

# 台灣東北角東北季風期間大氣導管個案分析

呂芳川<sup>1</sup>，陳曉華<sup>2</sup>，洪忠和<sup>1</sup>，朱延祥<sup>3</sup>，江火明<sup>4</sup>，楊明錚<sup>5</sup>

- 1.中正理工學院應用物理系
- 2.海軍氣象中心
- 3.國立中央大學太空科學研究所
- 4.國立中央大學大氣物理研究所
- 5.空軍氣象中心

## 摘 要

藉由春季鋒面通過台灣後，台灣受東北季風影響期間，在東北角外海(122.05°E, 24.8°N)距宜蘭海岸線約 13 海哩的海上探空觀測資料，計算大氣折射率的垂直變化，分析在此個案中海上的大氣折射率的垂直結構與電磁波傳播特性，並探討大氣溫度、氣壓與水汽壓的垂直向梯度對大氣折射率的影響，進而瞭解大氣折射率受環流系統影響的關係。由海上觀測資料計算出，在緊臨海面的低層有蒸發導管或次折射層的結構存在，利用電磁波傳播理論，模擬此時期雷達波的傳播特性，以瞭解其對艦載雷達偵搜功能的影響。

局部環流的日夜變化對盛行風場的影響，也會影響到低層水汽的供應，造成低層水汽含量在垂直方向有不同的分布， $dN/dH$  也出現不同的變化。不同秉性的空氣之交界面常是大氣折射率異常變動最明顯的位置。而大氣折射率隨高度的變化率( $dN/dH$ )在此界面帶有明顯的異常變動，電磁波通過此區域時易出現異常偏折或大氣導管現象，造成雷達對目標物的偵搜產生高度、距離等相對性的誤判。

## 一、前言

關於電磁波在對流層(Troposphere)的傳播現象，基於1864年Maxwell的電磁理論，我們可以很清楚地知道，它與介質(Medium)的介電常數(Dielectric Constant)有關，而介電常數又與大氣折射指數 $n$ (Atmospheric Refractive Index)有關，且在對流層的大氣折射指數與大氣環境的氣壓、水蒸氣壓及溫度相關。因此，可以想見的是電磁波在對流層的傳播，將受到大氣折射指數的擾動而影響傳播路徑。也就是說其傳播現象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途徑。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)。其中的陷捕即表示當我們的大氣環境存在有某層狀結構，其內的大氣折射率 $N$ (Atmospheric Refractivity)的垂直

梯度值小於 $-157$  N/Km 時，電磁波在此種層狀結構中的傳播將發生異常現象，亦即電磁波在垂直方向的傳播將被此層狀結構，所局限而無法逸出，而造成異常的傳播現象。這種結構宛如波導管(Waveguide)，其會使的低仰角的電波侷限在此種結構中，造成電波的異常傳播。此種的結構體特稱為大氣導管(Atmospheric Duct)。依照大氣導管的地理發生位置不同，通常將其分為三種型態(Hitney et al., 1985 和朱等, 1994)：第一型態為地面導管(Surface-Based Duct; SBD)，其為發生在陸地地面附近，它的厚度一般在百公尺以內，形成的原因視地區不同而異，可能與海陸風有關，也有可能因受地面輻射冷卻的影響所致，此外天氣系統的移行亦是造成地面導管的原因之一。第二型態是空中導管(Elevated Duct; ELD)，產生此種導管的原因主要是二種具有不同折射指數性質的氣團重疊在一起，在其邊界處自然形成大氣導波層(Trapping Layer)，因而造成空中導管。第三型態為位於海面上的蒸發導管(Evaporation Duct；

EVD)，其係由於靠近海面的空氣含有來自海水蒸發所釋放出的充足水汽，並且以飽和的方式持續性的存在，導致靠近洋面的大氣折射指數值遠大於離海面稍高處的數值，因而形成所謂的蒸發導管。朱等；1994，統計分析民國七十七年到七十九年板橋測站例行探空資料，指出臺灣地區在夏季時主要是受到西南氣流影響，因此帶來暖濕的空氣，易產生地面導管。而冬季受大陸冷高壓及東北季風的影響，帶來寒冷乾燥的空氣導致較不易產生地面導管。大氣導管由於其對正常的無線電波越平地（Over-The-Horizon）通訊以及軍用雷達的偵搜功能都有顯著的影響。因此為提昇通訊品質並強化軍用雷達的偵搜能力，實有必要對大氣導管現象作詳細分析與研究，以確保無線電波通訊的正常和我軍在接戰時的勝算。

大氣導波層對電磁波異常傳播的研究，早在1940年代便有學者開始利用實驗與理論的方法，進行大氣折射指數梯度的異常分佈對電磁波傳播影響的實測數據的分析與理論上的討論。在早期，由於通訊電磁波的頻率較低，因此大氣波導管效應亦不甚顯著。然而隨著科技的日新月異，現代資訊的傳輸特色除了量大外，更要求快速與確實。在此情況下，通訊的頻帶寬度（Bandwidth）便要求越來越寬。為滿足此需求，輸送資訊的通訊電波頻率就必須相對提高。然而隨著通訊頻率的逐漸提高，大氣波導管效應等，都會影響無線電波通訊的效果。因此如何加強此方面的研究，將大氣效應考慮在現代通訊系統中，以提昇通訊品質，實為當務之急。

然而本文主要目的是藉由春季鋒面通過台灣後，台灣受東北季風影響期間，在東北角外海（122.05°E，24.8°N）距宜蘭海岸線約13海哩的海上探空觀測資料，計算大氣折射指數  $n$  的垂直變化，分析在此個案中海面上的大氣折射指數的垂直結構與電磁波傳播特性，並探討大氣溫度、氣壓與水汽壓的垂直向梯度對大氣折射指數  $n$  的影響，進而瞭解大氣折射率受環流系統影響的關係。由海上觀測資料計算出，在緊臨海面的低層有蒸發導管或次折射層的結構存在，利用電磁波傳播理論，模擬此時期雷達波的傳播特性，以瞭解其對艦載雷達偵搜功能的影響。

## 二、基本理論與方法

雷達波的傳播與大氣折射指數  $n$  有密切的關係，而大氣折射指數與大氣溫度(T)，氣壓(P)，與水汽壓(e)的數學關係式如下（Bean and Dutton, 1966）：

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

為了使用方便簡單起見，一般定義大氣折射率  $N$ ，

來取代  $n$ ， $N$  與  $n$  的關係如下：

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

由司乃耳定律，吾人可以知道電波射線（Radio Ray）在不同折射指數的介質中傳播，會產生偏折或彎曲。射線彎曲的曲率和地球表面曲率的比較結果，可以歸納出四種類型：正常（Standard）、次折射（Subrefractive；Sb）、超折射（Superrefractive；Sp）和陷捕（Trapping）。由射線與地表的幾何關係以及司乃耳定律，吾人可以得到在介質中傳播的射線曲率半徑（ $\rho$ ）和折射指數梯度（ $dn/dh$ ）之間的關係如下（Kerr, 1951）：

$$\rho = \left| \frac{n}{\left( \frac{dn}{dh} \right)_\perp} \right| \quad (3)$$

上式中  $\perp$  的表示折射指數梯度垂直於射線方向的分量。以下將分別闡釋此四種傳播路徑的條件及現象：

### （一）正常

一般而言，正常的大氣折射率梯度是隨高度增加而遞減，故由司乃耳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

當大氣折射率梯度值是大於 0 ( $dN/dh > 0$  N/Km)，電波射線是向上偏折，於是造成射線彎折向上傳播而不是向下傳播，將使得電磁波傳播的有效距離縮短，造成電波迅速衰減。

### （三）超折射

如果折射率梯度值介於 -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）陷捕

在電波傳播過程中值得注意的現象。造成陷捕的折射率梯度值必須小於 -157（N/Km），它的特性就是使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，且宛如在導波管（Waveguide）傳播，使電波有增強（Enhancement）的趨勢，這也就是大氣導管（Atmospheric Duct）的重要性質。關於大氣導管，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，它與海面上的相對濕度變化有關。在陸地上，一般可分為地面導管及空中導管。圖一顯示了這四種射線的軌跡和地球曲率的比較。

大氣導波層可根據  $N$  隨高度的遞減率，亦即  $N$

的垂直梯度 $dN/dH$ ，的大小來判讀出。換言之，在某高度當大氣層的 $dN/dH$ 小於 $-157$  N/km時，吾人便可宣稱在此高度有大氣導管的存在。由式(2)可推算出 $dN/dH$ 與大氣氣壓垂直梯度 $(\partial P/\partial H)$ 、大氣溫度垂直梯度 $(\partial T/\partial H)$ 及水汽壓垂直梯度 $(\partial e/\partial H)$ 的關係式，

$$\frac{dN}{dH} = \frac{a}{T} \cdot \frac{\partial P}{\partial H} + \left(-\frac{aP}{T^2} - \frac{2be}{T^3}\right) \cdot \frac{\partial T}{\partial H} + \frac{b}{T^2} \cdot \frac{\partial e}{\partial H} \quad (4)$$

式中 $a=77.6$ ， $b=375000$ 。藉由上式，吾人可以了解當導管發生時，各參數梯度對 $dN/dH$ 的貢獻。

有關雷達波的傳播，依據司乃耳定律和大氣折射指數的剖面資料，以及電磁波的初始入射角，依據射線追蹤原理我們就可以模擬推算出雷達波的射線軌跡。電磁波在遠離發射源後，單位面積中所具有的電磁波能量亦隨距離的平方而降低。在考慮地球曲度的情形下，計算雷達波的訊號強度（或傳播損失）隨距離變化所適用的理論與方法，將隨雷達波傳播距離的不同有顯著差異，分為光學干涉區（多重路徑傳播）、繞射/對流層散射區和中間區等三種不同的傳播機制。依據各區的傳播因子函數和雷達的各項特性參數，可模擬推算出垂直和水平方向的傳播射線圖。

### 三、資料分析與結果

在綜觀環境場的分析上，由中央氣象局 86 年 3 月 30、31 日的 00Z 地面天氣圖（圖二、圖三）、850hPa 與 700hPa 分析圖。得知在 3 月 30 日 00Z 時分裂高壓於渤海灣出海，向東南移動，分裂高壓的冷空氣已經到達台灣北部。在 3 月 31 日 00Z 時分裂高壓位於韓國西南方海域上，此時台灣北部、東北部受高壓迴流影響。再加上海研二號在東北角外海的六次高解析的探空資料（30 日 06Z、09Z、12Z、15Z、18Z 與 31 日 00Z）的分析，從風場和水汽在垂直方向的變化與隨時間的演變，可以讓我們從此次宜蘭外海觀測個案中，受東北季風和高壓迴流影響的台灣東北部海域上的大氣的變化有進一步的了解，進而分析大氣折射率的變化受天氣系統演變之影響及其所造成的蒸發導管、次折射結構對雷達波傳播所造成的影響。

#### (一) 風場變化

依綜觀環境場的分析，在這海上探空觀測個案期間，海研二號所在的位置經歷了東北季風和高壓迴流的天氣系統。圖四是垂直風場剖面的時間序列圖，在 06Z 到 12Z 期間，1500m 以下除了臨近海面的風場以外，整層都是吹東北風。而在臨近海面上的風在 06Z 和 09Z 時吹

東風，可見探空觀測點是位於變性高壓的南側，高壓迴流的東風將帶來暖濕的水汽。但到了 12Z 的時候在海面上的風場很明顯有南風的分量，可見此時探空觀測點是位於變性高壓的西南側，因此在近海面的空氣將受變性高壓迴流之偏南氣流之影響，在低層含有較多的水汽。

在 15Z 和 18Z 時低層的風場由西北風隨高度的增加，很快的轉為北風再轉為東北風。這樣的風場變化可能是由於在 1500m 下的盛行東北風，在吹入蘭陽平原後受到山脈地形的阻擋，一部份的東北風無法越過山脈，在山前形成質量的累積，也就是在迎風面形成一個區域性的高壓，到了夜間由於陸地的輻射冷卻更加強了此高壓的強度，氣壓梯度力所造成的離岸風將影響到原本低層的盛行風場，離岸風隨高度上升而減小，所以影響盛行風場的程度隨高度增加而減弱。以致在宜蘭外海的低層風場有西北風的現象，空軍宜蘭測站在 30 日 12Z 觀測到的風向是 290，風速是 7 knot。

#### (二) 水汽變化

低層臨近海面的大氣受分裂高壓出海，高壓環流低層變性引入較暖濕的空氣，使得台灣東北部低層水汽含量逐漸增加。由探空資料分析結果得知，在 09Z、12Z、15Z 時臨近海面上的比濕  $q$  向上遞增，此一比濕遞增層愈晚愈淺，此一現象可能是由於在午後原本所引入的暖濕空氣，在入夜後由於輻射冷卻，海水蒸發量減少以致迴流所引入的水汽減少所造成的，如圖五所示。水汽含量的向上遞增造成大氣折射率  $N$  也向上遞增 $(dN/dH > 0)$ ，此一大氣環境對雷達波的傳播而言是一次折射層，將使得雷達波穿越此次折射層時有向上偏折傳播的現象。然而在 18Z 和 31 日 00Z 時臨近海面上的比濕  $q$  向上遞減，為構成典型的蒸發導管環境。

在海上離海面 100m 以上的低層大氣的濕度可能也隨著夜間的長波輻射有所影響。在 30 日 18Z 時溫度和露點溫度差在 2500m 以下都很小，而在 31 日 00Z 時原先在 2500m 以下的  $T-T_d$  都變大了，我們認為是因為在夜間輻射冷卻造成海面上空氣與高壓迴流變性的空氣溫差不大，垂直運動減弱，水汽向上傳輸的機制減弱，所以  $T-T_d$  都變大了，如圖六所示。通常當溼度在垂直方向有驟減的高度上，其大氣折射率隨高度的變化的梯度會明顯變大，容易產生超折射或大氣導管的結構。在圖六的左半部明顯看出 31 日 00Z 時  $T_d$  驟減的區域往下降，同時在圖六的右半部的  $dN/dH$  隨高度的變化中也明顯看出超折射的位置也一同下降到相近似的高

度，由此可見不同秉性的空氣之交界面常是大氣折射率異常變動最明顯的位置。在離海平面 750m 的高度的 A 區有逆溫層且  $T-T_0$  變大，大氣的這兩個結構，依據 (4) 式，可知都有利於  $|dn/dH|$  的增加，結果有超折射層產生。而在 B 區高度的空氣只有逆溫層，對  $|dn/dH|$  的增加有貢獻，但大氣折射率垂直變化的梯度尚不足以構成超折射層的結構。

### (三) 大氣折射率異常變動對雷達傳播的影響

在 30 日 12Z 時在近海面低層有一次折射層，厚度是 38 m。在此環境下我們假設當雷達的天線高度 15 m 時，模擬雷達波的射線軌跡圖；圖七，清楚的看到在 15m 到 38m 之間次折射層中的傳播軌跡比在標準大氣下的傳播軌跡有較上揚的現象。這樣的傳播軌跡將造成目標物位置低估與距離的遠估，對軍事用途上的雷達造成敵情的誤判，其影響甚巨。

在 31 日 00Z 時在近海面上有蒸發導管，厚度是 30 m，在蒸發導管之上方有一超折射層，假設天線高度也是 15 m，模擬雷達波的射線軌跡圖；圖八，清楚的看到由於蒸發導管的影響，使得有部份低仰角雷達波在導管中傳播可以偵測到較遠的目標物，而且在蒸發導管之外雷達波傳播的越地平線距離也增加了。蒸發導管和超折射層都可使雷達偵測到比在標準大氣下更遠的距離，但卻增加雷達偵搜覆蓋區出現盲区 (radar hole) 的機會。

## 四、結論

藉由春季鋒面通過台灣後，台灣受東北季風和高壓迴流影響期間，分析東北角外海的探空觀測資料，大氣溫度、氣壓與水汽壓的垂直向梯度對大氣折射率的影響，計算大氣折射率的垂直變化，探討大氣折射率受環流系統的影響。局部環流的日夜變化對盛行風場的影響，也會影響到低層水汽的供應，造成低層水汽含量在垂直方向有不同的分布， $dn/dH$  也出現不同的變化。不同秉性的空氣之交界面常是大氣折射率異常變動最明顯的位置。

在此個案中海上的大氣折射指數的垂直結構與電磁波傳播特性，在緊臨海面的低層有蒸發導管或次折射層的結構存在，模擬雷達波的傳播特性，雷達波射線軌跡，在不同的折射環境下傳播的軌跡都所差異，顯示導管效應對艦載雷達偵搜功能有所影響。此個案中影響大氣折射指數梯度的變化因子又以水蒸汽梯度項貢獻最大，而在逆溫層發生時也有利於導管現象的產生。

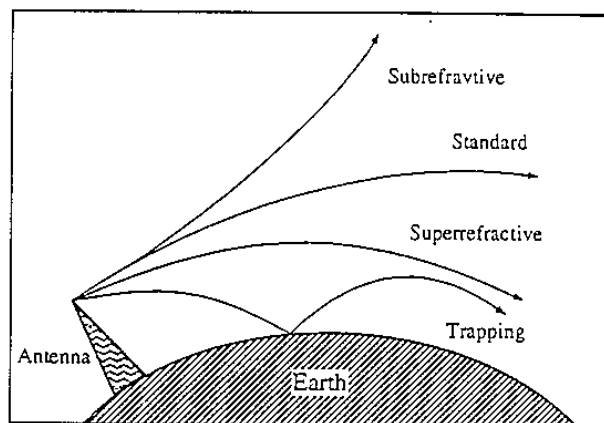
## 參考文獻

朱延祥、許舜清、呂芳川、丁珏、江火明，1994：台灣地區大氣導管統計特性之研究。第三屆國防科技學術研討會論文集。桃園，台灣。917 - 925。

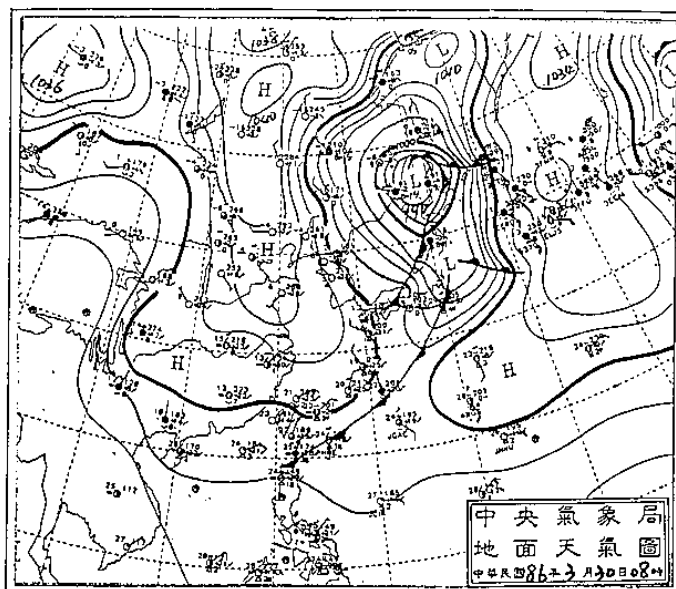
Bean, B. R., and E. J. Dutton, Radiometeorology, NBS Monograph, 435 pp., 1966.

Hitney H.V., J.H. Richter, R.A. Pappert, K.D. Anderson, and G.B. Baumgartner, Jr., Tropospheric radio propagation assessment, Proc. IEEE, Vol. 73, No. 2, 1985.

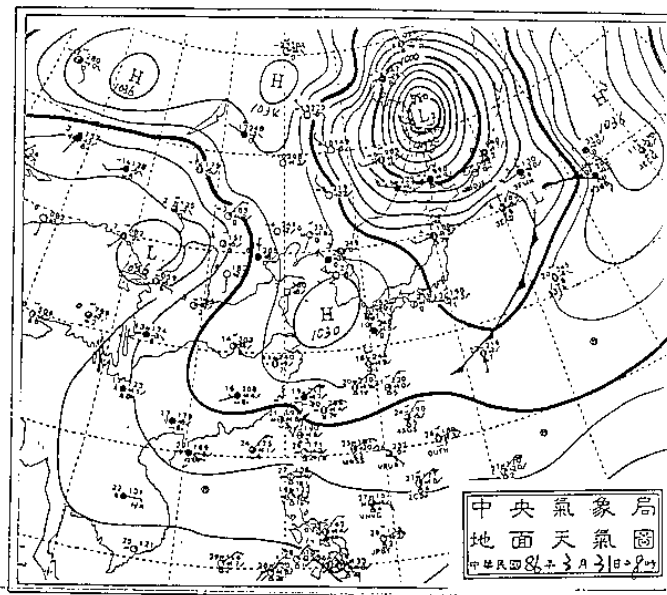
Kerr, D.E., 1951: Propagation of Short Radio Waves, McGraw-Hill.



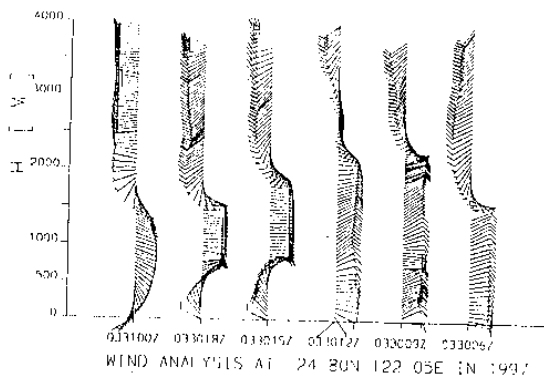
圖一、四種折射線的軌跡和地球曲率的比較



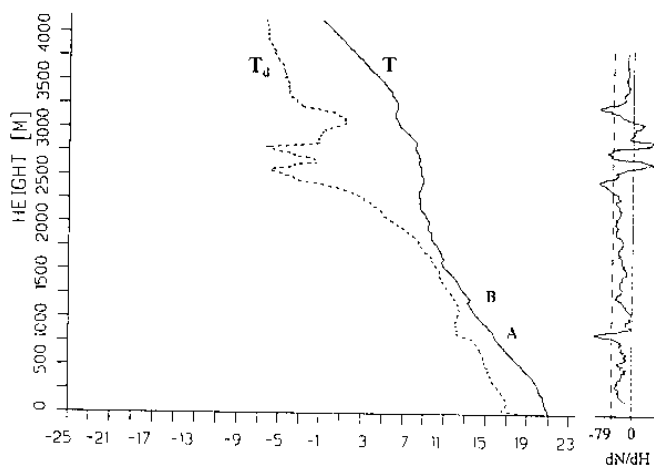
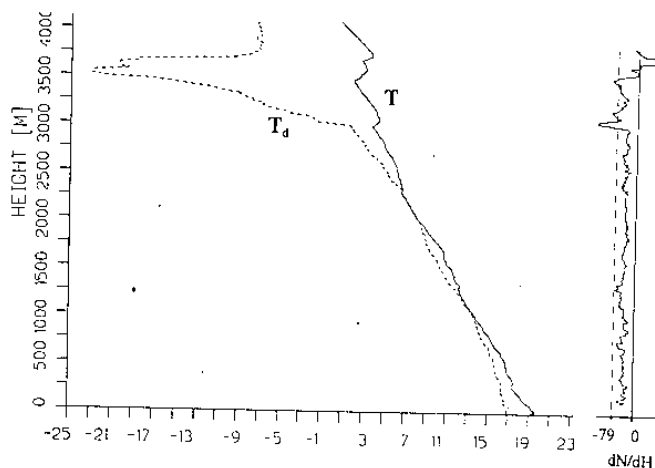
圖二、中央氣象局 86 年 3 月 30 日的 00 Z 地面天氣圖



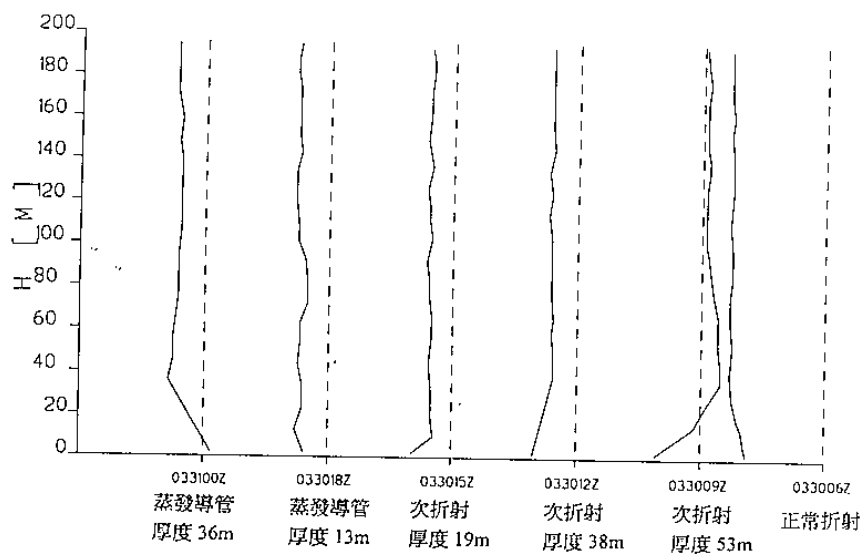
圖三、中央氣象局 86 年 3 月 31 日的 00 Z 地面天氣圖



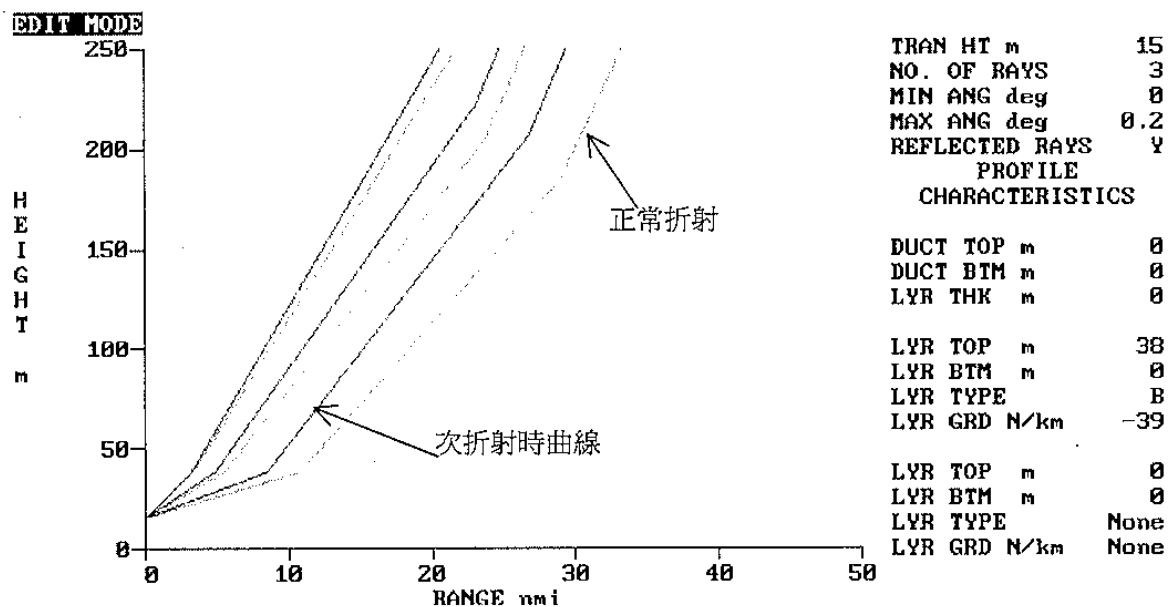
圖四、垂直風場剖面的時間序列圖



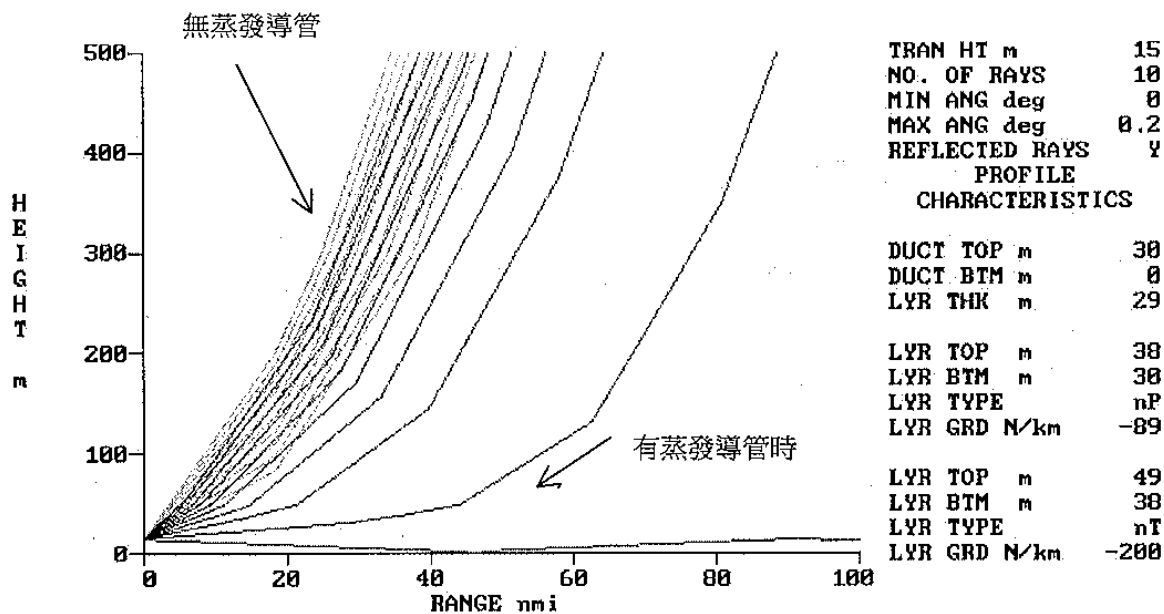
圖六、圖的左上半部是 30 日 18Z 時 T 和  $T_d$  的探空曲線，右上半部是相對應高度的  $dN/dH$ ，下半部是 31 日 00Z 的分析。



圖五、比濕  $q$  隨高度的變化的時間序列圖，點線--位置是觀測時的比濕是 13 g/Kg，其左邊相鄰的點線是 9 g/Kg。



圖七、假設當雷達的天線高度 15 m 時，模擬在 30 日 12Z 近海面低層的次折射層，厚度是 38 m，雷達波的射線軌跡圖。在 15m 到 38m 之間次折射層中的傳播軌跡比在標準大氣下的傳播軌跡有較上揚的現象。



圖八、假設雷達天線高度在 15 m，模擬 31 日 00Z 時海面上有蒸發導管，厚度是 30 m，在蒸發導管之上方有一超折射時，層雷達波的射線軌跡圖，清楚的看到由於蒸發導管的影響，使得有部份低仰角雷達波在導管中傳播可以偵測到較遠的目標物，