

大氣折射對雷達波傳播之影響

李 克 孝

The Atmospheric Refraction to Radar Wave Transmitting Influence

Ko-Shiao Lee

Abstract

This report is intended to serve as a reference in radar meteorology for weather officers. Two parts are included: (1) A general description of the phenomenon of atmospheric refractivity; and (2) An introduction to the temperature, pressure, and humidity method for computing and manipulating the refractive index and its vertical gradient. The computational procedure, through an real data example, is also presented.

壹、前 言

公元一九四〇年代隨雷達之發展，發現一種事實，即所用波長愈短，則超越地平線之傳播亦愈頻，常可測到正常測距外之地面目標，此種現象之發生，係與近地面空氣層內之溫濕正常與異常分佈亦即大氣折射率大小相關連。

在二次世界大戰後，由於雷達在應用上更為廣泛，遂常見到一種更為困惑之現象，即雷達孔（Radar hole）之存在可使搜索雷達之性能銳減。近年來由於高度精確長程雷達技術之發展，對於因折射所引起之距離及仰角誤差之修正更為迫切，故對大氣折射之瞭解與計算乃為當急之務也。

貳、有關折射之氣象學理與計算之方法

一、大氣對電磁波之折射率

電磁波通過大氣圈之各層次時，由於大氣層之非均勻性，速度發生變化，從而產生反射、折射及散射之現象。

某一介質之折射指標公式係 $n = \frac{C}{V}$ ，式中 C 為電磁波在真空中之傳播速度， V 為在介質中之傳播速度；因之某一介質之折射指標，實為電磁波通過該介質速度（相當於光速）之衡量。

該折射指標「 n 」通常係隨波長而變，且亦隨介質之差異而不同。一般而言，在對流層內，波長

在 1cm 至 10m 之範圍內，折射指標與波長無關，且其值略大於「1」；在海平面「 n 」值之範圍約自 1.000250 至 1.000450，而在洋面則近於 1.000350。為便於數學上計算起見，另以導來指標稱之折射率，即 $N = (n - 1) \times 10^6$ 。在海平面大氣折射率在 250—450N 單位之間。 N 亦可以大氣壓力、溫度及水汽壓表示如下：

$$N = \frac{D}{T} \left(P + \frac{Ee}{T} \right)$$

式中 P 及 e 均以毫巴為單位，而 T 為絕對溫度， D 為乾空氣介電常數 77.6， E 係水汽影響電磁波傳播常數 4810，將此兩常數代入上式得

$$\begin{aligned} N &= \frac{77.6}{T} \left(P + \frac{4810e}{T} \right) \\ &= 77.6 \left(\frac{P}{T} \right) + 77.6 \times 4810 \left(\frac{e}{T^2} \right) \\ &= 77.6 \frac{P}{T} + 3.73256 \times 10^5 \left(\frac{e}{T^2} \right) \\ &= 77.6 \left(\frac{P}{T} \right) + 3.73 \times 10^5 \left(\frac{e}{T^2} \right) \dots \dots (1) \end{aligned}$$

式中右邊第一項 $77.6 \left(\frac{P}{T} \right)$ 稱為「乾項」，第二項 $3.73 \times 10^5 \left(\frac{e}{T^2} \right)$ 稱為「濕項」。在海平面以上， P 與 e 通常均係隨高度遞減，故「 N 」亦隨高度遞減，故 N 隨高度變化之實況，則需視氣象因素而定。大氣中「 n 」與 N 值各地不同，且在同一地點却

亦隨時間而變。

二、折射指標或折射率測量及計算方法

在某一介質中，電磁波之傳播速度可以直接測量，亦可利用氣象因素計算而得之。

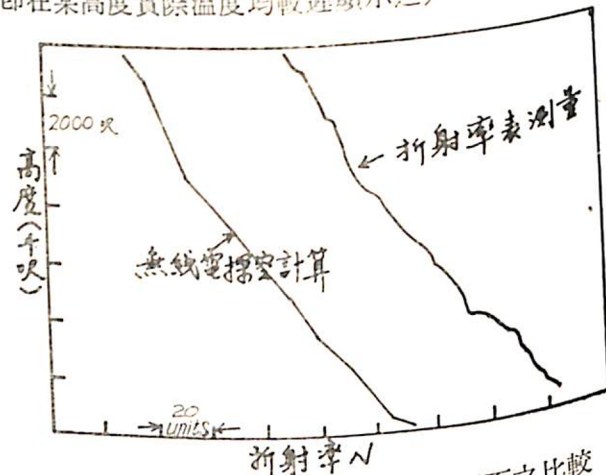
(一)直接測量之方法：係使用折射率表(Refractometer)，該儀器係將波長 3cm 之電磁波輸入，以測量其諧振週率所起變化之比例。該儀器有兩個空間，其一密封，內裝乾空氣或為真空，另一則有孔任由外界空氣可以流通，此兩者諧振週率變化差異，亦即介電常數之變化，而折射指標則為介電常數之平方根。

近年來由飛機攜帶之空用折射率表，雖經改良但仍相當複雜而笨重，故不能用氣球攬升。然而，可用於氣球攬升用之輕巧而價廉折射率表，正在研究發展中。凡經由直接測量而得之折射資料，遠較計算所得者更為精確，且能表現大氣折射率之微細結構。

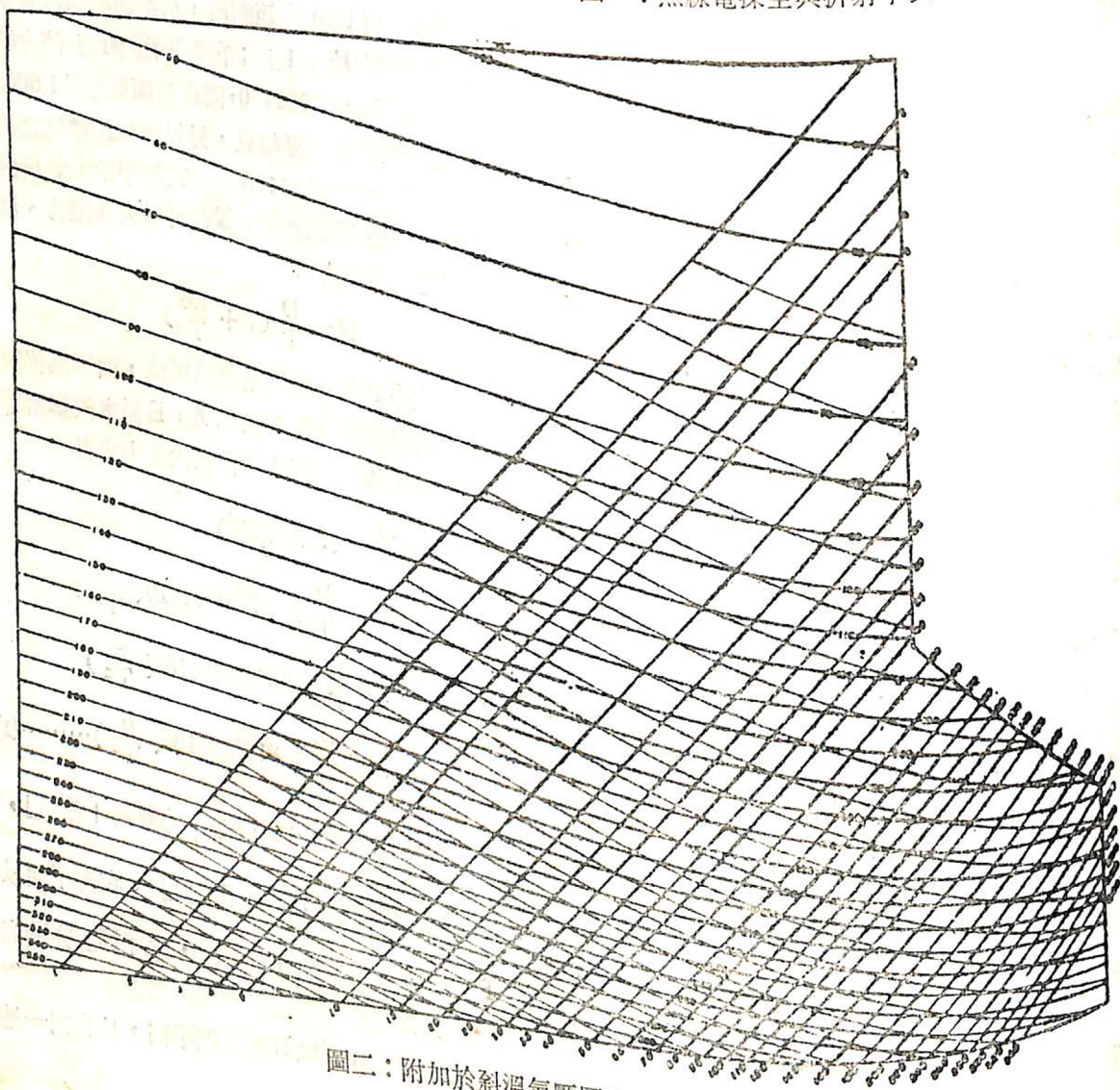
(二)利用溫度、氣壓與濕度之計算法：因「N」為 P、T 及 e 之函數，故如有此三者之數值時，即

可據以計出「N」值。在地面，普通之氣壓表、溫度表及濕度表即可以決定「N」；在高空，則必須用無線電探空儀所測得之 P、T 及 e 之值，以該三值代入方程式計算「N」值。

氣象人員均認識到，在某些方面無線電探空具有缺點，尤以測量溫度為然。因為溫度感應單元有遲滯係數存在（該遲滯現象係機械儀器之通性，即在某高度實際溫度均較遲顯示之），且在低



圖一：無線電探空與折射率表 N 剖面之比較



圖二：附加於斜溫氣壓圖上之折射率曲線

溫時遲滯為甚，使測得各高度之「N」與實際數值有所出入。所幸此項偏差，對無線電傳播之影響，並不若對其他方面影響之嚴重，其理由是反常之傳播影響，係視「N」垂直梯度，亦即「N」隨高度變化之總量所決定，其細微之變化並非最重要。

上述兩種方法所得「N」值之比較，就粗略之結構言，二者頗為相似（見圖一），兩者差別較大處，均由濕度顯著變化而起。

參、以探空資料計算大氣折射之實例

根據66年5月16日08時桃園探空電碼譯算地面至 700mb 各層之氣壓 (P)、溫度 (T)、露點 (Td)、高度 (Ht) 等如下：

P(mb)	T(°C)	Td(°C)	Ht (呎)
1006	17.6	17.4	0
1000	17.2	16.9	310
918	12.8	11.7	3400
877	16.4	0.4	4290
850	15.2	3.2	4910
800	12.4	5.4	7500
732	9.0	4.3	8500
700	7.2	1.2	10330

一、利用斜溫圖計算折射率

根據此項資料，代入式(1)可求得 N 的曲線。在實際作業中此曲線經已印於斜溫圖上（見圖二），求取至為方便。式中乾項 $N_d = 77.6 \frac{P}{T}$ ，即自左上方微向右下方傾斜而近似水平之諸曲線，其值自 350 至 40。濕項可藉混合比、氣壓與溫度表示之如下：

$$N_w = 373256 \frac{e}{T^2} = 373256 \frac{e}{P} \frac{P}{T^2}$$

$$= 373256 \frac{W}{621.97 + r} \frac{P}{T^2}$$

（上式 W 為混合比，係每千克乾空氣相混合之水汽克數）

由上式可知濕項可由 W (常數)、 $\frac{P}{T^2}$ (常數) 所繪製成之兩種等值線 (W 線即斜溫圖上綠色虛線之飽和混合比線， $\frac{P}{T^2}$ 線即圖二自圖中向右下斜之細

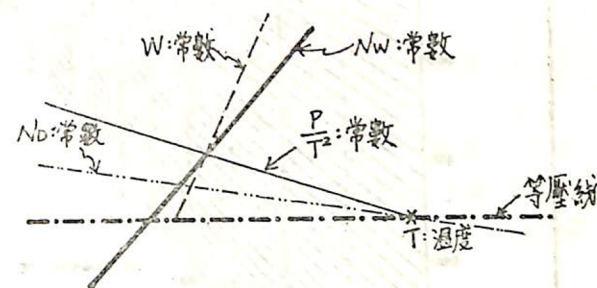
線)，此兩線相交之點即可決定濕項之值，其 N_w 值之範圍係自 340 至 1。

①利用原探空電碼 (TT_{AA} 及 TT_{BB} 兩段，自地面至 700mb) 或已譯算各層之溫度與露點，填入圖二並繪曲線。

②根據探空曲線以計算折射率剖面時，先在探空曲線之特性層各點分別計算乾項與濕項。乾項係在溫度曲線上直接讀出；濕項之求法

如下：自溫度點沿細線 ($\frac{P}{T^2} = \text{常數}$) 向左

上方移行至與露點之混合比線相交，在此相交點即可讀取 N_w 值（見圖三）。最後將乾濕兩項相加即得總「N」值。



圖三：Nw 之求法

二、利用折射指標計算圖求「N」值

以前述探空電碼譯算而得之氣壓、溫度、露點等，利用本圖（圖四）求之，其程序為：

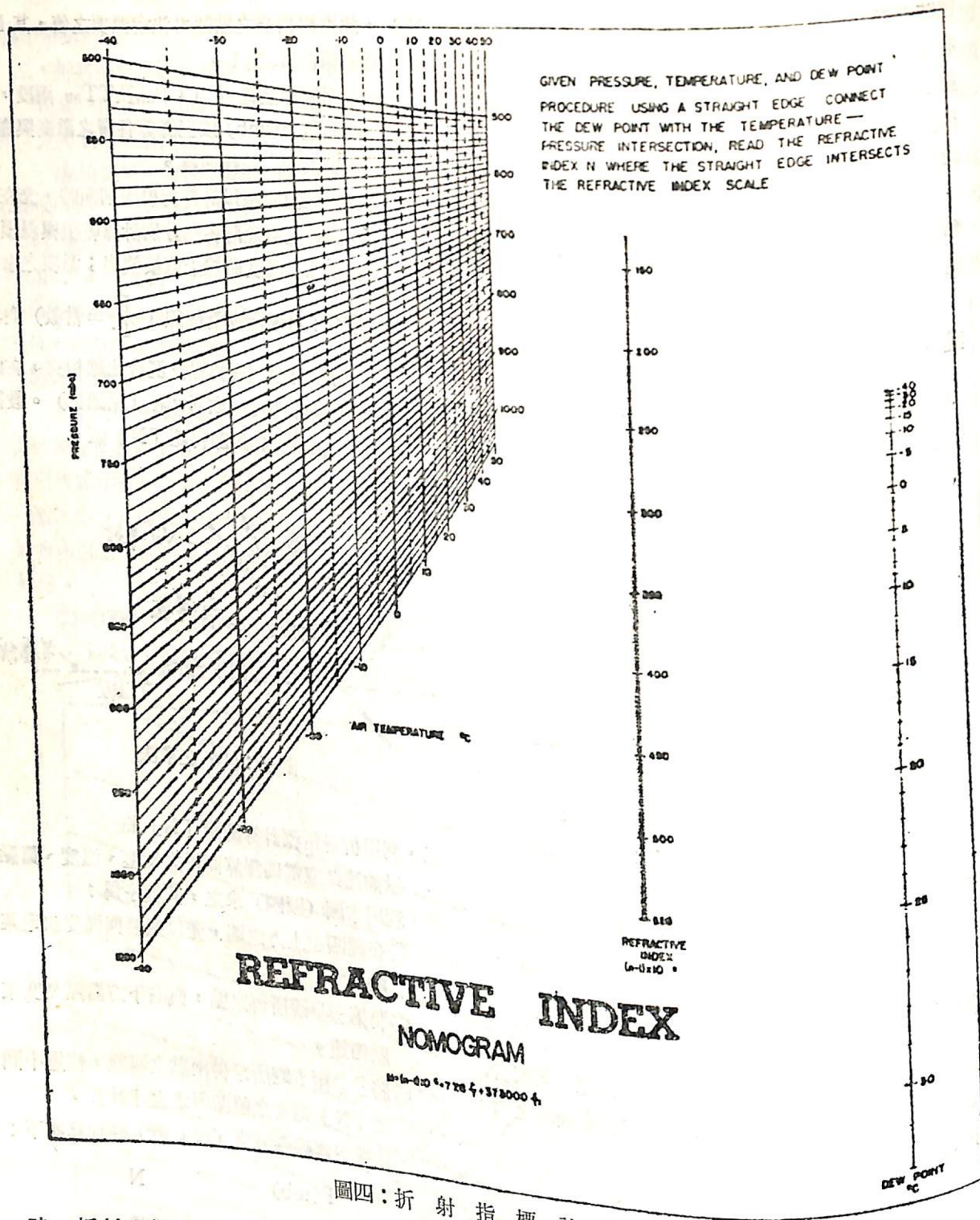
①在圖四左上方之圖，先以氣壓與溫度決定某點。

②將第①步驟所得之點，與右下方露點刻度某點相連。

③將①②兩步驟所求得兩點之連線，經過中間之「N」刻度之值即所求之「N」。

該探空電碼各層之「N」值，經計算如下：

P(mb)	N
1006	360
1000	355
918	310
877	270
850	260
800	260
732	240
700	230



圖四：折 射 指 標 計 算 圖

肆、折射率梯度

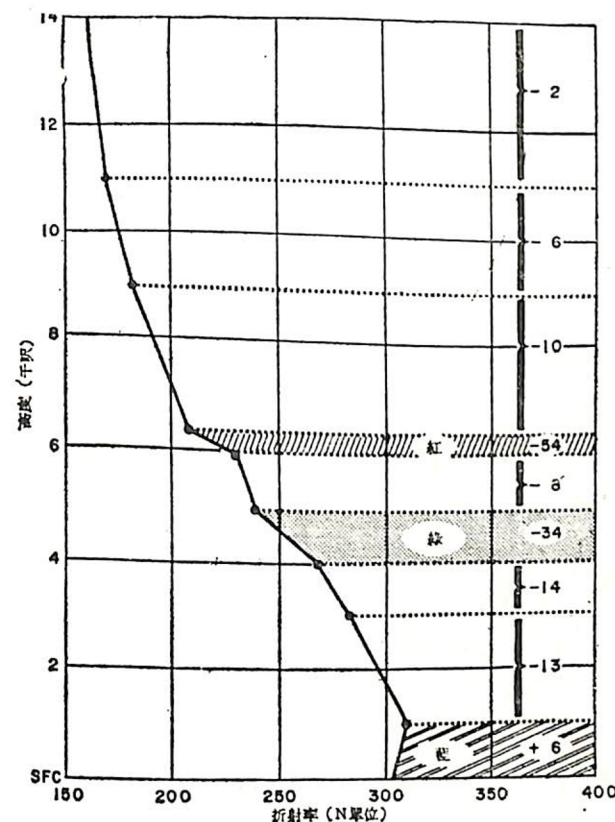
對流層內大多數之反常傳播現象，係由無線電與雷達波因折射彎曲而致，而此項彎曲又係折射指標梯度所引起，而非由於「N」之絕對值本身所致。事實上，在「N」值不變之大氣中，不論「N」之值為何值均無折射發生。唯因大氣中常有氣壓、溫度與濕度等梯度存在，故通常必有折射率梯度發生。

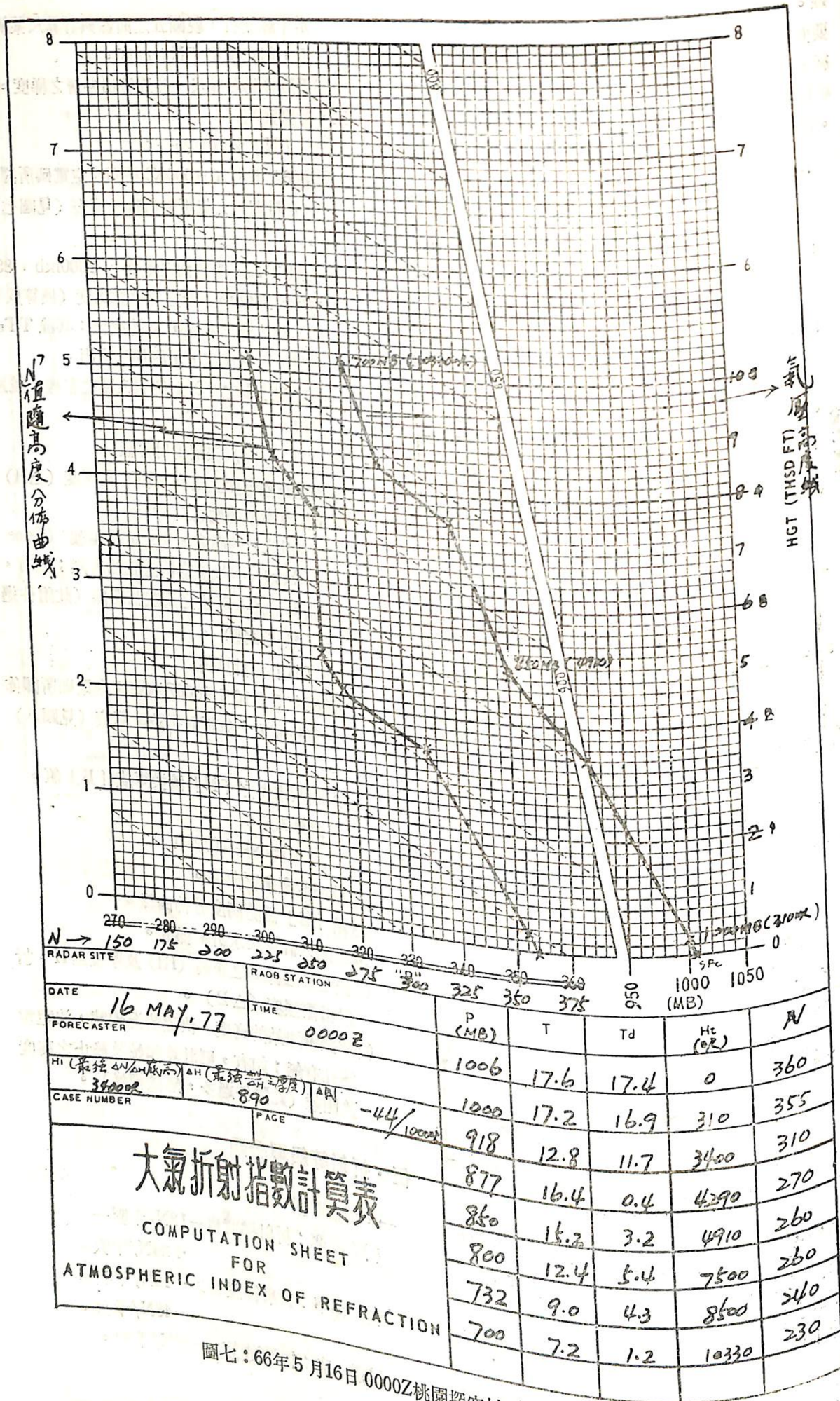
最強大且最持久之折射率梯度見於垂直向上。

對於折射率隨高度遞減，其影響最大且屬持久者係氣壓梯度，此項梯度在海平面低層上空約為 35mb/1000 呎；而溫度與濕度之垂直向梯度則較小，水平方向則較大。在研究反常傳播時，吾人主要應考慮垂直向之梯度，氣象人員認為此等梯度，將強烈地受到大氣之平流、對流、渦動、輻射及蒸發諸氣象程序之影響。

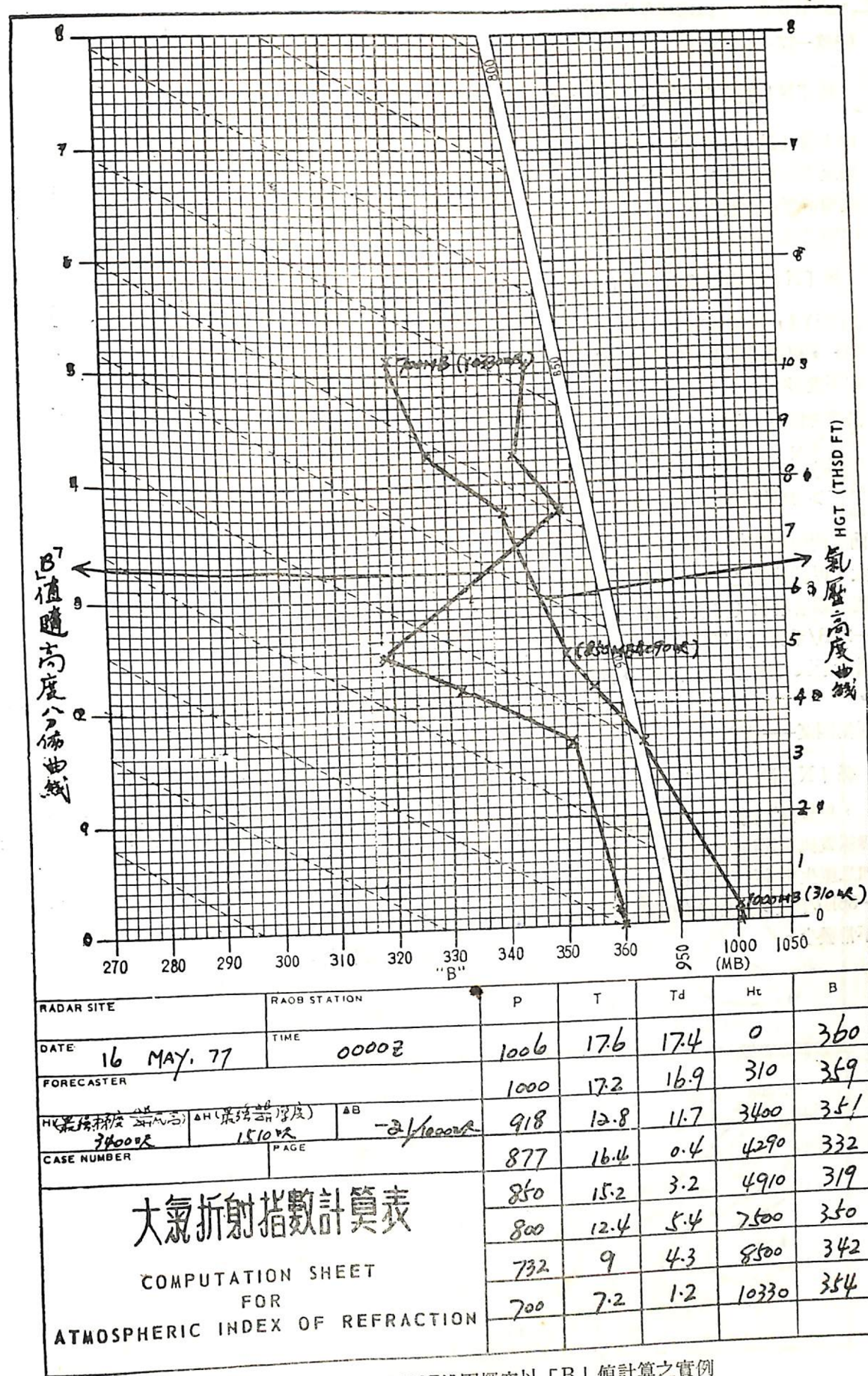
一、實際大氣「N」梯度之計算：為計算實際大氣中之「N」梯度，應繪製「N」值對高度之曲

線。高度標尺可以氣壓高度或幾何高度均可，視需要而定之；為計算方便，宜採用每吋10×10之繪圖紙，以高度為縱座標（1吋=2000呎），而以折射率為橫座標（1吋=50N單位），此剖面圖如圖(五)。復以圖(六)之「N」梯度計算尺量之。利用印有折





圖七：66年5月16日 0000Z桃園探空以「N」值計算之實例



圖八：66年5月16日 0000Z桃園探空以「B」值計算之實例

二、折射分類 按區域分成四類：

(一)第一區——次折射

係「N」隨高度增加（即 $\frac{\Delta N}{\Delta H} > 0$ ），射線向上彎（對直線而言），係與地球表面之彎曲相反；無線電與雷達之測距有顯着之縮減，但此種情形甚少發生。

(二)第二區——正常折射

係「N」隨高度減小（即 $0 > \frac{\Delta N}{\Delta H} > -24N$ /千呎），射線向下彎（與地球表面之彎曲同向），但曲度不大，無線電與雷達波之傳播通常不受影響。

(三)第三區——超折射

係「N」隨高度減小（即 $-24N/\text{千呎} > \frac{\Delta N}{\Delta H} > 48N/\text{千呎}$ ），射線向下彎（與地球表面之彎曲同向），其曲度較第二區正常折射為大，但較地球之曲度小，無線電與雷達波之測距有顯着增加（如以「B」值標準言，介於 $-24B/\text{千呎}$ 至 $-36B/\text{千呎}$ 之間，則顯示有異常折射及可能有陷波作用），此情況常常發生。

(四)第四區——陷波層

係「N」隨高度減小（即 $-48N/\text{千呎} > \frac{\Delta N}{\Delta H}$ ），射線向下彎，其曲度較地球表面曲度大，無線電與雷達波之傳播大受影響，測距大為增加且產生雷達孔現象（如以「B」值標準言 $> -36B/\text{千呎}$ ，則表示有陷波情況），但此情況不常發生。

陸、使用探空資料之限制

吾人已熟知探空儀所得之資料具有若干缺點：
(一)濕度感應單元之嚴重遲滯性，常使測得之梯度過小，致使所有超折射層與陷波層之視厚度（Apparent thickness）增大，並使各層頂底之視高度升高，此遲滯性係隨溫度而變，當溫度增加濕度遲滯性則遞減。
(二)溫度、濕度及參考點之訊號，分別順序發送，乃使厚度小於 300 呎之超折射層全部遺漏。當濕度單元訊號終止，濕度單元之反應，最多只能間接表示有折射層之存在，其理由即「N」係緩慢隨溫度變化。
(三)濕度單元在低溫下反應不佳，當溫度低於 -40°C 時，濕度單元幾乎停止工作，故現用之探空儀，幾乎不可能測定中層或上層對流層之折射層。

柒、結 論

電磁波在經過某種介質時，某波長之固定諸振即起變化；而電磁波傳播於大氣中，大氣亦係介質之一種，且由於大氣之密度非均勻者，故對電磁波之傳播速度，隨大氣密度之不同而各異。電磁波傳播所受之影響，係與折射指標垂直梯度成正比〔即梯度 $(-\frac{\Delta N}{\Delta H})$ 愈大，折射程度愈嚴重〕。超折射及陷波層固可使雷達測距增加，但亦能產生雷達孔，減低雷達性能致對軍事活動形成不良影響，尤以對防空可形成嚴重之缺失，蓋敵人飛機可利用防空雷達之死角（雷達孔）楔入而不察；為消彌此缺失，則必須針對大氣折射所產生之超折射或陷波層加以瞭解，而後調整配置雷達站之位置及高度，以期減小雷達孔所形成之不良影響，因此為近代雷達氣象學之濫觴也。