

# 示波槽化現象之理論解析\*

林 瑞 山

## Theoretical Analysis of the Ducting Echo Phenomena

Ruey-shan Lin

### Abstract

For most purposes, the speed of propagation of an electromagnetic wave may be considered to be constant and equal to the speed of light in the free space,  $3 \times 10^8$  m/sec, However, for many radar problems one has to recognize that the atmosphere is significantly different from free space and that the observed airmass properties are sufficiently variable to produce small change in the speed of propagation. These small change are important because they may lead to refraction of the radio ray and produce the ducting phenomena in the some state of atmosphere. It is important that the radar observer must understand throughly the ducting phenomena.

With this end in view, the auther firstly found the necessary condition of ducting phenomena from the Snell's Low, and then we stated the kind of ducting phenomena. Lastly the auther analyze the ducting data that is observed at Hua-Lien Weather Station in 1967.

### 一、前 言

在大多數之情況下，可以把電磁波之傳播速率看成爲一常數，即等於光線在自由空間裏之傳播速率  $3 \times 10^8$  m/sec。但是對許多氣象雷達問題而言，我們必須要知道大氣和自由空間，還是有着很大的不同。故氣團性質之差異，往往能導致電磁波之傳播速率產生一些小的變化，而這些小的變化對於槽化現象是極重要的。因爲它能引起電磁波之折射從而使傳播方向發生明顯之變化，而形成各種不同之槽化現象。氣象雷達觀測人員對於此種槽化現象，應徹底了解始能獲得正確之回波分析。著者立腳於此種觀點，先從電磁波折射理論考察其應具備之氣象必要條件後，分析本站去(56)年度所觀測，在海面上所發生之槽化現象，以資提高氣象雷達觀測技術及增進天氣預報之準確率。

### 二、電磁波折射理論之考察

今設雷達天線置於標準大氣中，而由A點射出之電磁波，以  $\beta_1$  爲發射角度，其折射率爲  $n_1$ 。其後

通過某點 B 時之折射率爲  $n$ ，其進行仰角爲  $\beta$  (參照圖一)。

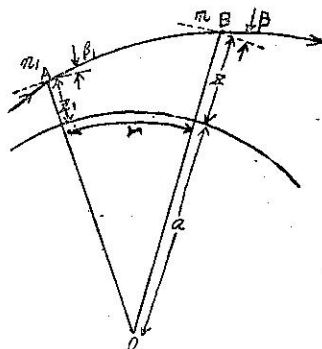


圖 1：電磁波通過長距離時之概略圖。  
Fig 1: Schematic Diagram of a Electromanetic Wave Path Over a Long Distance.

在這種情形下，我們可應用 Snell's Law 則得

$$(a+Z_1)n_1 \cos\beta_1 = (a+Z)n \cos\beta = \text{const.}$$

今若以  $a$  除之時得

$$\left(1 + \frac{Z_1}{a}\right)n_1 \cos\beta_1 = \left(1 + \frac{Z}{a}\right)n \cos\beta$$

$$= \text{const.} \dots\dots\dots(1)$$

設  $(1 + \frac{Z_1}{a})n_1$  為  $N_1$ ,  $(1 + \frac{Z}{a})n$  為  $N$  時上式得

$$N_1 \cos \beta_1 = N \cos \beta = \text{const.} \dots\dots\dots(2)$$

$N_1$  及  $N$  是在 A 點及 B 點以地球曲面看為平面時之折射率，通常都叫之為修正折射率。但若從垂直方面來看其折射率  $n$  時，它隨着高度而變化即可寫為

$$n = n_0 + (\frac{dn}{dZ}) Z \dots\dots\dots(3)$$

$$\begin{aligned} \therefore N &= (1 + \frac{Z}{a}) n \\ &= (1 + \frac{Z}{a}) \{ n_0 + (\frac{dn}{dZ}) Z \} \\ &= n_0 (1 + \frac{Z}{a}) \{ 1 + \frac{1}{n_0} (\frac{dn}{dZ}) Z \} \\ &= n_0 \{ 1 + \frac{1}{n_0} (\frac{dn}{dZ}) Z + \frac{Z}{a} + \frac{Z}{a} \frac{1}{n_0} (\frac{dn}{dZ}) Z \} \end{aligned}$$

但因  $n_0 \neq 1$  且  $(\frac{dn}{dZ}) Z \ll n_0$ , 故  $\frac{Z}{a} \frac{1}{n_0}$

$$(\frac{dn}{dZ}) Z \approx 0$$

$$\begin{aligned} \therefore N &\approx n_0 \{ 1 + \frac{1}{n_0} (\frac{dn}{dZ}) Z + \frac{Z}{a} \} \\ &\approx n_0 \{ 1 + (\frac{dn}{dZ}) Z + \frac{Z}{a} \} \end{aligned}$$

如果地球上空沒有大氣之存在時，電磁波將直進傳播而沒有彎曲。在這種情況下，射線相對於地球表面之曲率將是  $\frac{1}{a}$ 。但是地球上空實際有大氣之存在，並且其折射指數梯度  $\frac{dn}{dZ}$  使電磁波射線發生彎曲，因而射線曲率不等於  $\frac{1}{a}$ 。事實上，相對於地球表面射線之曲線是

$$\begin{aligned} \frac{1}{a_e} &= \frac{1}{n_0} \frac{dn}{dZ} + \frac{1}{a} \quad (\because n_0 \neq 1) \\ &\approx \frac{dn}{dZ} + \frac{1}{a} \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

但  $a_e$  稱為虛構之地球等效半徑在標準情況下是約等於  $4/3 a$ 。因在高緯度地方（寒帶）時約為  $6/5 a \sim 4/3 a$ ，在中緯度地方（溫帶）約為  $4/3 a$ ，而在低緯度地方（熱帶）約為  $4/3 a \sim 3/2 a$ ，故本省屬於低緯度可取為  $4/3 a$ 。

$$\therefore N = n_0 (1 + \frac{Z}{a_e})$$

現在利用(2)式變形求出  $Z, r, \beta, a_e$  之關係式，即

$$\tan \beta = \frac{\cos \beta_1}{\cos \beta_1} \tan \beta$$

$$= \frac{\sqrt{\cos^2 \beta_1 \frac{\sin^2 \beta}{\cos^2 \beta}}}{\cos \beta_1}$$

$$= \frac{\sqrt{\cos^2 \beta_1 (1 - \cos^2 \beta)}}{\cos \beta_1}$$

$$= \frac{\sqrt{\cos^2 \beta_1 - \cos^2 \beta}}{\cos \beta_1}$$

$$(\because N_1 \cos \beta_1 = N \cos \beta)$$

$$= \frac{\sqrt{(\frac{N}{N_1})^2 - \cos^2 \beta}}{\cos \beta_1} = \frac{dZ}{dr} \dots\dots\dots(5)$$

$$\therefore (\frac{N}{N_1})^2 = \left\{ \frac{n_0 (1 + \frac{Z}{a_e})}{n_0 (1 + \frac{Z_1}{a_e})} \right\}^2 =$$

$$1 + \frac{2Z}{a_e} + (\frac{Z}{a_e})^2 \quad 1 + \frac{2Z_1}{a_e}$$

$$\approx \frac{a_e + 2Z}{a_e + 2Z_1} \approx \frac{a_e + 2Z - 2Z_1 + 2Z_1}{a_e + 2Z_1}$$

$$\approx 1 + \frac{2(Z - Z_1)}{a_e + 2Z_1} \quad (\because Z \ll a_e)$$

$$\approx 1 + \frac{2(Z - Z_1)}{a_e} \dots\dots\dots(6)$$

$$\begin{aligned} \therefore \tan \beta &= \frac{dZ}{dr} = \frac{\sqrt{(\frac{N}{N_1})^2 - \cos^2 \beta_1}}{\cos \beta_1} \\ &= \sqrt{1 + \frac{2(Z - Z_1)}{a_e} - \cos^2 \beta_1} / \cos \beta_1 \\ &= \sqrt{\sin^2 \beta + \frac{2(Z - Z_1)}{a_e}} / \cos \beta_1 \end{aligned}$$

從上式積分後可得

$$Z - Z_1 = \frac{r^2}{2a_e \cos^2 \beta_1} + r \tan \beta_1$$

今若  $\beta_1 \ll 1$  時  $\cos \beta_1 \approx 1$ ，即  $\cos^2 \beta_1 \approx 1$ ， $\tan \beta_2 \approx \beta_1$

$$\therefore Z - Z_1 \approx \frac{r^2}{2a_e} + r \beta_1 \dots\dots\dots(7)$$

從另一方面來看地球上空大氣與折射率之關係時，若於乾燥大氣裡，其折射率在所有波段內幾乎都是同一個常數。今若設  $P$  為大氣壓力 (mb)， $T$  為絕對溫度， $K_1$  為一常數時，根據實驗之結果這些與折射率  $n$  之關係是  $(n-1) 10^6 = K_1 \frac{P}{T}$ 。但若利用狀

態方程式  $\frac{P}{T} = \frac{R}{V} = R\rho$  代入上式時，即可得  $(n-1) \cdot 10^6 = K_1 R\rho = (\text{const})\rho$ 。

這裡  $R$  是普通氣體常數。 $\rho$  是大氣密度。 $(n-1) \cdot 10^6$  有時用  $N$  來表示，把  $(n-1) \cdot 10^6$  之單位叫做  $N$  單位。然而在大氣中當有水汽存在時，混合氣體之  $N$  值就和頻率有關。因大氣中總是含有水分，因此必須考慮水汽對  $N$  之影響。如所熟知，水分子是極性的，並且它之偶極矩隨不同之電磁波頻率響應不同。對於頻率極高之可視光，水分子是電子極化，對於低頻電磁波，水分子不但產生電子極化，並且分子本身還迅速地隨着電場之變化而不斷地重新取向。因此，水汽之折射指數對電磁波。要比對光波時來得大。根據實驗可得下列公式

$$N = (n-1) \cdot 10^6 = \frac{K_1}{T} \left( \frac{K_2 e}{T} - \frac{e}{7} \right)$$

這裡  $e$  為水汽壓 (mb)，對於電磁波 (大約大於 2cm 之微波)，其  $K_1$  及  $K_2$  之近似值分別得 79 和 4,800。因此在一定高度中大氣之折射率基本方程式可寫為

$$N = (n-1) \cdot 10^6 = \frac{79}{T} \left( P - \frac{e}{7} + \frac{4,800 e}{T} \right) \dots\dots\dots(8)$$

在地球表面  $N$  之數值範圍大致在 250~400 之間，此相當於  $n$  之範圍為 1.000250~1.000400 之間。上式係依聲學理論為根據，實驗得來有相當之準確性。但在實用上有時取  $M$  為修正折射模數較方便，這在無線電波傳播理論中是一個很重要之物理量，如果知道了  $M$  之垂直分佈，就能計算出任意高度上射線和水平面之間之夾角。通常均以  $10^{-6}$  為單位 (M. U.)，其表示法如下：

$$\begin{aligned} M &= (N-1) \times 10^6 \\ &= \left( n-1 + \frac{Z}{a} \right) \times 10^6 \\ &= (n-1) \times 10^6 + \frac{Z}{a} \times 10^6 \\ &= \frac{79}{T} \left( P - \frac{e}{7} + \frac{4800 e}{T} \right) + \frac{Z}{a} \\ &\quad \times 10^6 \dots\dots\dots(9-1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{79}{T} \left( P - \frac{e}{7} + \frac{4800 e}{T} \right) + 0.157 Z \\ &\quad (\text{M. U.}) \dots\dots\dots(9-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 79PT^{-1} - \frac{79}{7} eT^{-1} + 79 \cdot 4800 e T^{-2} \\ &\quad + 10^6 a^{-1} Z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore dM &= 79T^{-1} dP + (-1)79PT^{-2} dT - (-1) \\ &\quad \frac{79}{7} eT^{-2} dT - \frac{79}{7} T^{-1} de + (-2) \cdot 79 \\ &\quad \cdot 4800 e T^{-3} dT + 79 \cdot 4800 T^{-2} de \\ &\quad + 10^6 a^{-1} dZ \\ \therefore \frac{dM}{dZ} &= \frac{79}{T} \frac{dT}{dZ} - \frac{79}{T^2} \left( P - \frac{e}{7} + \frac{2 \cdot 4800 e}{T} \right) \frac{dT}{dZ} \\ &\quad + \frac{79}{T^2} \left( 4800 - \frac{T}{7} \right) \frac{de}{dZ} + \frac{10^6}{a} \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

尚從(4)式可得

$$\frac{dM}{dZ} \times 10^{-6} = \frac{1}{a} + \frac{dn}{dZ} = \frac{1}{a_e} \dots\dots\dots(11)$$

由上(10)式我們可知， $\frac{dM}{dZ}$  項與大氣之氣溫、氣壓及水汽壓之梯度有密切之關係，即由季節 (夏天或冬天) 天氣狀況 (晴天或雨天) 而變化。其條件可分為 (A)  $\frac{dM}{dZ} > 0$ ，即  $-\frac{dn}{dZ} < \frac{1}{a}$ ，(B)  $\frac{dM}{dZ} = 0$ ，即  $-\frac{dn}{dZ} = \frac{1}{a}$ ，(C)  $\frac{dM}{dZ} < 0$ ，即  $-\frac{dn}{dZ} > \frac{1}{a}$ 。在 (A) 條件可知  $M$  之梯度為正並且隨高度而增加。自

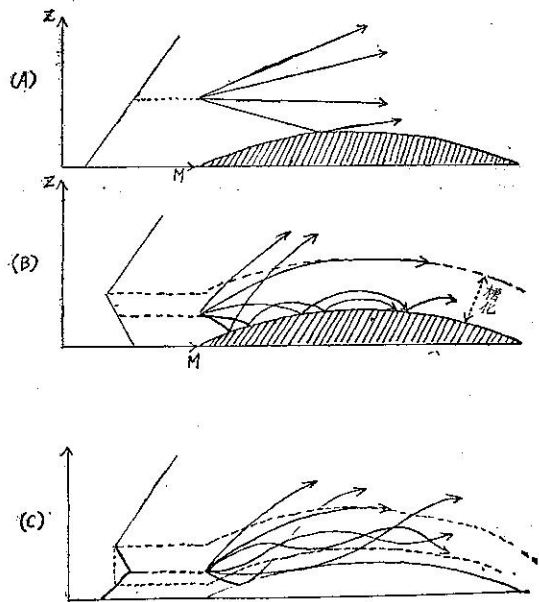


圖 2：槽化與電磁波路徑之關係圖 (標準型 (A)，單純地面型 (B)，接地 S 型 (C))。

Fig 2: The Relative Chart Between Ducting and Electromagnetics Wave Path (Standard (A), Simple Surface Trapping (B), Elevated S-Shape (C)).

雷達天線發射出之電磁波進行方向與水平線所成之角度並不太大時，雖然其路徑略形成爲直線，但因其彎曲率  $(-\frac{dn}{dz})$  較地球爲小，以致所射出之電磁波不能再返回地球表面。在 (B) 條件下時，電磁波之彎曲率  $(-\frac{dn}{dz})$  與地球之彎曲率相同，即沿着地球平行而行。雖然這又不能再返回地球表面，但這種情形可以說是開始進入發生槽化現象之預兆。在 (C) 條件下，電磁波之彎曲線  $(-\frac{dn}{dz})$  較地球之彎曲率爲大。由雷達天線所射出之電磁波經超折射達到地球表面後被反射而再進入原來之路徑 (請參照圖二)，這即我們所需討論之槽化現象。

無論如何，我們若研  $Z-Z_1$  之高度差及射出角  $\beta_1$  時，可由(7)式求出其地球等值半徑  $a_e$ ，同時亦由(1)式能判明槽化現象之強度。

### 三、發生槽化 (Ducting) 現象之折射理論

我們已知  $M$  之梯度在  $\frac{dM}{dz} < 0$  之條件下始能發生 Ducting 現象。即由(10)式亦可知氣溫之逆轉愈顯著  $(\frac{dT}{dz} > 0)$  且溫度之遞減率愈大  $(-\frac{de}{dz} < 0)$  時，可以說是發生 Ducting 現象之最好條件。現把單純接地形來討論逆轉點之高度  $Z_c$ ，(請參照圖三)

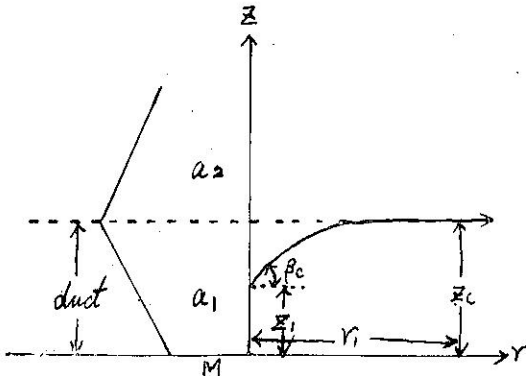


圖 3：單純接地形槽化之逆轉高度圖  
Fig 3: : The Height of Inversion Layer on the Ducting of Simple Surface Trapping.

。今設  $a_1$  爲逆轉點下層之有效半徑， $a_2$  爲逆轉點上層之有效半徑。雷達電磁波在逆轉點以外之地方以  $\beta_1$  之角度被射出後，達到逆轉點高度  $Z_c$  時之水平距

離爲  $r_1$ 。我們可利用(7)式得

$$Z_c - Z_1 = \frac{r_1^2}{2a_1} + r_1 \beta_1 \dots\dots\dots(12)$$

$$2a_1 Z_c - 2a_1 Z_1 = r_1^2 + 2a_1 r_1 \beta_1$$

$$\therefore r^2 + 2a_1 \beta_1 r + 2a_1(Z_1 - Z_c) = 0$$

$$\therefore r_1 = -a_1 \left\{ \beta_1 \mp \sqrt{\beta_1^2 + \frac{Z_c - Z_1}{a_1}} \right\}$$

今取有意義之一根時得

$$r_1 = -a_1 \left\{ \beta_1 - \sqrt{\beta_1^2 + \frac{2(Z_c - Z_1)}{a_1}} \right\} \dots\dots(13)$$

又(12)式可得

$$dZ_c = \frac{r_1}{a_1} dr_1 + \beta_1 dr_1$$

雷達之電磁波直到高度  $Z_c$  時之進行角度爲  $\beta$  時，

$$\therefore \tan \beta = \frac{dZ}{dr} = \frac{dZ_c}{dr_1} = \frac{r_1}{a_1} + \beta_1$$

$$(\because \beta=0 \text{ tan } \beta=\beta)$$

$$\therefore \beta = \beta_1 + \frac{r_1}{a_1} \dots\dots\dots(14)$$

以上僅限於逆轉點  $Z_c$  以下 (即  $a_1$  區域內) 之情形，今若擴張討論至逆轉點  $Z_c$  以上 ( $a_2$  區域內) 之大氣內時，亦可利用(12)式即得

$$\begin{aligned} Z - Z_c &= \frac{(r-r_1)^2}{2a_2} + (r-r_1) \beta \\ &= \frac{(r-r_1)^2}{2a_2} + (r-r_1) \left( \beta_1 + \frac{r_1}{a_1} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore Z &= \frac{(r-r_1)^2}{2a_2} + (r-r_1) \left( \beta_1 + \frac{r_1}{a_1} \right) + Z_c \\ &= \frac{(r-r_1)^2}{2a_2} + (r-r_1) \left\{ \beta_1 - \beta_1 + \sqrt{\beta_1^2 + \frac{2(Z_c - Z_1)}{a_1}} \right\} + Z_c \\ &= \frac{(r-r_1)^2}{2a_2} + (r-r_1) \sqrt{\beta_1^2 + \frac{2(Z_c - Z_1)}{a_1}} + Z_c \\ &= \frac{1}{2a_2} \left\{ (r-r_1)^2 + 2a_2 \sqrt{\beta_1^2 + \frac{2(Z_c - Z_1)}{a_1}} (r-r_1) + 2a_2 Z_c \right\} \\ &= \frac{1}{2a_2} \left\{ (r-r_1) + a_2 \sqrt{\beta_1^2 + \frac{2(Z_c - Z_1)}{a_1}} \right\}^2 \\ &\quad - \frac{a_2 \beta_1^2}{2} - \left( \frac{a_2}{a_1} - 1 \right) Z_c + \frac{a_2}{a_1} Z_1 \\ &= \frac{a_1^2}{a_2} \left\{ \frac{r}{a_1} + \beta_1 + \left( \frac{a_2}{a_1} - 1 \right) \sqrt{\beta_1^2 + \frac{2(Z_c - Z_1)}{a_1}} \right\}^2 - \frac{a_2 \beta_1^2}{2} \end{aligned}$$

$$-\left(\frac{a_2}{a_1} - 1\right)Z_c + \frac{a_2}{a_1} Z_1$$

雷達之電磁波達到逆轉點高度  $Z_c$  時，其進行方向已與水平面平行變成爲這時候起初由點 A

$$\beta = 0 \dots\dots\dots(15)$$

射出時之角度，特別設爲  $\beta_c$  時，利用(14)式可得

$$\beta = \beta_1 + \frac{r_1}{a_1}$$

$$\therefore 0 = \beta_1 + \frac{r_1}{a_1}$$

$$\therefore \beta_c = -\frac{r_1}{a_1}$$

由上式代入(13)式可得

$$r_1 = -a_1 \left\{ \beta_c - \sqrt{\beta_c^2 + \frac{2(Z_c - Z_1)}{a_1}} \right\}$$

$$\therefore -\frac{r_1}{a_1} = \beta_c - \sqrt{\beta_c^2 + \frac{2(Z_c - Z_1)}{a_1}}$$

$$\therefore \beta_c = \beta_c - \sqrt{\beta_c^2 + \frac{2(Z_c - Z_1)}{a_1}}$$

$$\therefore \beta_c^2 = -\frac{2(Z_c - Z_1)}{a_1} \dots\dots\dots(16)$$

因這時候  $\beta_c$  係爲電磁波發生陷擾 (trapping) 之臨界，該角度叫做臨界面。由(17)式亦可寫爲

$$Z_c = \frac{2Z_1 - a_1 \beta_c^2}{2} \dots\dots\dots(17)$$

我們若已知  $Z_1, a_1, \beta_c$  等值時可求出  $Z_c$  之逆轉點高度。

### 四、Ducting 之種類及成因

Ducting 現象產生之原因，須要詳細瞭解低層大氣之垂直分佈狀態及其物理作用。我們已知 M 值隨高度而減低時，始能產生電波槽化。這種減少是由於溫度隨高度迅速增加 (逆溫現象)，或濕度隨高度迅速減少時始助成 Ducting 現象。經著者研究結果，可分類爲下列幾種：

#### (1)平流性槽化：

暖之乾燥空氣由陸地移過冷之多濕水面，或低溫多濕之空氣由海面移至陸地等時，低層空氣被冷卻，而形成爲氣溫之逆溫現象，同時濕度又呈爲垂直遞減，導致發生平流性之槽化現象。想這種氣象狀態，如在空氣吹離非洲大陸經過地中海時經常出現。這樣的條件可以發生在白天也可以發生在夜間，如在海岸地帶白天之海風及夜間之陸風所引起的槽化均屬於這種槽化。

其發生之範圍在陸上約爲數公里，而在海面上約

爲數十公里，它的持續時間可能很長，容易出現於雷達電幕上。其持續時間取決於產生這種平流之流型之持續性。雖然在山岳地帶由於上昇之氣流極旺盛，不可能發生槽化現象，但在山脈之前後面冷暖空氣交接時，又往往產生平流性槽化。

#### (2)輻射性槽化

在白天強烈之日射使得靠近地面產生一超絕熱直減率，到了夜間晴朗輻射很大時，特別是夏季較潮濕之地面逆溫和濕度隨高度的迅速降低，在這樣的條件下溫度和濕度垂直梯減率越大，槽化越顯著，而當有霧形成的時候，方迅速地恢復正常。這種有利於在地面上形成槽化之情況，在夏天之大陸上是最經常會發生的。它可以稱之謂輻射性槽化。尤其是在冬天之下半夜至黎明之間，晴朗無風時最容易出現。最初開始的時候是接地型之槽化，到了下半夜以後，便形成爲 S 型，最後恢復正常。

#### (3)海洋性槽化

信風通常出現在低緯度之熱帶海洋上，經過長距離之平流，且自高空向下之大規模沉降空氣所造成，而形成爲信號逆溫層。逆溫下之氣流潮濕，其氣溫與水溫略一致，但上層空氣溫暖且極乾燥，其濕度約在 60~80% 之間。在這種氣象條件下所產生之槽化叫做海洋性槽化，略似於平流性槽化。由於空氣乾燥，所發生之槽化不太顯著，故又名乾燥性槽化。

#### (4)雷暴性槽化

雷暴下部之輻散下沉氣流，在地面層也會產生槽化作用。發生這種情況雖然較少見，但十分重要的。在這種氣象條件下所產生的槽化現象叫做雷暴性槽化。因冷空氣在雷暴之底部分散，故在最下層幾百公尺之範圍內形成了逆溫層。這時候空氣具有很高的地濕，而在一個小面積內形成強烈之槽化。原來雷暴是有垂直混合之不穩定天氣現象，因而低層穩定的垂直遞減率存在的時間一般很短，大約僅能持續 30~60 分鐘。雷暴性槽化在雷達風暴觀測上是非常重要的，因爲在雷達附近發生雷暴的時候通常是雷達觀測進行最忙碌的時候，此時在雷達 PPI 電幕上突然增加許多平時不輕易出現之地面目標物示波，同時遠距離之目標物示波亦跟著出現。

#### (5)下沉性槽化

一氣團內部之空氣，徐緩呈絕熱變化而下降變成爲暖乾空氣時，這種槽化叫做下沉性槽化。在高氣壓之內部，由於空氣發生下沉現象接近蒸發較旺盛之大地或海面時，產生濕度之不連續線及溫度之逆溫層。

一般來看其高度約為 1,000 公尺或以上，多形成爲 S 型。

(6) 鋒面性槽化

二種性質不同之暖冷氣團接觸時，當然在其境界

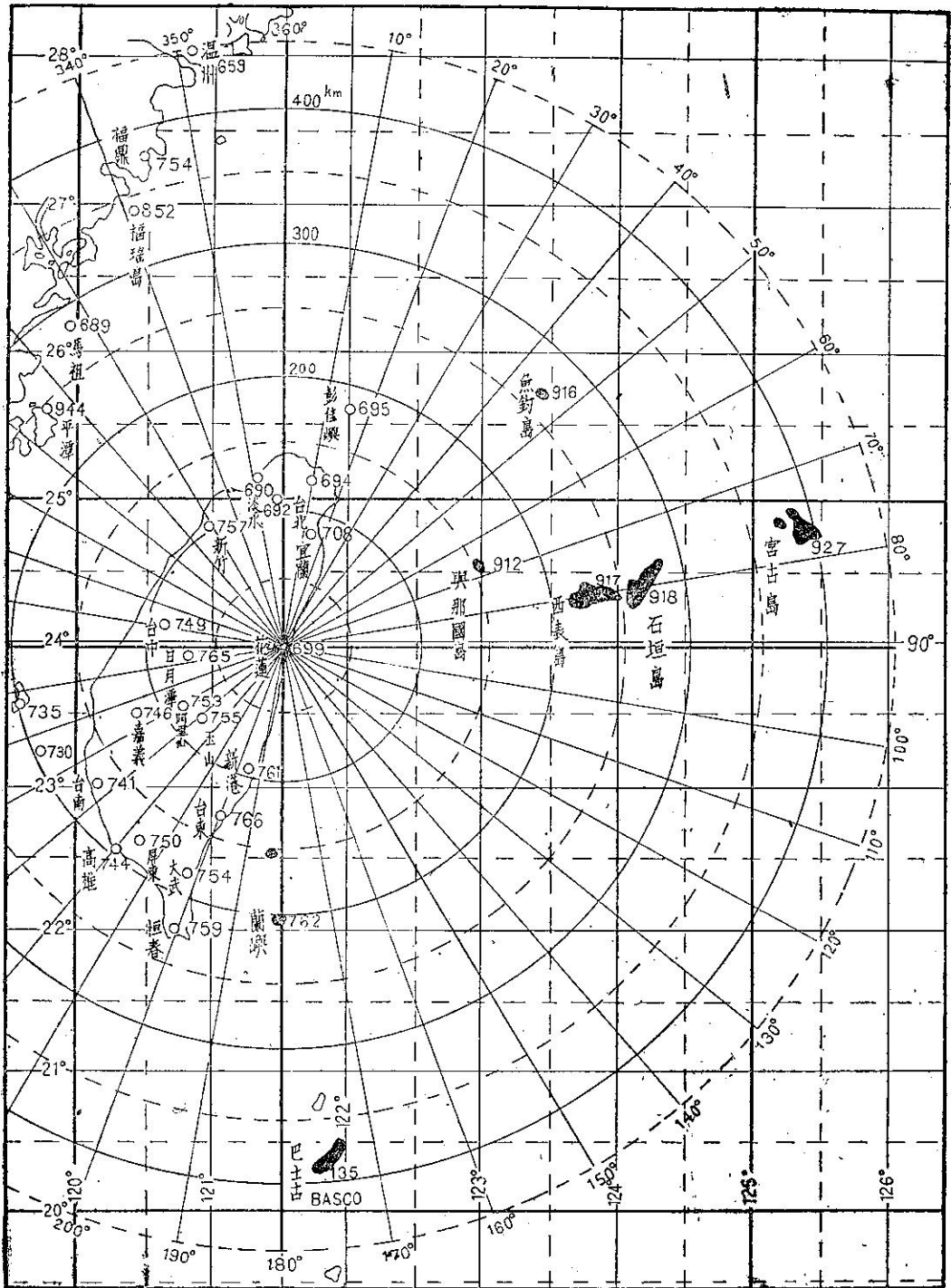


圖 4：本省東方海面上之槽化回波現象 (依花蓮 WSR-64 型氣象雷達)。  
Fig 4: The Ducting Echoes Phenomena of Taiwan Eastern Sea (By Hua-Lien WSR-64M Weather Radar)

，由於能產生大氣之旋渦，可以說不致形成顯明之不連續面，即對於槽化現象不會有多大之作用。但具有雷雨之冷鋒面由於冷暖大氣在垂直方向形成逆溫，鋒面全體之移動較緩慢，較低壓性鋒面容易形成槽化。

(7) 霧性槽化

在夜間由於空氣受到冷卻之結果有時候產生霧。由這種氣象條件我們可知在地面上之 M 值是逐次減少的。若在霧中形成為氣溫之逆轉，而且沿着垂直方向增加其飽和水氣壓時，不會形成槽化現象。但時常顯出標準形 M 曲線。想這種情況時因電磁波向上彎曲，而告衰減或消失。

(8) 其他氣象現象所引起之槽化

在夏天或在溫暖之氣候中，雷雨或對流性陣雨過後之地區，時常發生槽化現象。有時候陣雨或雷雨尚未完全停止，即在降雨末期尚有輕微之降水時，亦能發生槽化現象。這種槽化之形成，在雷雨或陣雨過後或在末期，可能基於下列情形存在所致：(1)大約在地面上已靜風，而空氣之擾亂和混合為最小時，(2)這種降雨在溫暖地面或其他表面迅速蒸發，而產生陡直之濕氣隨着高度遞減時，(3)地球表面及低層大氣由於蒸發冷卻，而產生逆溫現象破壞有利於溫度與濕度所構成之空氣混合時，均能引起槽化現象。降雨後若有適合於上述之任何一種條件，地形目標物即可在電幕上出現不正常之距離，直至地面受熱增加，產生足夠之氣流擾亂以破壞有利於電磁波槽化形成之溫度濕度之高度分佈為止。若雷雨或陣雨在傍晚發生，則在晚上氣層較穩定並且有發生地面霧。在這種氣象條件下，槽化有持續長時間之可能性。

五、二年來本站所發現之槽化現象

無論在陸上或海上，能了解槽化之發生處所，對於雷達示波分析上，可以說非常重要之一種工作。關於在陸上所發生之槽化，因本站雷達位於東部海岸（花蓮市美崙），雷達電幕上之西面部分均被本省中央山脈所擋阻，其顯出之示波極複雜，是否有發生槽化現象，實際很難分析。最好利用晴朗天氣日多次觀測，描寫固定示波以資分析槽化之用。關於海面上所發生之槽化現象，其分析較容易（請參照圖 4）。茲列舉二年來在電幕上發生槽化時所顯出之各島嶼之位置及其時間記錄如表一及表二：

島 嶼	由本站 WSR-64 氣象雷達所觀測之各島嶼之位置	
	方 向	距 離
綠 島	183°~184°	76~ 81 N. M.
蘭 嶼	180°	114~116 N. M.
巴 士 古	172°~175°	213~221 N. M.
魚 釣 島	41°~ 43°	145~147 N. M.
與 那 國	67°	78~ 79 N. M.
西 表 島	77°~ 78°	117~124 N. M.
石 垣 島	74°~ 77°	142~150 N. M.
宮 古 島	75°~ 78°	214~235 N. M.

表一： 產生槽化時，由本站氣象雷達電幕上所顯出之各島嶼之位置表。

Table 1: The Positiun Table of Island Ducting Echoes.

表二： 各島槽化回波之出現時間

Table 2: The Appearance Time of Island Ducting Echoes.

觀 測 時 間				綠 島	蘭 嶼	巴 士 古	魚 釣 島	與 那 國	西 表 島	石 垣 島	宮 古 島
年	月	日	時間 (Z)								
56	06	08	1150	✓	✓						
56	06	16	1200	✓	✓						
56	06	17	0000	✓	✓	✓		✓	✓		
56	06	17	1150	✓	✓	✓		✓	✓		
56	06	18	0600	✓	✓				✓		
56	06	18	1200	✓	✓		✓	✓	✓	✓	
56	06	19	0000		✓		✓		✓	✓	
56	06	19	0600				✓		✓	✓	
56	06	19	1200			✓			✓	✓	

56	06	20	0600	✓	✓	✓			✓	✓	
56	06	20	1150		✓	✓	✓		✓		
56	06	21	0000	✓	✓						
56	06	21	0555	✓	✓						
56	06	21	1150		✓	✓			✓	✓	
56	06	22	0000	✓	✓						
56	06	22	0600	✓	✓						
56	06	22	1155		✓						
56	06	26	0000	✓							
56	06	27	0000	✓							
56	07	03	0550						✓	✓	
56	07	03	1150		✓		✓		✓	✓	
56	07	04	0000		✓				✓	✓	
56	07	04	0550		✓				✓	✓	
56	07	04	1200		✓			✓	✓	✓	
56	07	05	0550				✓		✓	✓	✓
56	07	05	1100				✓		✓	✓	
56	07	05	0900					✓	✓	✓	
56	07	05	1150		✓		✓	✓	✓	✓	
56	07	05	1500		✓				✓	✓	
56	07	05	2100						✓	✓	
56	07	10	1455	✓							
56	07	10	1600	✓	✓						
56	07	10	1656	✓							
56	07	10	1758	✓	✓						
56	07	10	2000	✓							
56	07	10	2100	✓							
56	07	16	0600						✓	✓	✓
56	07	17	0000		✓						
56	07	17	0600						✓	✓	
56	07	18	0550						✓		1
56	07	23	0600		✓						
56	67	24	0000		✓						
56	07	30	1400		✓						
56	08	18	0300	✓	✓						
56	08	20	1200	✓							
56	08	20	2355	✓							
56	08	25	2355	✓	✓						



56	09	01	0000								
56	09	01	0600								
56	09	02	0000	✓					✓		
56	09	07	0555	✓	✓						
56	09	10	1340	✓	✓						
56	09	10	2355	✓	✓						
56	10	16	0000	✓							
觀測次數計				28	32	6	8	6	25	19	3
				52%	59%	11%	15%	11%	46%	35%	5%

表二係為本站自55年1月開始觀測以來，所發現之槽化記錄（在55年間，因夏天之惡劣天候之持續時間極長，又觀測人員之初次經驗及缺乏觀測技術，以致未能記出槽化之記錄）。茲將在56年間觀測時所發現之槽化現象共28日54次，經過著者分析結果所獲得之事實如下：

(1)槽化現象之出現均發生於夏天（6月~10月間），又夜間所測出之機會較白天為多，這可能與空氣之下沉或氣溫之逆溫有直接之關係。根據過去之觀測在冬天尚未測出過槽化之記錄，這可能由於東北季風增強，尤其是在海面上強風特別顯著無法構成逆溫現象所致。

(2)顯出槽化現象時之天氣狀態，由 PPI 電幕上觀測時，雖然有時候能看出其他之小面積示波或分散之細胞狀示波，但大部份之天氣情況均屬於無風晴天之天氣，其餘則並未看出其他任何示波。

(3)海面上之島嶼，在一般之天氣情況下其回波通常是不出現在雷達電幕上的，但一旦槽化發生時，不應該有之島嶼示波就能顯示於電幕上。根據去（56）年一年當中所觀測之槽化54次中綠島之出現次數有32次之多，占全部之百分之五九。

(4)本省被龐大於副熱帶高氣壓（Sub High）內時，由於強烈之日射使得靠近水面附近之空氣，產生一超絕熱直減率，特別是到了夜間時潮濕之水面逆溫和濕度隨高度之迅速降低，而產生槽化現象。例如56年6月間之槽化現象均屬於這類。

(5)在56年間顯示槽化現象最多者為6月與7月間，持續期間最長一次者為6月16日~6月22日共計7天，又島嶼示波之顯示數目最多者為6月18日1200Z，除了最遠距離之巴士古（213~221 N. M）及宮古島（214~235 N. M）以外其他各島嶼均曾出現。

(6)颱風接近本省數日前，因受到太平洋副高氣壓

之影響日射強烈，而形成為晴朗天氣，在能見度方面形成為異常視程。在這種氣象條件下較容易發生槽化。例如7月3日~7月5日，7月10日，7月23日~24日，8月20日，10月16日各為畢莉，葛萊拉，戴特，解拉等颱風接近本省前所形成之槽化現象。又颱風通過後由於太平洋之副熱帶高氣壓之迅速擴大，伸展至本省時，也能隨時恢復槽化現象。例如7月16日~18日係為葛萊拉通過本省後太平洋副熱帶高氣壓急速發展，而伸展至本省所引起的。

(7)本省附近之氣壓配置情況甚鬆而無風晴朗之天氣下，並未受到颱風之影響時，且另一方面在蒙古或貝加爾湖之高氣壓將要南下，使冷鋒逐次接近本省時，亦能產生槽化現象（例如9月10日）。

(8)由華北南下之高氣壓一旦出海，本省在此高氣壓內，白天受到強烈日射，天氣晴朗早晚無風狀態時，大氣發生下沉現象，而容易產生槽化現象（例如9月7日）。

## 六、結 論

從電磁波射理論之考察及本站所觀測之海面上槽化現象之實際記錄分析，我們可獲得下列之結論。

(1)我們已知，形成槽化現象之氣象條件，即是大氣溫度隨高度增加而產生逆溫現象，在這逆溫現象中水汽隨高度遞減率又大時，容易助成槽化現象之發生。

(2)惡劣天氣或降雨天氣，風暴等因能破壞大氣之穩定度及逆溫逆濕，不適合於形成槽化現象。差不多在地面靜風情況下，空氣之擾亂及混合甚小之晴朗天氣時，或者降雨後在溫暖地面迅速蒸發，而產生陡直之濕氣隨高度遞減時，均容易助成槽化現象之產生。

(3)在正常之天氣情況下，氣象雷達觀測人員對不

波分析應確實了解海面上各島嶼之位置及陸地上各山脈及其他反射物在電幕上之排列情況，藉此始能分辨槽化之發生。關於陸上槽化之研究將來俟機會再作詳細之研究。

參考文獻：

- (1) Louis J. Battan (1959): Radar Meteorology P14~23
- (2) Homer W. Hiser and William L. Freseman (1959): Radar Meteorology P80~107.
- (3) J. Francis Reintjes and Godfrey T. Coate (1960): Principle of Radar P1135~1156.
- (4) D. E. Kerr (1951): Propagation of Short Radio Wave. Radiation Laboratory Series 13. New York McGraw-Hill Co., P728.
- (5) M. Onuki(1958): The Radio Duct Caught by a PPI Scope of the Weather Radar. P517~524.
- (6) Direction of the Chief of Naval operations (1954): Meteorological Refractive Effects Upon Radnr Wave Propagation.
- (7) 涉谷茂一 (1964): マイクロウエーブ傳播解説 P76~84