵，探測精度比高頻天波及地波雷達高很多，可建立應用於一般艦載微波視距雷達設備基礎上，對於海島國家的我們而言，是相當值得深入研究之國防應用方向。 ⚓

作者簡介：

林彥岑中校，中正理工學院應用物理學系84年班，中正理工學院應用物理研究所碩士，現服務於海軍教育訓練暨準則發展指揮部。

老軍艦的故事

萬壽軍艦 AOG-512



任務。平時依上級規定實施各類操演，如甲類操演、海上整補操演等。民國78年7月1日因汰舊換新而除役。(取材自老軍艦的故事)

萬壽艦為一運油艦。為我國向日本宇品造船所訂造。民國58年由我國海軍檢驗後，於同年10月1日成軍服役，編號為「AOG-512」，命名為「萬壽」軍艦，該艦全長約為283.8呎，寬54呎，動力系統裝有柴油主機1部，可產生約2,100匹之馬力，單車推進，最高航速可達13節。在武器配置方面，則裝有單管40公厘砲及2門20公厘砲。

該艦成軍服役後隸屬海軍勤務艦隊，擔任外島及各港口油水之運輸補給