

大氣環境對軍事作戰之影響

著者／蔡世樵 毛正氣

國防大學中正理工學院90年班、國立中央大學太空科學研究所碩士（2004）、通信電子暨氣象參謀官正規班（2008）。
現任海軍大氣海洋局測量官。

海軍官校77年班、美國紐約州立大學石溪分校海洋環境科學碩士（1992）、美國海軍參謀學院56期（2000）、美國紐約州立大學石溪分校海洋暨大氣科學博士（2006）。
現任海軍大氣海洋局上校局長。

- 一、大氣環境對我軍防空作戰有著直接的影響，例如大氣導管效應、電離層變化等影響雷達探測、無線電通訊的傳播特性和傳輸品質，大氣吸收現象影響光電設備效能等。
- 二、電離層存在於地球60km以上的高空，是無線電短波通信主要的傳播媒介，其對電波吸收作用的大小取決於無線電波的頻率和電離層的電子密度，頻率越低，電離層密度越大，吸收作用就越大；而造成電離層密度變化及擾動之主要原因為太陽黑子、磁暴等太陽活動。
- 三、大氣導管依其發生的位置不同可分為地面導管、空中導管和蒸發導管三種。當其存在時會使電波被限捕而導致雷達盲區產生，或因為電波的異常偏折現象造成雷達對目標物位置的誤判或發現假目標，這些情形很容易使戰場指揮官誤判情勢，進而影響到作戰的成敗。
- 四、大氣中的水蒸氣、二氧化碳、其他化學成分和塵埃等對不同波長的光有不同的吸收及散射，不同波長的光有不同的「大氣透過率」；大氣中能引起強烈紅外線吸收的氣體主要是水汽、二氧化碳和臭氧，對光電設備之效能影響甚大。

壹、前言

我軍各項武器裝備在大氣環境中使用，都面臨著大氣的風場、浪場、溫度、深度、密度等環境參數影響，例如大氣導管效應、電離層變化影響雷達探測、無線電通訊的傳播

特性和傳輸品質，海面雜波影響雷達探測和導彈精確制導，大氣透明度和雨霧對光電設備的使用和性能有很大的影響等。

就我軍防空作戰而言，艦載雷達肩負著對空探測的任務，可即時發現和掌握週邊空域

的飛機，來襲的導彈，快速引導我方防空裝備進行攔截打擊；但在實際應用時發現，環境中的大氣參數（如溫度、氣壓、氣溫等）會導致大氣導管現象發生，使雷達探測到遠大於視距的目標，同時也造成對目標物位置的誤判或是有所謂的雷達盲區產生，影響雷達探測效能；而作戰離不開無線信息傳輸，無線傳輸又受海空大氣及電離層的影響，由於電離層會隨季節、地球區域、晝夜時間而變化，將對無線通信產生干擾和多重路徑效應，影響通信效果；另外，海上雨、霧、大氣溼度等參數對紅外線等光電探測設備的使用和性能影響非常大，例如天晴時，大氣透明度很高，大氣對紅外線的吸收很少，光電設備處於較佳使用狀態，但當遇到雨、霧、大氣溼度很高的不良天氣時，紅外線在大氣中的衰減很快，使設備的性能明顯下降，甚至無法正常使用。

由以上敘述可知，大氣環境對我軍防空作戰有著直接的影響，深入研究我軍防空作戰面臨的戰場環境，將有助於充分發揮防空武器的整體效能，提升我軍防空作戰的效果。

貳、電離層對無線電短波通信之影響

海軍艦艇通信是指揮、控制、和協調海上兵力運用的基本手段，它必須具有能夠完成一切遠、中、近距離通信的能力，可以為岸

上、海上、空中和 underwater 提供足夠多且穩定可靠的通信線路，而無線電通信在艦艇作戰中的應用，使通信距離、覆蓋範圍、通信容量增大了很多。但艦艇無線通信裝備在複雜的海洋環境中使用，受到許多因素影響，諸如海洋表面的風、浪、日光輻射，大氣中的雲、雨、霧，甚至電離層高度、電子變化等，都會影響無線電通信之效能。

其中電離層存在於地球60km以上的高空，能反射電磁波，是地球大氣層中其自由電子數量足以對無線電波傳播產生重要影響的區域。因電子密度的不同電離層分為3層：D層（距地面高度60~90km）、E層（90~120km）、F1層（200km左右）及F2層（200~900km）（圖1），這些層對不同波長無線電波的傳播有著不同的影響。

地球是一個彎曲的球型表面，正因為有電離層，才使高頻以下無線電波不至於散發到太空，反而被限制在電離層和地球表面間向遠方傳播。而把電磁波以一定的角度發射到大氣層中，再由電離層把電磁波反射回到地面，使電磁波在地面與電離層之間來回反射傳播到較遠的地方，此種傳播方式稱為「天波傳播」¹。但電離層既是電波的反射層也可以是吸收層，其對電波吸收作用的大小取決於無線電波的頻率和電離層的電子密度，

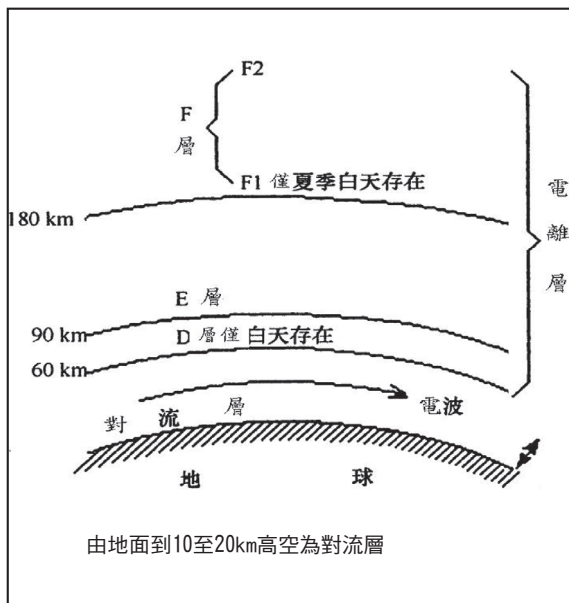


圖1 地球上空電離層示意圖（摘自「海軍武器裝備與海戰場環境概論」）

頻率越低，電離層密度越大，吸收作用就越大，一般來說，白天比夜間吸收大，夏季比冬季吸收大。對於頻率太低的電磁波，電離層對其吸收就很強，使電磁波無法反射回去，因此天波傳播通常有個額定的最低可用頻率，通常利用天波傳播的是中波和短波。

短波通信是指波長為10~100m的無線電通信，一般是以電離層作為媒介，利用電離層反射進行傳播；但若使用頻率過高(30MHz以上)時，電磁波將會穿越電離層而不返回地面，因此通常會根據接收距離及電離層分佈計算出一「最高可用頻率」，稱為MUF (Maximum Usable Frequency)²。

另外，由於電離層高度及密度變化將造成電磁波傳播的吸收、多重路徑現象，此種情形稱為「衰落現象」，將影響短波通信之效能。而造成電離層密度變化及擾動之主要原因為太陽黑子、磁暴等太陽活動，電離層電子密度受太陽黑子的影響，黑子數多的時候電離層密度大，可以反射較高的頻率。當太陽黑子突然爆發時，就會引起電離層的擾動，使短波通信中斷。一般來說，太陽黑子活動以11年為一個週期，活動最厲害的年份稱太陽黑子高峰年，最平靜的時期為黑子活動低谷期，此時短波天波通信所用的頻率就要降低。電離層電子密度會隨白天、夜晚、季節發生變化，因此短波通信需要依電離層變化而調整工作頻率，調整的方法是採用國際無線電委員會頒布的世界電離層分佈圖做出頻率預報與選擇³。另外，磁暴現象也會干擾短波通信甚至引起中斷，且嚴重時會影響地面通信、導航、雷達等等；磁暴通常伴隨太陽黑子的增多而出現，因此，應該要藉由關注太陽黑子活動之變化，以期提早採取相關因應措施，降低對無線電通信之影響。

參、大氣導管現象對雷達偵蒐之影響

一、電磁波傳播理論

電磁波在對流層的傳播，與大氣折射指數有關，而在對流層中的大氣折射指數受大

氣環境的氣壓、水蒸氣壓及溫度等氣象參數影響。因此，在不同的天氣型態隨著大氣折射指數垂直分佈的不同，電磁波傳播的現象亦隨之而異。根據電磁波傳播路徑之彎折情形，基本上可將電波在大氣的折射現象分成四類：亦即正常折射（Standard）、次折射（Subrefractive）、超折射（Superrefractive）和陷捕（Trapping）（圖2）。其中陷捕的發生代表大氣環境存在有某層狀結構，造成電磁波在垂直方向的傳播被此層狀結構所局限而無法逸出，宛如在波導管中傳播，導致電波傳播距離遠超過正常傳播情形並有增強的趨勢，此種結構體稱為大氣導管（Atmospheric duct）。

二、大氣導管種類

大氣導管是大氣折射指數在垂直梯度上之異常擾動所造成的一種現象，對於電磁波

傳播有很大的影響。一般來說，在導管中傳播的電磁波其傳播距離會比在一般情況下來得遠，且電磁波強度隨距離的衰減也會比較小。因此，當雷達所在環境有大氣導管存在時，因為電磁波的異常傳播現象，可能會導致對目標物高度位置的誤判或是有所謂的雷達盲區產生（圖3），這對雷達的偵蒐與通信效能將會造成很大的影響。

2000年10月份俄羅斯蘇愷27戰機有效利用在美小鷹號航母上空出現的大氣導管現象形成的雷達盲區，進行飛行，對美小鷹號航母進行多次偵察拍照，而美小鷹號航母戰鬥群所有雷達電子系統（即神盾系統）由於大氣折射效應作用都無法偵測到蘇愷27戰機，甚至肉眼都可看見，但其電子系統卻看不到，此即為一大氣導管影響雷達偵蒐之明顯實例⁴。另一個例子是在波灣戰爭期間，美軍愛國者

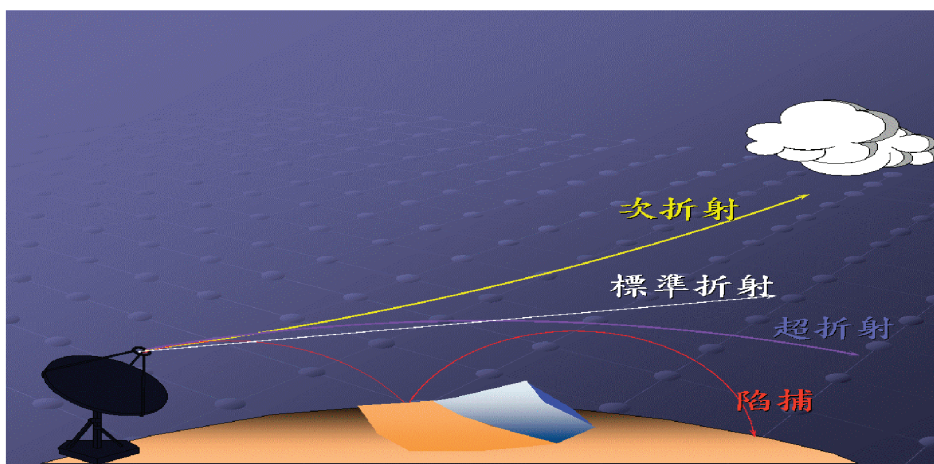


圖2 大氣折射效應示意圖（自繪）

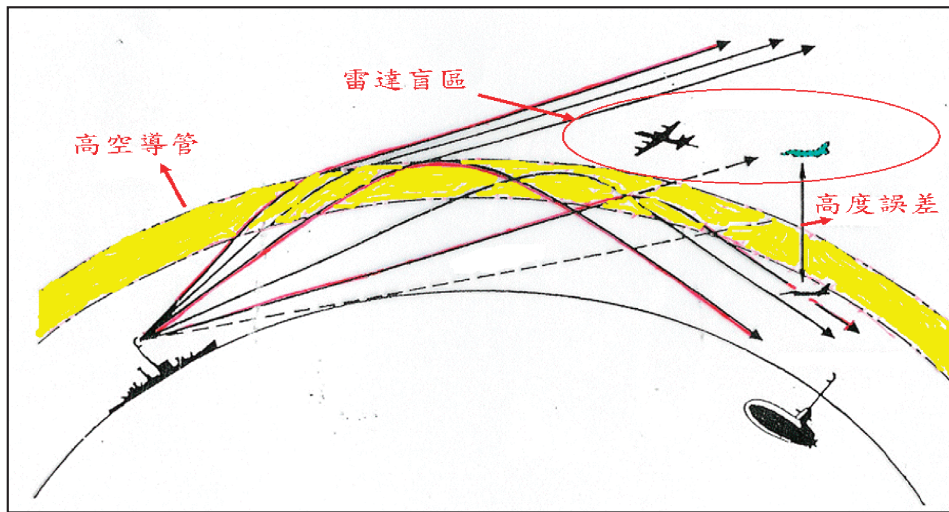


圖3 大氣導管對電磁波之影響示意圖（摘自「台灣地區大氣導管特性之研究」）

飛彈攔截飛毛腿飛彈的歷次作戰中，因為逆溫層的發生而產生大氣導管，導致雷達發現假目標而自動攻擊，沒有成功攔截飛毛腿飛彈⁴。我國目前也是以愛國者飛彈作為反彈道飛彈作戰的主力，因此對這個問題應該要特別重視。

大氣導管依其發生的地理位置不同可分為三種類型：地面導管（Surface duct）、空中導管（Elevated duct）和蒸發導管（Evaporation duct）。以下分別對此三種類型大氣導管做分析：

（一）地面導管（Surface duct）

如果大氣導管的底層是以地表面為邊界層，此種導管即稱之為地面導管（圖4）。地面導管發生高度在數公尺至數百公尺均有可能，其厚度一般在三百公尺以內。此種導

管有助於越地平面的電波通訊或偵查，也就是說可將地面雷達的有效偵蒐距離提升，為實現超視距探測、預警、截收、通信和打擊提供了有利條件，特別是對頻率在100MHz以上的電波；造成這種導管的原因可能是受到氣流抬升之後的沉降作用，例如海陸風的作用、地表的逆溫層等天氣現象，均有可能導致地面導管的發生。此種導管的發生將會對陸基雷達造成影響。

（二）空中導管（Elevated duct）

所謂的空中導管指的是導管層的底部位於地表以上的高空，其發生高度可延伸至6公里，一般情況多在3公里以下，但也有少數發生在6公里以上的高度（圖5）；厚度方面主要在百公尺以上，對特高頻以上的波段有較大的影響。引發此種導管的天氣條件，主

要是天氣系統所伴隨的沉降作用所造成，例如逆溫層的發生或兩個移行氣團之間的界面。此種導管的發生將會對空中戰機雷達造成影響，或是導致陸基雷達對目標物高度的誤判。

(三) 蒸發導管 (Evaporation duct)

蒸發導管的發生環境是在廣大的海洋區域，其產生原因是海洋表面與其表層空氣

因界面連續的關係，使表層的相對溼度為100%，這種飽和狀態一直持續至某一高度，在該處的相對溼度急劇地減少使得折射指數梯度改變很大，而導致蒸發導管的發生（圖6）。平均而言，蒸發導管高度值一般介於0至40公尺之間，並隨緯度、季節、一日內不同時間而變化，一般是在低緯度海域，夏季白天其高度較高；蒸發導管高度平均在較高緯度區約為8公尺，較低緯度區（例如台灣近海）則為30公尺。此種導管最特殊的一點就是具有持久存在的性質，所影響的頻率在3GHz以上。由於此種導管是在海洋面上產生，對艦艇上之雷達通訊及偵蒐效能皆會造成影響，因此各國海軍才積極地於作戰艦艇發展電戰作業系統（如美軍AREPS）⁵，其目的就在於有效應用或避免此種導管對雷達所造成的影響。

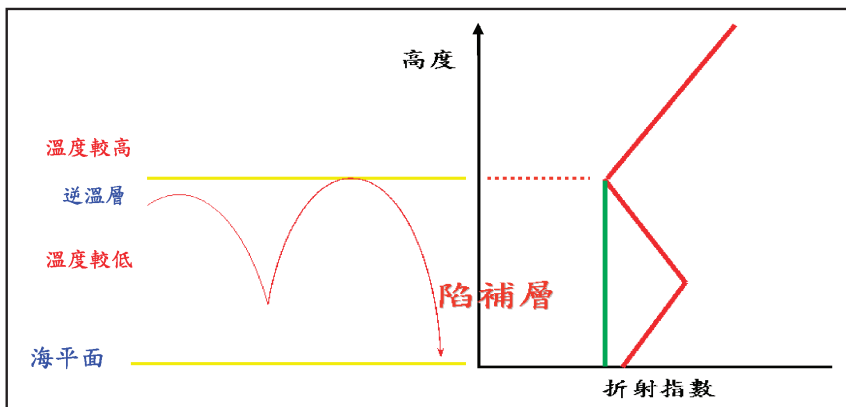


圖4 地面導管之折射指數剖面 (自繪)

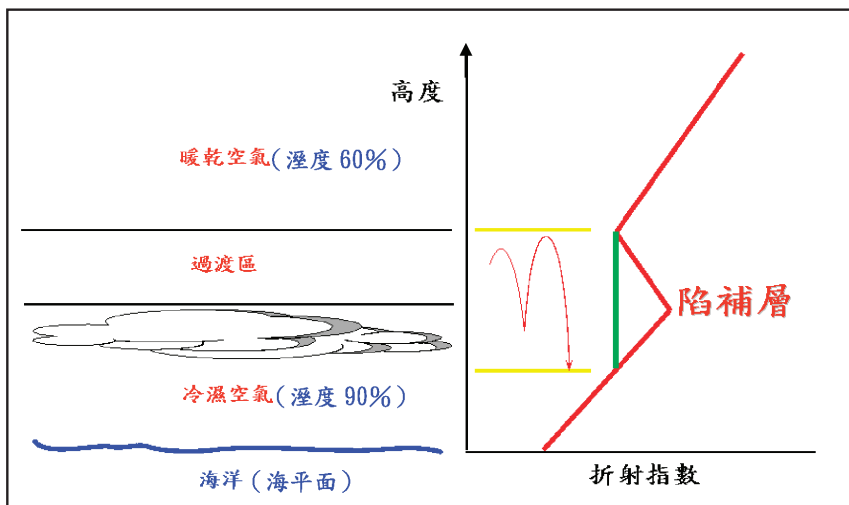


圖5 空中導管之折射率剖面 (自繪)

蒸發導管最特殊的一點就是具有持久存在的性質，所影響的頻率在3GHz以上。由於此種導管是在海洋面上產生，對艦艇上之雷達通訊及偵蒐效能皆會造成影響，因此各國海軍才積極地於作戰艦艇發展電戰作業系統（如美軍AREPS）⁵，其目的就在於有效應用或避免此種導管對雷達所造成的影響。

三、大氣導管影響雷達偵蒐及作戰

當大氣導管現象發生時，會導致電磁波被陷捕在其中而增加其傳播距離，但並不是所有在導管中傳播的電磁波都會被陷捕，而是有一些限制條件，例如最大穿透角與最低陷捕頻率的限制。最大穿透角可由大氣導管的特性參數計算出來，低於這個角度所發射的電磁波才會被導管所陷捕住，高於這個角度所發射的電磁波則會穿透導管而不會被陷捕在導管內。另外，最低陷捕頻率亦可由大氣導管的特性參數計算出來，發射電波頻率高於此頻率較容易被導管所陷捕，反之則較不易被導管所陷捕。因此，若是能得到大氣導管特性參數，便能計算出最大穿透角與最低陷捕頻率等資訊，之後便可依照實際作戰需求調整雷達參數。若是想利用大氣導管偵測到較遠距離的目標物，可將雷達天線仰角調

整至小於最大穿透角的角度，並將發射頻率設定在高於最低陷捕頻率的頻段，目前世界各國所研發的「地波超視距雷達」，即是利用此原理而達到超視距作戰之目的；若是不想電波被大氣導管所陷捕而導致雷達盲區產生，則可將雷達天線仰角調整至大於最大穿透角的角度，並將發射頻率設定在低於最低陷捕頻率的頻段，如此便可依據實際作戰戰略需求，調整雷達參數以避免或利用大氣導管現象，發揮雷達最佳之偵蒐效能。

1961年，蘇聯由波羅的海常見的电波大氣導管現象得到啟示，開始進行超地平線反艦飛彈射控雷達的研發，當時其發現在很多情況下，因大氣某些層次的導管或散射現象，可以讓波長3公分（X頻）至20公分（S頻）訊號傳輸超越水平線，最遠達400公里（220海浬）。因為發現這樣的特性，研發人員將導

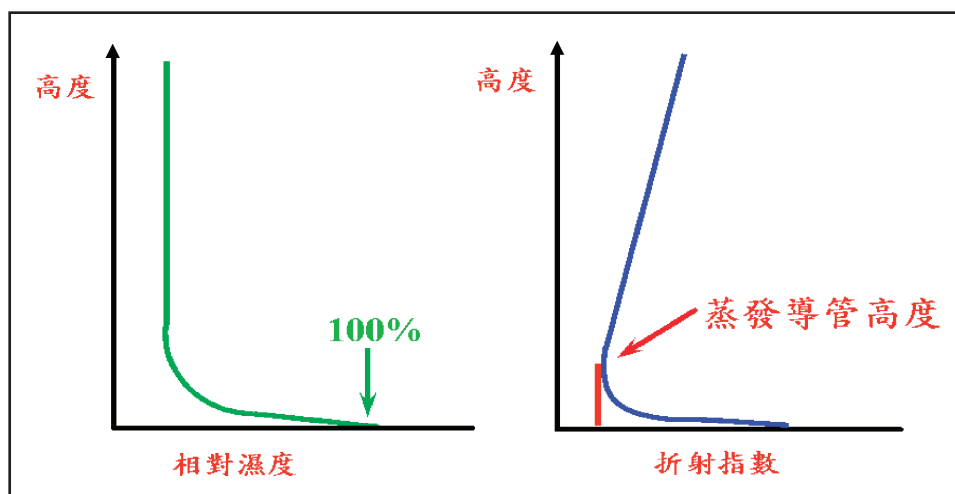


圖6 蒸發導管之折射率剖面（自繪）

管系統整合在一系列火控系統中，發展出一種稱為米涅拉爾（Mineral）型的射控雷達系統，而近年來中共在獲得俄羅斯的技術援助下，已將此系統安裝於其現代級驅逐艦上（圖7），利用大氣導管傳播特性，最遠搜索距離可達180海浬，大幅提升中共超視距攻擊之能力。

由於大氣導管現象會對電磁波傳播造成影響，同時也影響到雷達偵蒐之範圍及效能，而在戰時，對敵情的蒐集和研判是否完整正確，往往是決定戰爭成敗的關鍵因素，因此大氣導管對作戰之影響是非常大的。舉例來說，當大氣導管存在時，因部分電波被其所陷捕而導致雷達盲區產生，在此區內的目標物是無法被雷達所偵測到的，因此，若敵人利用此一大氣導管特性，將戰機或船艦駛入雷達盲區內避開我方雷達之偵查，如此將對作戰情勢造成極大之影響（圖8）。另外，某些空中導管的發生會導致電波的異常偏折現象，造成雷達對目標物位置的誤判或發現假目標，這些因大氣導管現象影響雷達產生錯誤情資的情形，很容易使戰場指揮官誤判情勢，下達錯誤指令，進而影響到作戰的成敗。當然，「水能載舟，亦能覆舟」，這些大氣導管現象特性對雷達之影響亦可反過來為我方所利用，以提供戰略上的部署考量，同時利用電磁波在導管中傳播距離遠超過正

常傳播距離之特性，可調整雷達參數使電波被大氣導管陷捕而增加傳播距離，建立大範圍的雷達預警網，將有利於敵情之偵蒐，提早因應敵方之攻擊行動。因此，在作戰中能掌握大氣導管特性的一方，便可使雷達發揮最大效能，並減少誤判的發生，提高作戰成功之籌碼。

肆、大氣環境對光電裝備之影響

光電裝備最大的特色是工作在光波段，具有分辨率高、信息容量大、隱蔽性及抗干擾性好、可全天候工作等特性，但受天氣條件的影響較大，例如大氣中的水蒸氣、二氧化碳、其他化學成分和塵埃等對不同波長的光有不同的吸收及散射，因而不同波長的光在大氣中有不同的透射率（圖9）。現代戰場的偵察手段和設備種類非常多，按照使用頻譜



圖7 安裝於中共海軍054A 級護衛艦之米涅拉爾射控雷達（摘自<http://mil.eastday.com>）

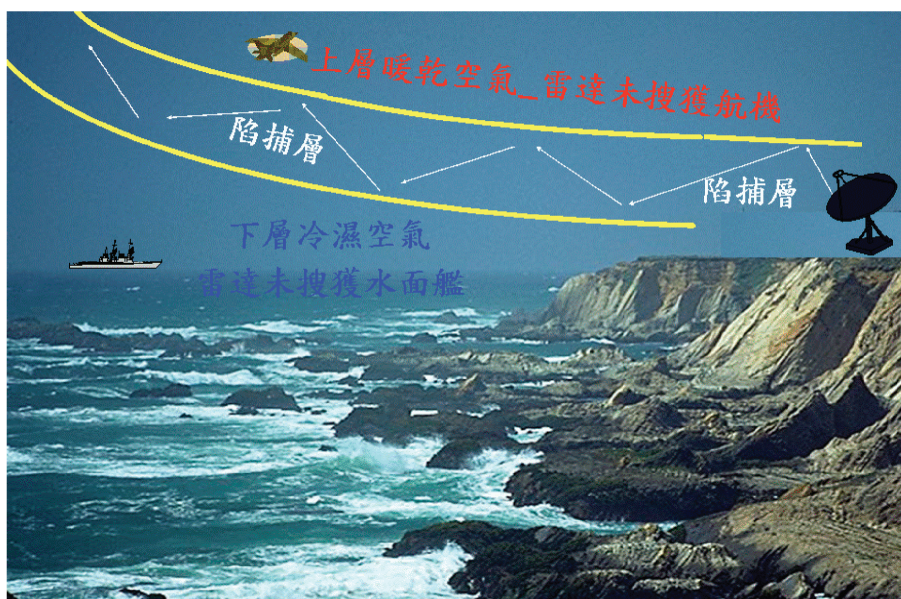


圖8 大氣導管影響作戰示意圖（自繪）

來分，可分為可見光、紅外線和無線電波，其中光學（可見光、紅外線）偵查主要是利用目標與背景反射或輻射電磁波的差異來發現和識別目標，而大氣環境對各種光學偵察手段都有不同程度的影響。

各種物體對照射其上的可見光的反射率（又稱亮度係數）是不同的，物體間存在著亮度差異或顏色差異，因此光學偵察器材可以將目標從其所處背景中分離識別出來。但在實際情況中，在觀察遠處目標時，目標物的輪廓線視天氣可能每天都會發生變化，且來自目標和背景的輻射經過大氣傳播到觀察器材時將受到衰減，這些因素影響人觀察遠處物體的能力，同樣也影響光電傳感器，主要是因為大氣的吸收和散射導致的結果。

主要吸收物質包括水、二氧化碳、臭氧和碳氫化合物等，散射則是由大氣中分子和懸浮微粒引起的。除此之外，其他許多變數也對大氣傳輸有影響，包括：溫度、傳感器和目標的高度、溼度、氣壓等，這些大氣因素可以減少被傳感器接收到的物體輻射量，使圖像模糊，這種影響的程度與輻射波長有關，不同的波長可計算得到不同的「大氣透過率」。

吸收基本上是大氣分子從某些入射光子吸收能量的量子過程，在可見光波段除了在 $0.65\ \mu\text{m}$ 和 $0.85\ \mu\text{m}$ 之間的波段存在水吸收外，不存在明顯的吸收和輻射，然而在紅外線波段卻存在大量的分子具有高吸收率。大氣中能引起強烈紅外線吸收的氣體主要是水

汽、二氧化碳和臭氧，在3~5 μm波段，主要的吸收來自於二氧化碳，而水在這個區域的吸收很弱；在8~12 μm 波段，主要存在水、二氧化碳、臭氧的吸收（圖10）；由於其密度隨高度變化，因此在不同高度上，透明區域有一定的變化。在低層大氣中，水是最主

要的吸收因子，這也是中波紅外線比長波紅外線更適合高濕度環境下的根本原因。

伍、對本軍未來精進之建言

（一）積極將美海軍大氣折射效應預報系統推廣至各作戰艦艇

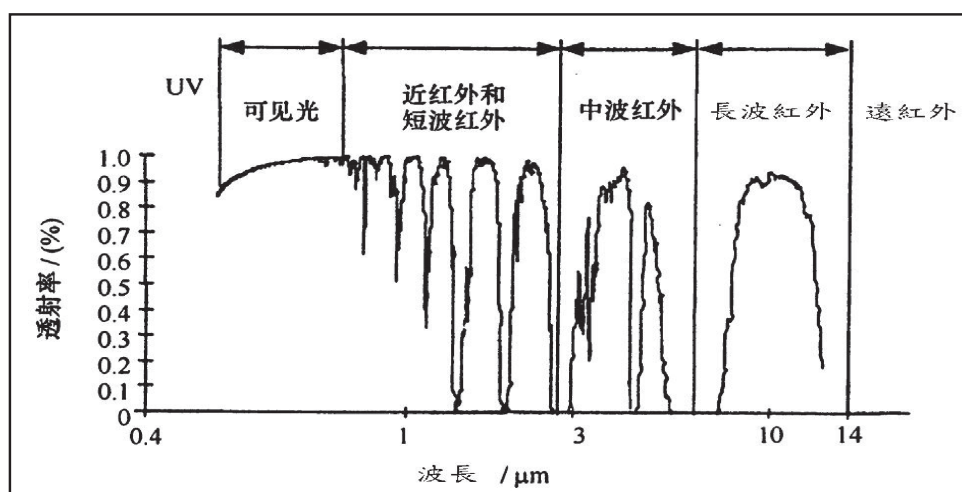


圖9 對1公里路程的典型大氣傳輸（摘自「海軍武器裝備與海戰場環境概論」）

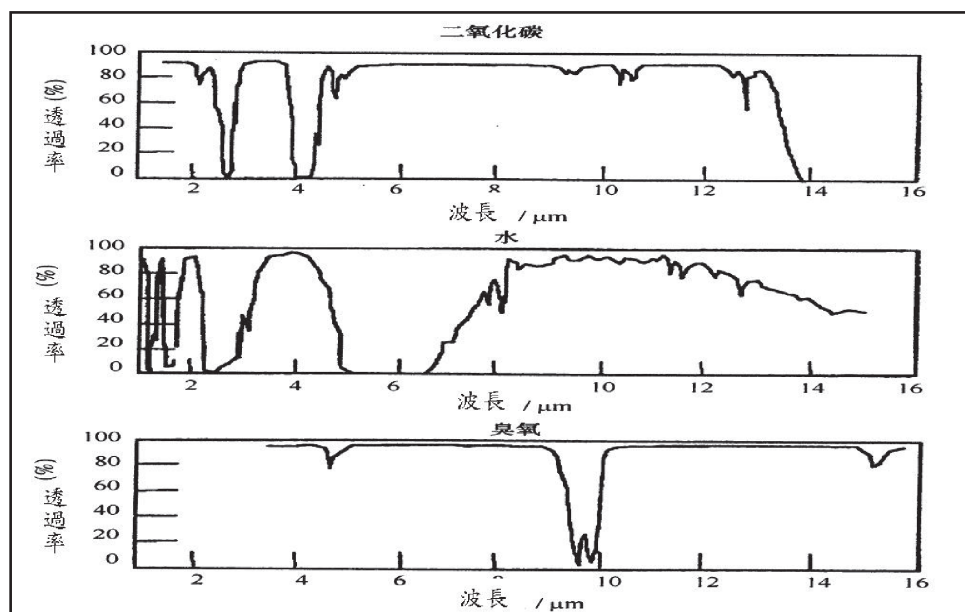


圖10 1公里路徑大氣氣體的透過率（摘自「海軍武器裝備與海戰場環境概論」）

對於我海軍防空作戰艦艇而言，應積極引進美海軍大氣折射效應預報系統（Advanced Refractive Effects Prediction System，AREPS），此系統可依據實測氣象參數計算出大氣導管相關資料，並可用來計算及顯示有關大氣導管特徵以及其所伴隨的雷達盲區與有效偵蒐距離等訊息，這些資訊相信對於艦艇指揮官決心的下達以及狀況的適當處置，將有高度參考價值。

（二）結合衛星「無線電掩星」（Radio Occultation）技術觀測資料與美軍大氣折射效應預報系統建立大氣導管警報機制

在美軍大氣折射效應預報系統中，需藉由輸入大氣垂直剖面之氣象參數（探空氣球得

到），以計算得到大氣導管高度、強度、厚度等特性參數。但在廣大海洋面之上要取得探空資料相當不易，此部份可藉由全球定位衛星（GPS）之「無線電掩星」技術來彌補資料的不足。此技術是利用低軌道衛星所量測的GPS無線電波訊號經過電離層及大氣層的偏折角度，推算得到大氣的折射率，並由此演算出相對應之大氣溫度、氣壓和水氣以及電離層電子密度的垂直分佈資料（圖11）。以我國與美國合作發射之福爾摩沙衛星三號而言，觀測範圍涵蓋全球大氣層及電離層資訊，每日全球約有2500筆觀測資料；若能透過數值化天氣圖資傳輸或大成系統傳送相關氣象情資給各艦艇，進而結合該系統得到更完整之大氣導管相關資訊，如此將可幫助作

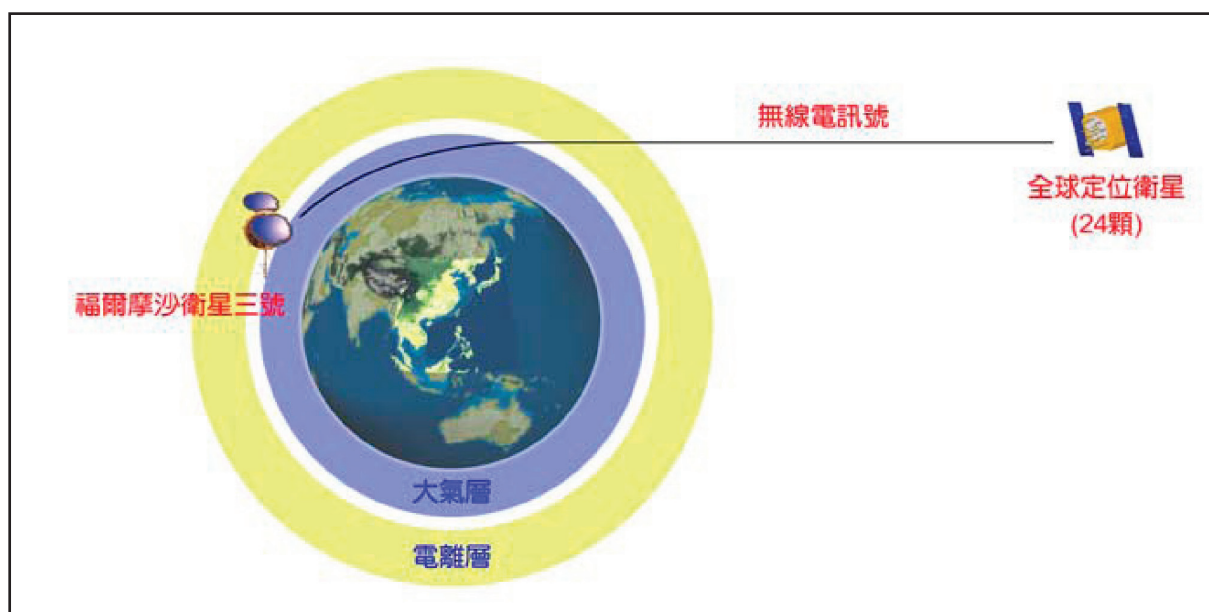



圖11 福爾摩沙衛星三號「無線電掩星」技術示意圖（摘自「世界新氣象-福爾摩沙衛星三號介紹」）

戰艦艇進行有關大氣導管的即時判斷，俾利進行雷達參數調整，對其電戰偵蒐之能力將會有相當大的助益。

陸、結語

大氣環境中各項參數，均對我軍作戰有著直接的影響，不論是電離層對無線電通信之影響，大氣導管現象對雷達效能之影響，或是大氣環境參數對光電系統之影響，均會使得我軍防空武器的整體效能無法充分發揮。未來我軍防空作戰是海、空、天以至於電磁一體化的戰爭，是一場整體戰、立體戰、導彈戰及電子戰，雷達應用、無線電通信及光電子技術將主導戰爭的成敗，因此唯有持續加強對大氣環境參數之掌握，發展精進數值天氣預報模式，深入研究各項武器裝備與環境適應性之關聯，積極發展具遠距離作戰能力之電戰設備，以具長程偵蒐能力之雷達搭配各項武器裝備進行遠距離監控，方能建構更完善之雷達預警網，有效提升我軍防空作戰能量。

因此為因應未來高科技作戰之趨勢，我軍應持續加強發展有關大氣環境對武器裝備性能影響之分析研究，提高我軍武器裝備的海戰場適應性，以期發揮海上作戰最大效益，確保國家安全。 

- 1 張軍等編著，《軍事氣象學》，中國氣象出版社，2005，頁63。
- 2 最高可用頻率，簡稱MUF，當短波通信的接收距離一定時，根據電離層的最大電子密度，有一最高頻率；當使用頻率超過此最高頻率時，電磁波將不能返回地面，接收台將收不到信號。這種由接收距離和電離層分布確定的最高頻率，稱為最高可用頻率。
- 3 中共船舶重工集團公司編著，《海軍武器裝備與海戰場環境概論》，中國海洋出版社，2007年11月，頁612。
- 4 焦國力主編，《環境武器新世紀武器裝備叢書》，中國國防工業出版社、冶金工業出版社，2001年1月。
- 5 美海軍大氣折射效應預報系統(Advanced Refractive Effects Prediction System, AREPS)為美國海軍電子實驗室(National Electron Laboratory Center, NELC)發展之整合大氣折射效應預報系統。本系統主要功能有電磁波的射線軌跡、涵蓋範圍模擬、電磁波的路徑損失模擬以及背景大氣的氣象參數統計，可用來計算及顯示雷達偵測範圍、傳播損失、訊號雜訊比、觀測盲區、UHF/VHF通信，並可結合地形資料，就電磁波傳遞因地形所受影響進行模擬，提供決策支援參考；目前本系統已被廣泛地使用於美海軍各作戰艦艇。

參考文獻

- 1 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，第843-848頁，1994年。
- 2 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〉，《第三屆國防科技研討會論文集》，1994年。
- 3 呂芳川、朱延祥，〈台灣地區蒸發導管效應實驗及偵蒐效益分析(II)〉，《國防科技合作研究報告》，2004年。
- 4 黃崇展，〈大氣導管效應影響雷達偵蒐之個案研究〉，《國防大學中正理工學院碩士論文》，2004年。
- 5 陳正一、顏隆政、方振州、朱崇惠，〈世界新氣象-福爾摩沙衛星三號介紹〉，2005年。
- 6 張軍等編著，《軍事氣象學》，氣象出版社，2005年7月。
- 7 焦國力主編，《環境武器新世紀武器裝備叢書》，中國國防工業出版社、冶金工業出版社，2001年1月。
- 8 中共船舶重工集團公司編著，《海軍武器裝備與海戰場環境概論》，海洋出版社，2007年11月。