

春季天氣變化影響戰管雷達偵蒐效能之統計分析

黃崇展¹ 鄭德龍² 呂芳川³

¹空軍氣象聯隊第十基地天氣中心

²國防大學空軍指揮參謀學院

³私立南榮技術學院

摘要

臺灣位於廣大歐亞大陸與太平洋交界處，大氣中溫度、溼度、壓力等因子存在著劇烈的垂直梯度，造成電磁波異常的傳播路徑，進而影響雷達偵蒐定位的精確度。戰管的偵蒐雷達為擔負著我國空防安全的重任，因此瞭解天氣因子影響雷達偵蒐的距離、高度、角度等誤差特性，並建立個別雷達陣地之偵蒐誤差兵要資料，為我執行防空作戰、維護空防安全刻不容緩之議題。

研究結果得知，無論是各天氣類型及各月份之統計結果，距離誤差值均相當微小，可予以忽略；高度誤差隨偵蒐高度增加而快速增加，呈非線性關係，在 5,000 呎高度約為 5%~6%，而 18,000 呎高度則為 17%；臺灣地區受高壓籠罩之天氣型態影響，盛行風向為北風，高度誤差值較小；反之，臺灣地區風向為西南或南方時，高度誤差值較大；仰角誤差與天氣類型及月份無明顯差異，誤差值概略與偵蒐高度或距離成正比關係；平均雷達最低被陷捕頻率為 588.4MHz，其影響頻段屬電子作戰 C 頻段(或軍事雷達 L 頻段)，但 20,000 呎以上空層之影響頻段以電子作戰 D 頻段(或軍事雷達 L 頻段)居多。

關鍵字：雷達偵蒐定位、大氣導管、距離誤差、角度誤差、高度誤差

一、前言

基於 1864 年 Maxwell 所提出的電磁理論，電磁波在大氣中傳播的速度與介質的介電常數有關，而介電常數又與大氣折射指數 (Refractive Index, n) 有關。而對流層的大氣折射指數，是與大氣環境的氣壓、水蒸氣壓及溫度是相關的，所以電磁波在對流層的傳播，將受到大氣折射指數隨空間的變化而影響其傳播路徑，也就是說其傳播現象將受到大氣折射指數在空間及時間上的不均勻分佈，而產生不同的傳播路徑。

依據電磁波在大氣中傳播路徑之彎折情形，基本上將電磁波在大氣的折射現象區分成 4 種類型，即正常折射 (Standard-refractive)、次折射 (Sub-refractive)、超折射

(Super-refractive) 和陷捕 (Trapping)；而其中的陷捕即表示大氣環境存在有某層狀結構，使低仰角發射的電磁波侷限在此種結構中而無法逸出，宛如波導管 (Waveguide)，此種的結構體稱為大氣導管 (Atmospheric Duct)。

Turton (1988) 【1】等提出 5 種天氣型態會產生大氣導管現象：洋面上的蒸發、反氣旋沉降、鋒面沉降、夜間地表輻射冷卻及平流。大氣導管因生成的位置不同可區分成 3 類：在海面上的稱作蒸發導管，它與海面上的相對濕度變化有關；在陸地上，可分為地面導管及空中導管，其發生均與大氣逆溫層的產生有關聯。

天氣變化會影響大氣折射率或大氣導管之分佈情況，地理位置、海陸分佈、不同季節，及日夜變化亦是。朱 (1984) 【2】統計 1969

至1981年板橋探空資料，獲得臺北地區地面大氣折射率之季節變化，惟因解析度有限，只得出巨觀基本特性，無法看出微觀變化；朱(1994)【3】等利用板橋探空資料及海洋研究船實驗結果，得知蒸發導管高度變化與地理位置、天氣系統型態有密切關係；丁(1994)【4】等統計不同季節、不同天氣系統的大氣導管特性；呂(1998)【5】等針對臺灣地區大氣導管的季節、日夜間變化方面之統計特性作相關研究；Zhu與Atkinson(2005)【6】利用中尺度模式(Mesoscale Model Version5, MM5)對波斯灣之大氣折射氣候特性進行模擬與統計，認為大氣折射會受到海陸地域、季節及日夜變化所影響。

為了掌握未來大氣導管的演變情形，運用數值模式來預報成了重要憑藉，現已有初步成果，但大氣導管的強度、厚度等方面仍差異較大，有待突破。Atkinson(2001)【7】等利用模式預報波斯灣之海洋邊界層內大氣導管在強、弱風條件下的演變，模式對於導管發生、位置有不錯的表現，但導管厚度及強度方面則稍嫌不足；Haack與Burk(2001)【8】利用美國海軍中尺度海氣耦合預報系統(Coupled Ocean - Atmosphere Mesoscale Prediction System, COAMPS)，對夏季期間加州海岸地區海陸邊界層大氣折射狀況進行模擬與預報，獲得地面導管正確的預報率達82%，但導管強度過弱；朱(2007)【9】等利用WRF 數值模式，重建2003年7月3日夜間五分山氣象雷達觀測到的異常回波個案，探討大氣導管的發生機制與空間演變，了解異常回波的生成機制、維持與消散。同時，WRF模式可以掌握導管層之生成時間、高度與位置變化，可以彌補氣象觀測在時間與空間上的不足。

大氣導管造成電磁波異常傳播現象，不但影響了雷達偵蒐誤差，亦影響雷達搜索範圍。薛(2000)【10】分析1994年1月至1999年9

月板橋探空資料，發現仰角誤差隨著季節呈現高斯分布；呂(2004)【11】等於2004年在臺灣東南海域進行海上蒸發導管實驗，發現蒸發導管使得船艦及反潛機雷達搜索範圍更為擴大。

黃(2004)【12】針對2001年2月27日至3月6日(總計8日)春季時期大陸冷高壓不同出海路徑之個案，分析大氣導管與逆溫層所在高度之關聯性，並探討因大氣導管造成之角度、高度與距離之誤差；本文賡續利用此分析結果，代入臺灣北部地區2007年至2011年之2月至4月春季時期氣象探空資料(總計15個月)，來統計、研析北部戰管雷達於各天氣型態、各月份對較低空層(5000呎)及最大蒐索半徑(300公里)的偵蒐效能特徵，期能獲得雷達偵蒐誤差特性之兵要資料，俾掌握天氣因素影響偵蒐定位效能的程度，並研擬相關之因應策略，適時供作業單位預警，維護空防安全。

二、 文獻回顧

2.1 對流層內電磁波傳播理論

電磁波在對流層的傳播現象，主要是跟大氣環境造成之折射現象有關，而影響電磁波在對流層傳播的機制，依Hitney(1985)【13】等大氣折射指數擾動的性質約略區分為標準機制和非標準機制等兩大機制，其代表電磁波為正常傳播抑是異常傳播，這對雷達通訊和目標物的偵蒐有很大的影響。

Bauer(1958)【14】等及Bean(1959)【15】等指出，在標準大氣時大氣折射指數隨高度的增加而呈現指數型(Exponential)遞減，在較低的高度為線性的直線。實際上，標準大氣的假設純粹是為了計算方便以及廣大陸地的長期平均結果。大氣環境因地形和其它因素，標準大氣是較少存在，而大氣折射指數異常的分佈常會發生。

當大氣的溫度與溼度在垂直方向有異常

的分布現象，導致所對應的大氣折射指數的垂直梯度偏離指數型的變化時，標準的電磁波傳播模式將不再適用，而必須依據實際的大氣折射指數的垂直分布計算實際電波傳播的路徑。

2.1.1 定義「大氣折射指數」

對於一個具有乾空氣、水氣、自由電子的大氣而言，故後的大氣折射指數可簡化為：

$$n = 1 + \left(\frac{77.6 P}{T} + \frac{375000 e}{T^2} \right) \times 10^{-6} \quad (2.1)$$

式中P為大氣氣壓，單位是百帕(hPa)，e為大氣中的水蒸氣壓，單位亦為百帕(hPa)，T為絕對溫度，單位是絕對溫度K。故得知大氣折射指數是大氣氣壓、水蒸氣壓和絕對溫度的函數。

2.1.2 定義「大氣折射率」

在實際計算數值中，發現大氣折射指數是一個非常接近於1的數值，其變動範圍主要在1.000100至1.000400之間。為了清楚地觀察到它的擾動情形，Bean(1966)【16】定義大氣折射率(N, Atmospheric Refractivity)與大氣折射指數(n)的關係：

$$N = (n - 1) \times 10^6 = \frac{77.6 P}{T} + \frac{375000 e}{T^2} \quad (2.2)$$

2.1.3 定義「修正後的大氣折射率」

將N參數加入考慮高度以及地球曲率的因素，發展出一個新的折射率參數，稱作修正後的折射率(M, Modified Refractivity)，定義為下式：

$$M(h) = \left[(n - 1) + \frac{h}{R_0} \right] \times 10^6 = N(h) + \frac{h}{R_0} \times 10^6$$

$$= \frac{77.6 P}{T} + \frac{375000 e}{T^2} + \frac{h}{R_0} \times 10^6 \quad (2.3)$$

其中Ro為地球曲率半徑，h為所在高度。

2.1.4 非標準傳播機制下之傳播路徑

射線彎曲的曲率和地球表面曲率的比較結果，歸納出4種類型：正常、次折射、超折射和陷捕。4種電磁波傳播路徑如圖1所示。

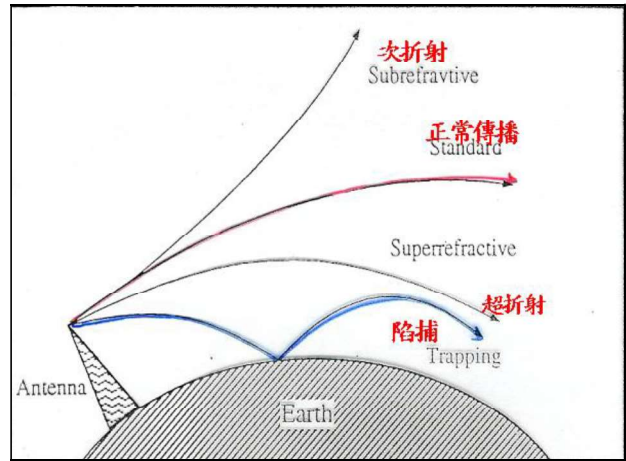


圖1 非標準傳播機制下電磁波傳播路徑

將實際地球半徑(約6371公里)代入式(2.4)中，並對M作隨高度h的微分，得

$$\frac{dM}{dh} = \frac{dN}{dh} + 157 \quad (2.4)$$

Patterson (1994)【17】等認為非標準傳播機制下，4種電磁波傳播路徑大氣折射率與修正後的大氣折射指數之範圍如表1所示。

表1 非標準傳播機制下電磁波傳播路徑分類

類型	dN/dh (N/Km)	dM/dh (N/Km)
陷捕	dN/dh ≤ -157	-157 < dM/dh ≤ 0
超折射	-157 < dN/dh ≤ -79	0 < dM/dh ≤ 78
正常折射	-79 < dN/dh ≤ 0	78 < dM/dh ≤ 157
次折射	dN/dh > 0	157 ≤ dM/dh

一、正常：大氣折射率梯度是隨高度增加而遞減，故由Snell's Law定律可知電波射線將會逐漸向下彎折直到接觸地表，這種情況的射線曲率將比地球表面的曲率小，且其大氣折射率梯度值變化範圍在-79至0(N/Km)之間。

二、次折射：大氣折射率梯度值是大於0(N/Km)，由於它是向上偏折，將使得電波傳播的有效距離縮短，造成電波迅速衰減。Goldhirsh (1994)【18】等在美國的大西洋海岸(Mid-Atlantic Coast)進行視線內的電波傳播實驗，發現由於次折射的發生，產生持續性的嚴重電波衰減事件(SDF, Sustained Deep Fade)。其指

出當有暖濕的空氣通過較冷的海水時，由於海水和空氣之間的溫差產生了逆溫層，造成飽和水蒸氣壓隨高度的增加而增大，又上空是暖濕的空氣，表示水氣壓增大。可理解在此逆溫層中，折射率將隨高度增加而增大，亦即其梯度值大於 $0(dN/dh>0)$ ，於是造成射線彎折向上傳播而不是向下傳播。

三、超折射：折射率梯度值介於 -157 至 $-79(N/Km)$ 之間，這種折射我們就稱為超折射。它的特徵就是造成射線的曲率比一般正常射線的曲率大，但是卻比地球表面曲率小。故此種折射有助於延伸無線電波水平距離，使電波傳播有效距離增加。

四、陷補：這種傳播情況是本研究將探討的重心之一，亦是在電波傳播過程中值得注意的現象。陷補表示當我們的大氣環境存在有某層狀結構，其內的大氣折射指數的垂直梯度值小於 $-157N/km$ 時電磁波在此種層狀結構中的傳播將發生異常現象。當 $dM/dh \leq 0$ (即 $dN/dh \leq -157 N/Km$) 時，由於電波射線之曲率大於地球表面之曲率，電波朝向地球表面彎折而被陷補(Trap)，換言之，此時大氣形成導波層(Trapping Layer)，導致大氣導管的產生，故利用M隨高度變化的曲線(M Profile)來判斷大氣是否有導管的存在。導管層內射線的曲率大於地表曲率，此種現象會導致電波傳播距離遠超過正常傳播情形，在導波管傳播使電磁波有增強的趨勢，這也就是大氣導管的重要性質。

2.1.5 N值的垂直梯度變化

在雷達波傳播過程中亦扮演著重要的角色，我們將(2.2)式對高度h作微分，得(2.5)式

$$\frac{dN}{dh} = \frac{77.6}{T} \cdot \frac{\partial P}{\partial h} + \left(-\frac{77.6P}{T^2} - \frac{2 \cdot 375000}{T^3} e \right) \cdot \frac{\partial T}{\partial h} + \frac{375000}{T^2} \cdot \frac{\partial e}{\partial h}$$

比較各項之係數，發現 $\partial e/\partial h$ (水蒸氣梯度)最有貢獻，且 $\partial e/\partial h$ 係數項的絕對值大於 $\partial T/\partial h$ 係數項的絕對值有3倍以上。所以，水氣梯度為發生導管的最重要因素。

2.1.6 最低被陷捕頻率

電磁波被陷捕的最低頻率與導管厚度有關，根據Dougherty與Hart(1976)【19】推導出大氣導管厚度(D)和最低被陷捕頻率(f_{min})的數學關係式：

$$f_{min} = 1572 \cdot D^{-1.8} \quad (2.6)$$

其中 f_{min} 的單位是GHz，D的單位是公尺。故如果能測知大氣導管的厚度值，將可利用上式迅速地得到最低被陷捕頻率。

2.2 天氣類型判別

使用中央氣象局每日發布之0000UTC及1200UTC地面天氣圖，作為判別天氣類型的基礎，依據大陸裂高壓、鋒面及低壓位置，來區分個案期間之天氣類型。春季天氣類型依序為分裂高壓在高緯度、長江口有分裂高壓出海、高壓迴流、鋒前暖區、鋒面過境及臺灣低壓生成等6類，茲舉例並說明各天氣類型在地面天氣圖之特徵：

一、分裂高壓在高緯度：大陸分裂高壓中心位於山西及河南省，涵蓋臺灣北部地區，風向東北，風速強勁(以2010年4月13日1200UTC個案為例，地面天氣圖如圖2所示)。

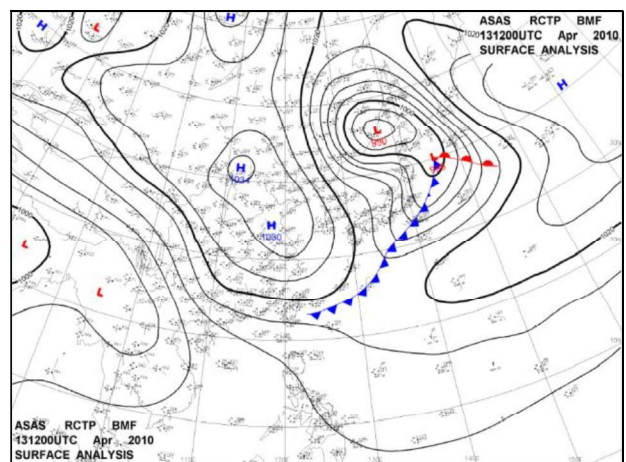


圖2 大陸分裂高壓在高緯度(資料來源：中央

氣象局)

二、長江口有分裂高壓出海：大陸分裂高壓中心位於長江口附近，範圍涵蓋臺灣地區；臺灣北部風向為東北風，風速微弱(以2010年4月16日1200UTC個案為例，地面天氣圖如圖3所示)。

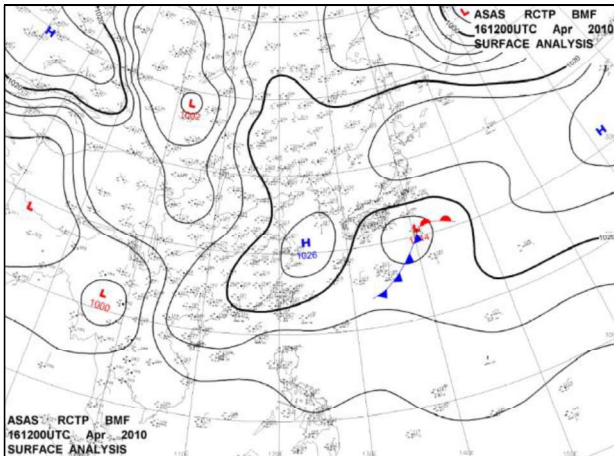


圖3 分裂高壓在長江口(資料來源：中央氣象局)

三、高壓迴流：大陸變性高壓位於日本本州島，臺灣東部風向為東風，北部為北風(因受中央山脈阻擋，形成過山氣流所致)，風速微弱(以2010年4月18日0000UTC個案為例，地面天氣圖如圖4所示)。

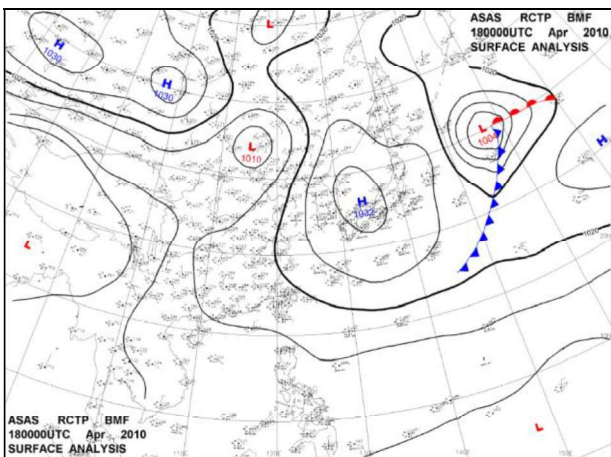


圖4 高壓迴流(資料來源：中央氣象局)

四、鋒前暖區：低壓中心位於長江口，鋒面自此中心向西南延伸經福建至廣西省，

高壓位於日本海；臺灣地區風向為南風(以2010年4月21日1200UTC個案為例，地面天氣圖如圖5所示)。

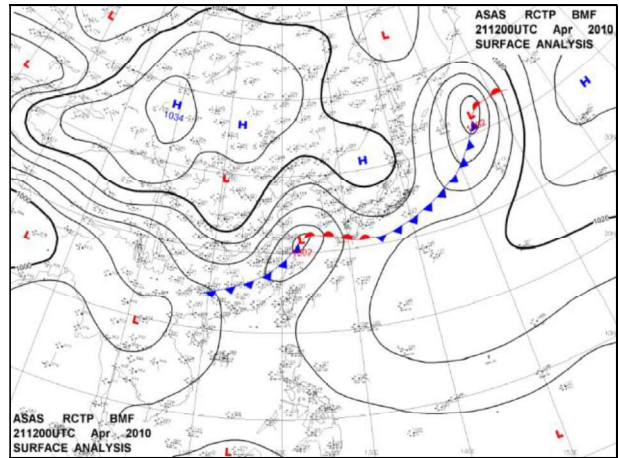


圖5 鋒前暖區(資料來源：中央氣象局)

五、鋒面過境：低壓中心位於東海，鋒面自此中心向西南延伸經臺灣北部至廣東省，高壓中心位於大陸雲貴一帶；臺灣北部地區風向為西北風，風速較強；東部、南部為南風，北部、東北部地區降雨明顯(以2008年月日1200UTC個案為例，地面天氣圖如圖6所示)。

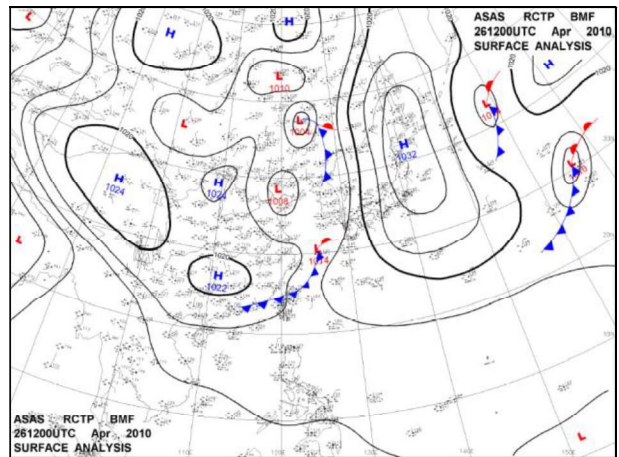


圖6 鋒面過境(資料來源：中央氣象局)

六、臺灣低壓：低壓中心位於臺灣東部外海一帶，高壓中心位於大陸江西省；臺灣地區風向為西北風，風速較強，北部、東北部地區降雨明顯(以2010年2月22日1200UTC個案為例，地面天氣圖如圖7所示)。

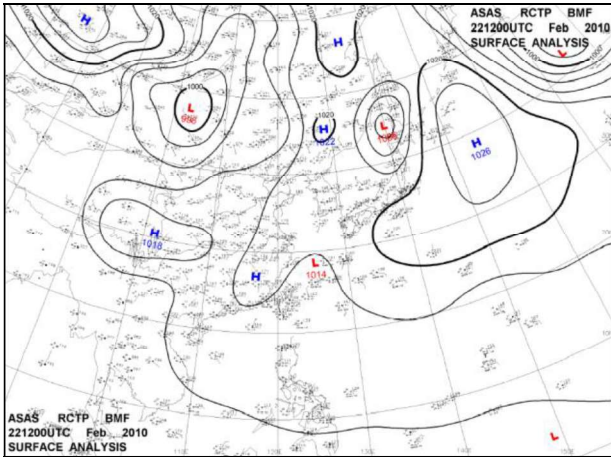


圖7 臺灣低壓(資料來源：中央氣象局)

2.3 探空資料運算模式

大氣折射理論為追蹤電磁波通過多層大氣傳播的情形，在遵循Snell's Law下，並考慮地球曲率的影響，而推得電磁波的傳播路徑。我們假設大氣之折射指數的等值線成球面狀，且成層環繞地球。其優點為使射線理論的方程式大為簡化，且在計算仰角、高度與距離上並無大誤差。

我們實際運用射線理論追蹤電磁波通過多層大氣(並不須對每一層電磁波的實際路徑做計算)，將電磁波藉由一簡化之近似方程式(通常為積分形式)表示，求得最終電磁波的方位、仰角等資料，再求出仰角、高度與距離誤差。

電磁波路徑為曲線而非直線，故目標之視位置(Apparent Position)偏離其真實位置，在應用射線理論觀念，推導出近似公式之後，可計算出仰角、高度及角度誤差。

電磁波射線折射之型態示意圖如圖8所示，各代號意義如下：

- 一、在A點的雷達所發射電磁波之仰角為 θ_0 。
- 二、在G點目標物之電磁波仰角為 θ 。
- 三、A點至G點的曲線為射線路徑，其半徑為 ρ ，曲線長度為S，直線距離為 S_0 。
- 四、雷達發射高度為 h_0 、目標視高度 h_a 、目標物高度h、雷達發射點至目標視高度之

- 間每一小層大氣的下邊界高度 h_i 、上邊界高度 h_{i+1} 。
- 五、下邊界的修正後大氣折射指數 M_i 、上邊界之修正後大氣折射指數 M_{i+1} 。
- 六、下邊界的大氣折射率 N_i 、上邊界之大氣折射率 N_{i+1} 、下邊界的大氣折射指數 n_i 、上邊界之大氣折射率 n_{i+1} 。
- 七、下邊界電磁波發射仰角 θ_i 、上邊界電磁波發射仰角 θ_{i+1} 。
- 八、地球半徑 r_0 、雷達發射點至地球中心距離 R_0 。
- 九、雷達發射點至目標視高度之間大氣的層數m。

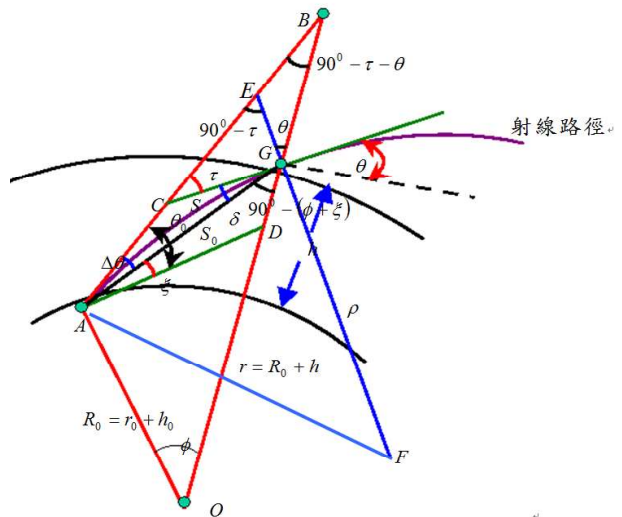


圖8 彎曲球面Snell's Law示意圖

由於目標物及雷達所在高度並非固定有探空資料，故目標物及雷達高度之M值，為其上、下邊界空層M值之內插值。

2.3.1 距離誤差(ΔS)

- 一、先代入上、下邊界M值、下邊界仰角，求出上邊界層之發射仰角。

$$\theta_{i+1} = \cos^{-1} \left\{ \left[1 + (n_i - n_{i+1}) \frac{(h_{i+1} - h_i)}{r_0 + h_0} \right] \cdot \cos \theta_i \right\} \quad (2.7)$$

- 二、將地球半徑、雷達高度，及上、下邊界仰角代入，求出各空層之距離誤差。

$$\Delta S_{i,i+1} = \frac{[(n_i - 1) + (n_{i+1} - 1)](h_{i+1} - h_i)}{\sin \theta_i + \sin \theta_{i+1}} \quad (2.8)$$

$$= \frac{\left[(M_{i+1} + M_i) \cdot 10^{-6} - \frac{(h_{i+1} + h_i - 2h_0)}{r_0} \right] (h_{i+1} - h_i)}{\sin \theta_i + \sin \theta_{i+1}}$$

三、將目標視高度以下至雷達高度之間全部 m 層大氣之距離誤差予以全部累加之後乘以 2，即得總距離誤差 ΔS_{total} 。

$$\Delta S_{total} = 2 \sum_{i=0}^{m-1} \frac{[(n_{i+1} - 1) + (n_i - 1)](h_{i+1} - h_i)}{\sin \theta_i + \sin \theta_{i+1}} \quad (2.9)$$

$$= 2 \sum_{i=0}^{m-1} \frac{\left[(M_{i+1} + M_i) \cdot 10^{-6} - \frac{(h_{i+1} + h_i - 2h_0)}{r_0} \right] (h_{i+1} - h_i)}{\sin \theta_i + \sin \theta_{i+1}}$$

2.3.2 高度誤差(Δh)

一、先將地球半徑、雷達高度，及上、下邊界之仰角、M 值、高度代入，求出上邊界之偏折角 $\tau_{i,i+1}$

$$\tau_{i,i+1} = \frac{(n_i - n_{i+1})}{\frac{1}{2}(\tan \theta_{i+1} + \tan \theta_i)}$$

$$= \frac{[(M_i - M_{i+1}) \cdot 10^{-6}] + \left(\frac{h_{i+1} - h_i}{r_0 + h_0} \right)}{\frac{1}{2}(\tan \theta_i + \tan \theta_{i+1})} \quad (2.10)$$

二、通過大氣之全部偏折角，為各小段偏折角的總合。

$$\tau_{total} = \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(n_i - n_{i+1})}{\frac{1}{2}(\tan \theta_i + \tan \theta_{i+1})}$$

$$= \sum_{i=0}^{m-1} \frac{[(M_i - M_{i+1}) \cdot 10^{-6}] + \left(\frac{h_{i+1} - h_i}{r_0} \right)}{\frac{1}{2}(\tan \theta_i + \tan \theta_{i+1})} \quad (2.11)$$

三、將總偏折角、地球半徑、雷達高度，及上、下邊界之仰角、M 值、高度代入，即為高度誤差。

$$\Delta h = \frac{(S^2 - h_a^2) \tau_{total}}{2S} \quad (2.12)$$

2.3.3 角度誤差(Δθ)

一、代入目標物、雷達之 M 值、雷達發射仰

角，求出目標物之仰角。

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \left[1 + (M_0 - M) \cdot 10^{-6} \right] \cdot \cos \theta_0 \right\} \quad (2.13)$$

二、代入目標物、雷達之 M 值、仰角、地球半徑、雷達高度、目標視高度、總偏折角及高度誤差值，即求出目標物之仰角誤差。

$$\Delta \theta = \frac{\tau \tan \theta - (M_0 - M) \cdot 10^{-6} + \frac{(h_0 + \Delta h - h_a)}{r_0} + \frac{\tau^2}{2}}{\tau + \tan \theta - \tan \theta_0} \quad (2.14)$$

三、影響雷達偵蒐效能統計結果

3.1 天氣類型統計結果

個案總數為 892 個，以「分裂高壓在高緯度」天氣類型所佔比例最高(32.17%)，而「臺灣低壓生成」(1.91%)最低(如表 2 所示)。若剔除「臺灣低壓生成」及合併「鋒前暖區」、「鋒面過境」與鋒面相關之天氣類型，則個案數量大致相等；故統計結果可達預期之效度。

表 2 春季天氣類型個案統計表

天氣類型	個案數	百分比
分裂高壓在高緯度	287	32.17%
長江口有分裂高壓出海	208	23.32%
高壓迴流	193	21.64%
鋒前暖區	100	11.21%
鋒面過境	87	9.75%
臺灣低壓生成	17	1.91%
總計	892	100%

3.2 偵蒐誤差統計結果

個案總數為 892 個，以「分裂高壓在高緯度」天氣類型所佔比例最高(32.17%)，而「臺灣低壓生成」(1.91%)最低(如表 2 所示)。若剔除「臺灣低壓生成」及合併「鋒前暖區」、「鋒面過境」與鋒面相關之天氣類型，則個案數量大致相等；故統計結果可達預期之效度。

3.2.1 各天氣類型偵蒐誤差

一、目標物高度5,000呎個案

此時雷達高度250公尺(820.21呎)、偵蒐距離72,482.9公尺(39.141海哩)、目標物高度1,515公尺(5,000呎)、雷達發射仰角1度。各天氣型態之偵蒐誤差統計結果如表3所示。

表3 各天氣型態偵蒐高度5,000呎個案誤差統計

天氣類型	距離誤差(呎)	高度誤差(呎)	角度誤差(度)	距離誤差率(%)	高度誤差率(%)	角度誤差率(%)
分裂高壓在高緯度	136.319	324.377	0.17036	0.048	6.526	17.036
長江口有分裂高壓出海	133.169	271.194	0.14318	0.047	5.456	14.318
高壓迴流	137.303	323.753	0.16950	0.048	6.514	16.950
鋒前暖區	139.665	327.001	0.17353	0.049	6.579	17.353
鋒面過境	138.648	300.722	0.15793	0.049	6.050	15.793
臺灣低壓	139.107	310.991	0.13835	0.049	6.257	13.835

二、目標物高度300公里個案

此時雷達高度250公尺(820.21呎)、偵蒐距離300,000公尺(161.988海哩)、目標物高度5,485.7公尺(18,014.7呎)、仰角1度。各天氣型態之偵蒐誤差統計結果如表4所示。

表4 各天氣型態偵蒐高度300公里個案誤差統計

天氣類型	距離誤差(呎)	高度誤差(呎)	角度誤差(度)	距離誤差率(%)	高度誤差率(%)	角度誤差率(%)
分裂高壓在高緯度	345.112	2987.500	0.47323	0.035	17.506	47.323
長江口有分裂高壓出海	341.306	2937.730	0.46398	0.035	17.101	46.398
高壓迴流	345.472	3194.652	0.51190	0.035	18.597	51.190
鋒前暖區	351.772	3393.799	0.54172	0.036	19.756	54.172

鋒面過境	348.163	3231.463	0.51275	0.035	18.811	51.275
臺灣低壓	350.230	3180.184	0.50214	0.036	18.513	50.214

3.2.2 各月份偵蒐誤差

一、目標物高度5,000呎個案

此時雷達高度250公尺(820.21呎)、偵蒐距離72,482.9公尺(39.141海哩)、目標物高度1,515公尺(5,000呎)、雷達發射仰角1度。各月份偵蒐誤差統計結果如表5所示。

表5 各月份偵蒐高度5,000呎個案誤差統計

月份	距離誤差(呎)	高度誤差(呎)	角度誤差(度)	距離誤差率(%)	高度誤差率(%)	角度誤差率(%)
2月份	136.139	297.375	0.15781	0.057	7.166	15.781
3月份	136.680	279.724	0.15101	0.057	6.740	15.101
4月份	139.009	307.119	0.15985	0.058	7.400	15.985
平均	137.369	294.521	0.15614	0.058	7.096	15.614

二、目標物高度300公里個案

此時雷達高度250公尺(820.21呎)、偵蒐距離300,000公尺(161.988海哩)、目標物高度5,485.7公尺(18,014.7呎)、仰角1度。各天氣型態之偵蒐誤差統計結果如表6所示。

表6 各月份偵蒐高度300公里個案誤差統計

月份	距離誤差(呎)	高度誤差(呎)	角度誤差(度)	距離誤差率(%)	高度誤差率(%)	角度誤差率(%)
2月份	342.881	3133.169	0.49751	0.035	18.239	49.751
3月份	345.078	3032.316	0.47950	0.035	17.652	47.950
4月份	351.214	3165.584	0.50207	0.036	18.428	50.207
平均	346.457	3109.022	0.49278	0.035	18.090	49.278

3.2.3 最低被陷捕頻率統計結果

將空中導管區分為700hPa(約在20,000呎高度)以下空層(低空導管)、700hPa以上空層(高空導管)兩部分,分別統計個案期間分裂高壓在高緯度、長江口有分裂高壓出海、高壓迴流、鋒前暖區、臺灣低壓生成等6大天氣類型陷捕層的數量、平均的高度、厚度,並計算最低被陷捕頻率,其結果如表7、表8所示。表7 板橋測站700hPa以下空層大氣導管高度、厚度統計表

天氣類型	陷捕層數量	百分比 (%)	平均陷捕高度(呎)	平均陷捕厚度(呎)	最低被陷捕頻率 (GHz)
分裂高壓在高緯度	75	21.68	6079.429	254.068	0.6256
長江口有分裂高壓出海	92	26.59	5930.282	224.278	0.7831
高壓迴流	90	26.01	5678.872	281.759	0.5194
鋒前暖區	52	15.03	4905.545	270.472	0.5590
鋒面過境	34	9.83	4955.709	316.699	0.4208
臺灣低壓生成	3	0.87	6695.118	358.694	0.3363
總計/平均	346	100.00	5683.596	262.861	0.5884

表8 板橋測站700hPa以上空層大氣導管高度、厚度統計表

天氣類型	陷捕層數量	百分比 (%)	平均陷捕高度(呎)	平均陷捕厚度(呎)	最低被陷捕頻率 (GHz)
分裂高壓在高緯度	53	37.06	13373.327	190.420	1.0514
長江口有分裂高壓出海	33	23.08	13290.388	194.751	1.0095
高壓迴流	23	16.08	13928.741	182.743	1.1323
鋒前暖區	15	10.49	13179.790	366.371	0.3237
鋒面過境	13	9.09	13964.764	186.745	1.0888
臺灣低壓生成	6	4.20	12661.844	264.108	0.5835
總計/平均	143	100.00	13447.146	211.385	0.8711

四、影響雷達偵蒐效能統計結果

4.1 雷達偵蒐誤差特徵

4.1.1 各天氣類型之雷達偵蒐誤差特徵

板橋測站各天氣類型之雷達偵蒐誤差特徵如表9所示。

表9 板橋測站各天氣類型雷達偵蒐誤差特徵

誤差種類 天氣類型	距離誤差	高度誤差	角度誤差
分裂高壓在高緯度	各天氣類型誤差值差異微小	1. 誤差最小 2. 高度 5,000 呎誤差：5.46% 3. 高度 18,000 呎誤差：17.10%	各天氣類型誤差值差異微小
長江口有分裂高壓出海			
高壓迴流			
鋒前暖區			
鋒面過境			
臺灣低壓生成	誤差值隨偵蒐高度呈非線性增加	誤差值隨偵蒐高度呈線性增加	
備考			

一、距離誤差：於偵蒐高度5,000呎或18,000呎個案，各天氣類型之間誤差值差異微小，均可忽略不計。

二、高度誤差：

(一)5000呎偵蒐高度：各天氣類型誤差率彼此差異微小，介於5.454%至6.579%之間。以「長江口有分裂高壓出海」天氣類型誤差最小(133.136呎)、「鋒前暖區」天氣類型誤差最大(139.665呎)。

(二) 18000呎偵蒐高度：各天氣類型誤差率彼此差異微小，介於17.101%至19.756%之間。以「長江口有分裂高壓出海」天氣類型誤差量最小(341.306呎)、「鋒前暖區」天氣類型誤差量最大(351.772呎)。

(三)大氣中水氣垂直梯度變化為影響大氣折射指數梯度的重要因素(其貢獻約為溫度、壓力的3倍)。當分裂高壓位於長江口時，臺灣北部地區受高壓籠罩，下沉氣流

降低大氣中水氣含量，因此不易產生大氣導管效應；反之，當受鋒前暖區天氣型態影響時，臺灣地區盛行至南風至西南風，將南海一帶之暖、濕空氣引進此區域，使 700hPa 以下大氣層水氣豐沛，水氣垂直梯度明顯，易造成大氣導管效應，進而誤差值較大。

(四) 比較 5000 呎偵蒐高度與 18000 呎偵蒐高度個案，發現偵蒐高度增加約為 3.6 倍，但高度誤差值卻相差了 10 倍，顯見高度誤差值並未隨偵蒐高度呈線性增加關係。

三、角度誤差：

(一) 5,000 呎偵蒐高度個案中，各天氣類型之角度誤差值差異小；另臺灣低壓生成天氣類型個案數太少，暫不列入探討。

(二) 比較 5,000 呎偵蒐高度與 18,000 呎偵蒐高度個案，偵蒐高度增加約 3.6 倍，而角度誤差率增加 3.3 倍，顯示角度誤差值隨偵蒐高度大致呈線性增加關係。

4.1.2 各月份之雷達偵蒐誤差特徵

板橋測站各月份之雷達偵蒐誤差特徵如表 10 所示。

表 10 板橋測站月份之雷達偵蒐誤差特徵

誤差種類 月份	距離誤差	高度誤差	角度誤差
2 月份	各月份 誤差值差 異微小	1. 誤差最小 2. 高度 5,000 呎 誤差：6.74% 3. 高度 18,000 呎誤差： 17.65%	各月份誤差值 差異微小
3 月份			
4 月份			
備考	誤差值 小，可忽略 不計	誤差值隨偵蒐 高度呈非線性 增加	誤差值隨偵蒐 高度呈線性增 加

一、距離誤差：各月份、各偵蒐高度個案之誤差值彼此差異微小，均可忽略不計。

二、高度誤差

(一) 於偵蒐高度 5,000 呎或 18,000 呎個案，各天氣類型之間誤差值差異微小，均可忽略不計。

(二) 18,000 呎偵蒐高度：各月份彼此差異微小，以 3 月份誤差率最小(17.652%)、4 月份誤差率最大(18.429%)。

(三) 比較 5,000 呎偵蒐高度與 18000 呎偵蒐高度個案，發現偵蒐高度增加約為 3.6 倍，但高度誤差值卻相差了 10.56 倍，顯見高度誤差值並未隨偵蒐高度呈線性增加關係。

三、角度誤差

(一) 5,000 呎偵蒐高度：各月份誤差率差異微小，以 3 月份誤差率最小(15.781%)、4 月份誤差率最大(15.985%)。

(二) 18,000 呎偵蒐高度：各月份彼此差異微小，以 3 月份誤差率最小(47.950%)、4 月份誤差率最大(50.207%)。

(三) 比較 5,000 呎偵蒐高度與 18,000 呎偵蒐高度個案，偵蒐高度增加約 3.6 倍，而角度誤差率增加 3.16 倍，顯示角度誤差值隨偵蒐高度大致呈線性增加關係。

4.2. 各天氣類型最低被陷捕頻率特徵

各天氣類型最低被陷捕頻率及影響頻段如表 11 所示。

表 11 板橋測站各天氣類型雷達最低被陷捕頻率及影響頻段表

天氣類型	700hPa 以下 (低空導管)			700hPa 以上 (高空導管)		
	最低 被陷捕 頻率 (GHz)	影響頻段		最低 被陷捕 頻率 (GHz)	影響頻段	
		電子 作戰	軍事 雷達		電子 作戰	軍事 雷達
分裂高壓 在高緯度	0.6256	C	L	1.0514	D	L
長江口有 分裂高壓 出海	0.7831	C	L	1.0095	D	L

高壓迴流	0.5194	C	L	1.1323	D	L
鋒前暖區	0.5590	C	L	0.3237	C	P
鋒面過境	0.4208	B	L	1.0888	D	L
臺灣低壓生成	0.3363	B	P	0.5835	C	L
平均	0.5884	C	L	0.8711	C	L

一、700hPa以下空層(低空導管)：

- (一)「臺灣低壓生成」天氣類型個案數過少，較不具代表性。
- (二)餘以「鋒面過境」天氣類型大氣導管厚度最大(316.699呎)、「長江口有分裂高壓出海」天氣類型最小(224.278呎)。
- (三)「鋒面過境」天氣類型由於近地面層降雨現象明顯、雲層較厚；「鋒前暖區」與「高壓迴流」天氣類型則為氣流經過廣大洋面，因此700hPa以下大氣層之暖、濕空氣豐沛且厚實，故大氣導管厚度較大。
- (四)個案之大氣導管厚度平均為269.423呎，最低被陷捕頻率為0.588GHz，其影響範圍屬電子作戰C頻段(或軍事雷達L頻段)。

二、700hPa以上空層(高空導管)：

- (一)「臺灣低壓生成」天氣類型個案數過少，較不具代表性。
- (二)以「鋒前暖區」天氣類型之大氣導管厚度最大(366.371呎)，「分裂高壓在高緯度」、「長江口有分裂高壓出海」、「高壓迴流」及「鋒面過境」天氣類型厚度較小。
- (三)個案之大氣導管厚度平均為211.385呎，最低被陷捕頻率平均為0.8711GHz，其影響範圍屬電子作戰C頻段(或軍事雷達L頻段)。

4.3 雷達偵蒐策略因應

因我們所處的地理環境為海洋與陸地交匯處，亦受天氣因子變化影響，致使電磁波有異常傳播路徑，造成雷達偵蒐誤差值。為

提升偵蒐的精準度，個人提供以下幾點建議以為因應：

- 一、由於大氣導管效應通常於仰角小於5度發生，所以值勤人員若發現受大氣導管效應影響時，可運用機動雷達移至其他地點實施觀測，適當改變雷達發射的仰角，即可避免形成雷達洞或造成較大之誤差值。
- 二、由於大氣導管之陷捕頻率與導管厚度有關，故發現受大氣導管效應影響時，可使用最低被陷捕頻率以外之頻率偵測，即可穿透導管層，減少誤差率。
- 三、運用探空資料計算距離、高度及仰角之誤差值，經長時間統計後便能掌握該雷達陣地各月份、各天氣型態之雷達偵蒐特徵，並製作成兵要資料，供爾後值勤人員參用。
- 四、運用大氣數值預報模式，預測大氣導管的生成區域與時間，俾提供戰管單位及早調整偵蒐模式因應。

五、結論與建議

空軍擔任維護我空防第一線部隊，戰管單位又為空軍作戰的耳目，其重要性不言而喻。隨著科技的日新月異，電子武器裝備功能日漸精進，惟自然環境的變化使相關裝備效能受到極大影響；是以能即時掌握環境變化之特徵，將是維護國防安全的一大利基。

5.1 結論

- 一、距離誤差：無論是各天氣類型及各月份之統計結果，誤差值均相當微小，可予以忽略。
- 二、高度誤差：隨偵蒐高度增加而快速增加，呈非線性關係；在5000呎高度約為5%~6%，而18,000呎高度則為17%。
- 三、臺灣地區受高壓籠罩之天氣型態影響，盛行風向為北風，由大陸移進的冷、乾

氣流使大氣中水氣的垂直梯度減少，不利導管生成，高度誤差值較小；反之，臺灣地區風向為西南或南方時，豐沛水氣由廣大洋面傳送至近地面層，使大氣中水氣的垂直梯度增加，易造成大氣導管效應，高度誤差值較大。

四、仰角誤差：與天氣類型及月份無明顯差異，誤差值概略與偵蒐高度或距離成正比關係。

五、平均雷達最低被陷捕頻率為 588.4MHz，其影響頻段屬電子作戰 C 頻段(或軍事雷達 L 頻段)；但 20,000 呎以上空層之影響頻段以電子作戰 D 頻段(或軍事雷達 L 頻段)居多。

5.2 建議

一、隨著電腦科技日益發達，運用大氣數值預報模式來預測大氣導管的生成、研析其發生環境與機制成為可能，並已成為未來的趨勢，世界各國已針對相關學門研究。鑒於大氣導管效應將影響偵蒐效能與造成空防安全顧慮，戰管單位可協請氣象部隊發展相關之氣象數值預報模式，俾能及早掌握大氣導管(或雷達洞)形成位置、持續時間、導管強度及受影響偵蒐頻率，提高準確率。

二、鑒於高度誤差在偵蒐距離 300 公里(偵蒐高度 18,000 呎)時誤差率高達 17% 以上，宜安排適當時機派遣戰機實測，俾驗證理論值與雷達實際偵測值之差異。

六、參考文獻

Turton, J. D., D. A. Bennetts, and S. F. G. Farmer, 1988: An introduction to radio ducting, Meteor. Mag., Vol.117, pp.245-254.

朱延祥，「臺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，(民國 73 年)，14 卷 2 期，頁 191~200。

朱延祥、許舜清、呂芳川、丁珪、江火明，「臺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，(民國 83 年)，頁 919~925。

丁珪、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，(民國 83 年)，頁 493~501。

呂芳川、朱延祥、江火明、陳曉華，「臺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，(民國 87 年)，頁 162。

Zhu, M. and B. W. Atkinson, 2005: Simulated Climatology of Atmospheric Ducts over the Persian Gulf., Bound.-Layer Meteor., Vol.15, pp.433-452.

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., Vol.40, pp.586-603.

Haack, T. and S. D. Burk, 2001: Summertime Marine Refractivity Conditions along Coastal California., J. Appl. Meteor., Vol.40, pp.673-687.

朱昌敏、陳啟南、呂芳川、汪建良，「臺灣海峽北部異常回波之個案研究(二)數值模擬」，大氣科學，(民國 96 年 6 月)，35 期 3 號，頁 241-260。

薛湘畬，「臺灣北部地區大氣折射率之分析與應用」，國立中央大學太空所，碩士論文，(民國 89 年 6 月)，頁 38。

- 呂芳川、朱延祥，「臺灣地區蒸發導管效應實驗及偵蒐效益分析(II)」，國防科技學術合作技術報告，(民國93年)，頁75。
- 黃崇展，2004，「大氣導管效應影響雷達偵蒐效能之個案研究」，國防大學中正理工學院應用物理研究所碩士論文，(民國93年6月)，頁6。
- Hitney H.V., J. H. Richter, R. A. Pappert, K. D. Anderson, and G. B. Baumgartner, 1985: Troposphere Radio Propagation Assessment, Proc. IEEE, Vol.73, No. 2.
- Bauer, J. R., W. C. Mason, and F. A. Wilson, 1958: Radio Refraction in A Cool Exponential Atmosphere, , Tech. Rept., Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass. Vol.73, No. 186.
- Bean, B. R., and G. D. Thayer, 1959: On Models of The Atmospheric Refractive Index., Proc. IRE, Vol.47, No. 5, pp.740-755.
- Bean, B. R., and E. J. Dutton, 1966: Radio Meteorology, US Dept. of Commerce, NBS Mono., Vol.92, No. 5, pp.431.
- Patterson, W. L., C. P. Hatton, G. E. Linden, R. A. Paul' s, H. V. Hitney, K. D. Anderson and A. E. Barrios, 1994: Engineer' s Refractive Effects Prediction System (EREPS), Technical Document, Vol.2648.
- Goldhirsh J., G. D. Dockery and B. H. Musiani, 1994: Three Years of C Band Signal Measurement for Over water, Light-of-Sight In the Mid-Atlantic Coast, Fade Statistics, Fade Statistics, : Radio Sci, Vol.29, No. 5, pp.1421-1431, pp. 1433-1447.
- Dougherty, H. T., and B.A. Hart, 1976: Anomalous Propagation and Interference Fields, : Office of Telecommunication Report, Vol.76, No. 107, pp.66.

Statistics and Analyses on Weather Type Effects the Precision in Reconnaissance of Tactical Control Detective Radar in the Spring

Chong-Chan Huang¹ De-Long Cheng² And Fang-Chuan Lu³

¹ 10th Weather Center Weather Wing of C.A.F., R.O.C

² Institute of Air Force Command and Staff, University of Natial Defense, R.O.C

³ Nan Jeon University of Science and Technology, R.O.C

ABSTRACT

Taiwan is located at the fringe between oceans with continent in the sub-tropical zone, because there has various vertical gradients of temperature moist and pressure in the atmosphere, so electromagnetic wave transmits exceptionally, precedes to effects the precision in reconnaissance and decided the location for radar. The detective radar of Tactical Control takes the responsibility of Air Defend, thus, understanding the characters of discrepancy with distance, angle and height that meteorological factors effect reconnaissance for radar, and to establish the military essential about discrepancy of reconnaissance for individual radar, are very important issues for us to execute fight of Anti-Air-Raid and Air Defend.

In accordance with analyses, no metter all kinds of weather types or moons, we get those statistics: About discrepancy with distance, those values are very small, and we can ignore those. About discrepancy with height, those values variate non-linear increase substantially comply with the height of reconnaissance, the ratio of errors is 5% at height of 5,000 feets and 17% at height of 18,000 feets, those values are smaller when Taiwan is overwhelmed by the Continental Polar High and the prevailing wind is north, but larger with southwest or south wind. About discrepancy with angle, those values are not related to the weather types and months, and have direct proportion with height or distance of reconnaissance About the lowest trapped frequency of radar, the average value is 588.4MHz, and effect C frequency of electronic warfare (or L frequency of military radar), but effect D frequency of electronic warfare (or L frequency of military radar) at 20,000 feets of height.

Keywords: Detective radar, Atmosphere duct, Discrepancy with distance, Discrepancy with angle, Discrepancy with height.