

台灣附近海域蒸發導管之特性研究

蔡世樵¹、朱延祥¹、陳文定²

海軍大氣海洋局

摘要

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，對於電波的傳播有很大的影響。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、空中導管和蒸發導管。其中，蒸發導管發生的地點是在廣大的海洋面上，此種導管最特殊的一點就是具有持久存在的性質，且其所影響的電波通訊頻率在 3GHz 以上，對於海洋航行艦艇上之雷達通訊及偵蒐效能皆會造成很大的影響。有鑑於此，美國海軍電子實驗室於 1976 年發展出一套整合大氣折射效應預報系統(Integrated Refractive Effects Prediction System, 簡稱 IREPS)，並自 1982 年起開始大量使用於美軍各級軍艦上，進一步提升了各級戰艦的雷達預警能力。至 1995 年更發展出視窗版大氣折射效應預報系統 (Advanced Refractive Effects Prediction System, 簡稱 AREPS)，此系統內建有蒸發導管模式，可藉由輸入空氣溫度、海水溫度、相對溼度及風速等氣象環境參數，計算得到蒸發導管特性參數。本研究主要是利用在台灣附近海域施放探空氣球所得到的探空資料，將計算得到的實際蒸發導管特性參數，與 AREPS 系統模擬得到的蒸發導管特性參數做比對。

經過比對的結果發現，在環境空氣溫度大於海水溫度的情況下，AREPS 系統所模擬得到的蒸發導管高度值，遠較實際探空資料計算得到的蒸發導管高度值要來的大許多；而在環境空氣溫度小於海水溫度的情況下，該系統所模擬得到的蒸發導管高度值與實際計算得到的值相比則較為準確。

關鍵字：大氣導管、蒸發導管、整合大氣折射效應預報系統

一、前言

電磁波在對流層中的傳播，會受到大氣折射指數(Atmospheric Refractive Index)隨空間變化的影響，而大氣折射指數又與大氣環境的氣壓、蒸氣壓及大氣溫度等氣象因子相關，因此不同的天氣型態也會造成不同的大氣折射指數在空間上的分佈。隨著大氣折射指數在垂直方向上分佈的不同，電磁波傳播的偏折現象亦隨之而異。根據電磁波傳播路徑之偏折情形，大致上可將電波在大氣中的折射現象分成四類：正常折射 (Standard)、次折射(Subrefractive)、超折射(Superrefractive)和陷捕(Trapping)。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(Waveguide)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)。

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-Based Duct)、空中導管 (Elevated Duct) 和蒸發導管 (Evaporation Duct)。其中，蒸發導管的發生環境是在廣大的海洋區域且產生原因不同於地面導管及空中導管。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。平均而言，蒸發導管高度值一般介於 0 至 40 公尺之間，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，且所影響的電波頻率在 3GHz 以上。由於此種導管是在海洋面上產生，因此對於陸基及航行艦艇上之雷達通訊及偵蒐效能皆會造成很大的影響。

2003 年 7 月 4 日 0400LST 時，雷達回波圖顯示台灣海峽北部至北部海面有一明顯之帶狀強回波區 (圖 1)，顯示該處應有劇烈之天氣現象產生，但將同一時間之 GOES9 紅外線雲圖 (圖 2) 拿來做比對的結果卻顯示，台灣海峽北部至北部海面的雲量相當稀少，應該沒有劇烈的天氣現象產生，此結果與雷達回波圖所顯示差異甚大。較為合理的解釋是當時在雷達波通過的海面上有蒸發導管發生，導致部分電波被此導管所陷捕而使其傳播距離增加，該強回波可能是電波因傳播距離增長，打到遠處某建築或山脈所造成的地形回波，而非劇烈天氣現象所造成的回波。

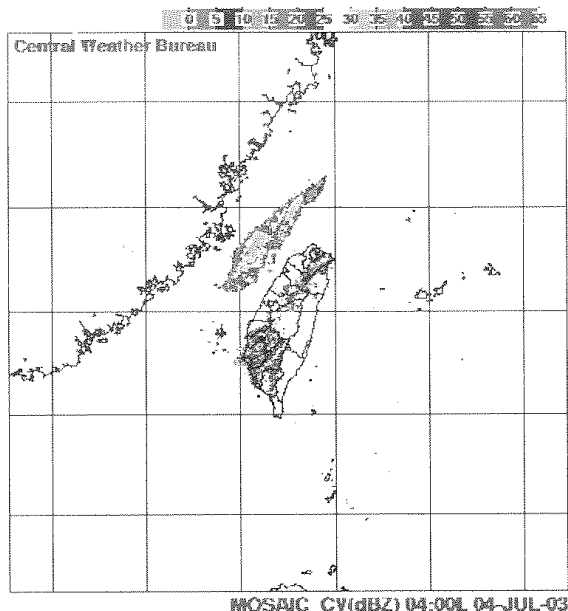


圖 1 2003年 7 月 4 日 0400LST 時雷達回波圖。

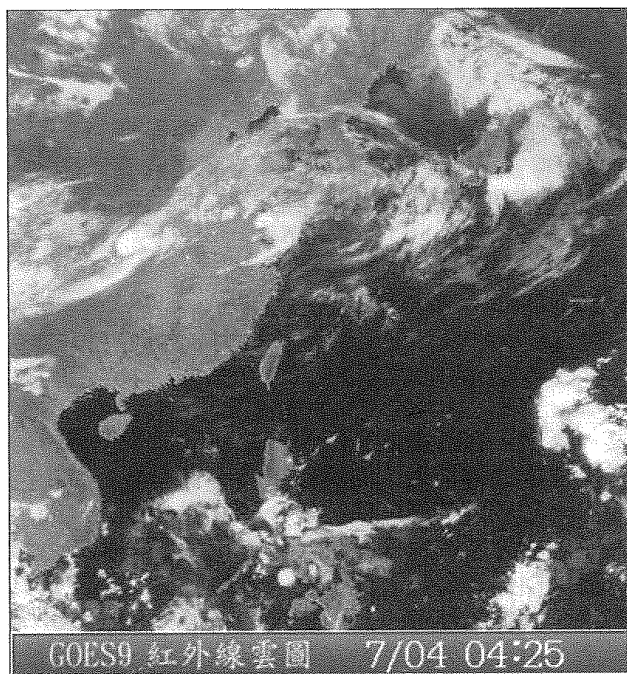


圖 2 2003年 7 月 4 日 0425LST 時 GOES9 衛星雲圖。

由上述的實際案例可以得知，蒸發導管的存在對於雷達將造成很大的影響，因此，若能藉由實際氣象資料計算得到蒸發導管特性參數，將有助於雷達回波圖之分析研判，避免對導管所造成之異常回波產生誤判。一般來說，要分析有無大氣導管發生最直接的方法，就是藉由探空資料中的大氣氣壓、蒸氣壓及大氣溫度等氣象參數，計算出修正後的大氣折射率 (Modified Refractivity) 隨高度分佈的資料，並以此判斷有無大氣導管發生及計算其特性參數。但由於探空氣球成本較高，通常一天只施放兩次，因此探空資料的數量並不多，再加上探空站幾乎都設在陸地上，僅能用於分析地面導管和空中導管，對於廣大海洋面上的蒸發導管來說，資料就相對的

缺乏許多。有鑑於此，美國海軍於1995年發展出視窗版大氣折射效應預報系統 (AREPS)，此系統內建有蒸發導管模式，可藉由輸入空氣溫度、海水溫度、相對溼度及風速等氣象環境參數，計算得到蒸發導管特性參數。目前此系統已大量使用於美軍各級軍艦上，成效良好。而台灣地區位於副熱帶地區又為海陸交接帶，天氣變化多樣，與美國不太相同，因此本系統能否有效運用於台灣附近海域，仍有待進一步的驗證。

本文主要是利用台灣附近海域探空資料計算得到之蒸發導管特性參數，與 AREPS 蒸發導管模式計算得到之蒸發導管特性參數進行比較。第一部份為前言，第二部份為資料處理與分析方法，第三部份則是實際蒸發導管參數與 AREPS 蒸發導管模式的比較，第四部份則為結果與討論。

二、資料處理與分析方法

在施放探空氣球所得到的探空資料中有大氣氣壓、大氣溫度、露點溫度、相對溼度等氣象參數隨高度的分佈資料，利用這些參數可以計算出大氣折射指數隨高度的分佈，其計算方法為 (Balsley and Gage 1980)：

$$n = 1 + \left(77.6 \frac{P}{T} + 373000 \frac{e}{T^2} \right) \times 10^{-6}$$

其中 P 為大氣壓力，單位是百帕 (hPa)，T 為大氣溫度，單位是 K，e 為大氣中的水汽壓，單位是百帕 (hPa)。由於在探空資料中沒有大氣水汽壓的資料，因此要用水汽壓與露點溫度的關係式來計算，其計算方法為 (施順鵬 2002)：

$$e = 6.11 \times \text{EXP} \left(19.7 \times \frac{T_d(^{\circ}\text{C})}{T_d(^{\circ}\text{K})} \right)$$

其中 Td 為大氣的露點溫度。經過上式實際計算的結果發現大氣折射指數的值非常接近 1，其值變動範圍大約在 1.0001~1.0004 之間。因此為了能更清楚的顯示其擾動的情形，定義一個新參數，即大氣折射率 (Atmospheric Refractivity)，其計算方法為：

$$N = (n - 1) \times 10^6 = 77.6 \frac{P}{T} + 373000 \frac{e}{T^2}$$

而在將地球曲率的因素考慮進去後，可以得到一個新的折射率參數，稱作修正後的折射率 (Modified Refractivity)，其計算方法為：

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

其中 a 為實際地球半徑 (約 6400 公里)。藉由上式便可計算出修正後的折射率隨高度分佈的曲線，並

可以此來判斷是否有大氣導管的存在並決定其特性參數。圖 3 為一個空中導管的M值隨高度分佈的曲線圖，圖中 H_0 代表導管發生的高度，A、B兩點的高度差定義為導波層的厚度，A、C兩點的高度差定義為導管的厚度，而A、B兩點的M值差定義為導管的強度（許舜清 1995）。圖 4 為一個地面導管的M值隨高度分佈的曲線圖，其導管特性參數的判讀方法與空中導管相同。而蒸發導管的M值隨高度分佈的曲線圖與地面導管相同，只不過其發生的環境是在廣大的海洋區域。

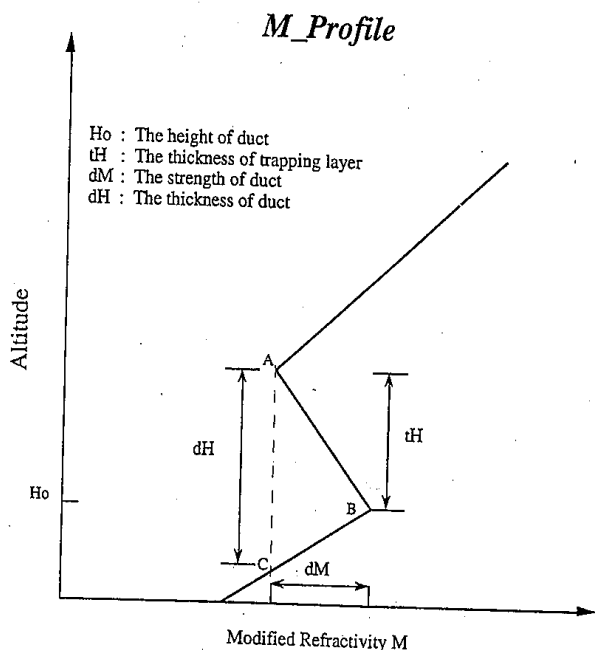


圖 3 空中導管之修正後的折射率M隨高度分佈的曲線圖（許舜清 1995）。

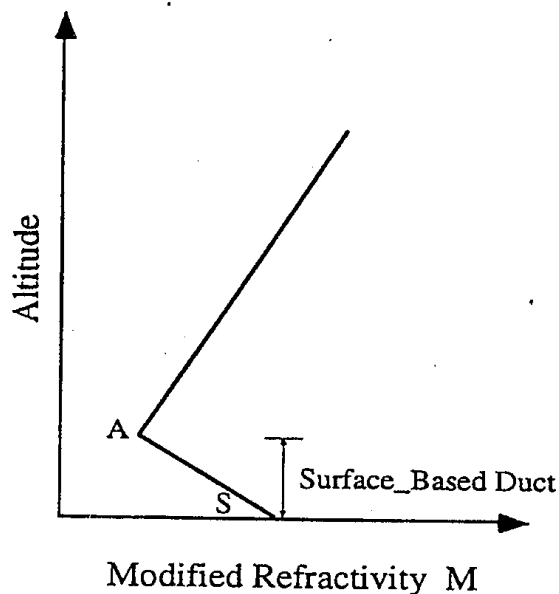


圖 4 地面導管之修正後的折射率M隨高度分佈的曲線圖（許舜清 1995）。

由上述的方式便可利用探空資料計算得到蒸發導管

高度、強度、厚度等特性參數資料。

而在美軍 ARPES 系統中的蒸發導管模式，可以藉由輸入當時海洋表面的氣象資料，例如海洋表面的空氣溫度、海洋表面的海水溫度、相對溼度以及風速等，便可以計算出修正後的折射率隨高度分佈的資料和蒸發導管的高度（Jeske 1965, 1971, 1973）。首先要注意到在此模式中，如果我們輸入的風速大小小於 0.01 節，蒸發導管的高度直接設定為 0，亦即沒有蒸發導管發生；如果輸入的風速大於 0.01 節，就會經由一連串的計算式計算出蒸發導管高度值。

三、實際蒸發導管參數與 AREPS 蒸發導管模式的比較

為了分析 ARPES 蒸發導管模式在台灣附近海域模擬的準確性，在此利用 2003 年 8 月 6 日至 18 日在海上實際施放探空氣球所得到共 21 筆的探空資料來與模式資料做比對。藉由海上探空資料可以計算出修正後的折射率隨高度的分佈資料以及蒸發導管的高度，同樣的，利用施放探空氣球當時所紀錄下來的海水溫度、空氣溫度、相對溼度和風速等氣象參數，輸入 AREPS 蒸發導管模式中，也可以得到相同的資料，因此便可以用探空資料計算出來的結果和模式模擬的結果來做比對。在此要特別說明的是，紀錄空氣溫度、相對溼度和風速等參數的位置大約是在距離海洋表面 5 公尺的高度上。在本節中將針對模式所模擬出的水汽壓、修正後的折射率隨高度的分佈、蒸發導管高度以及強度來做比對。

（一）水汽壓之比對

在 AREPS 蒸發導管模式中，有一用來計算空氣的水汽壓的式子，其計算方法為：

$$e = \frac{RH}{100} \left[6.105 \text{ EXP} \left[25.22 \left(\frac{T_{sk} - 273.2}{T_{sk}} \right) \right] - 5.31 \log_e \left(\frac{T_{sk}}{273.2} \right) \right]$$

其中 RH 代表海洋表面週遭的相對溼度。而在第 2 節處理探空資料的過程中，也提到計算水汽壓的式子，此二式明顯的計算方式不同。因此，為了要分析 AREPS 蒸發導管模式對於水汽壓模擬的準確性，在此將 2003 年 8 月 6 日至 10 日的探空資料取數筆當作原始資料，然後代入上述 2 式，計算出兩者的水汽壓值，再畫出相關圖（圖 5）。由圖中可以看到，此兩者明顯呈現正相關的情形，且相關係數顯示兩者之間是高度相關的，另外計算出來的方均根（Root Mean Square）值都相當的小，顯示兩資料之間的離散程度很小。因此，在 AREPS 蒸發導管模式中對於水汽壓的計算，是相當符合於實際情況的。

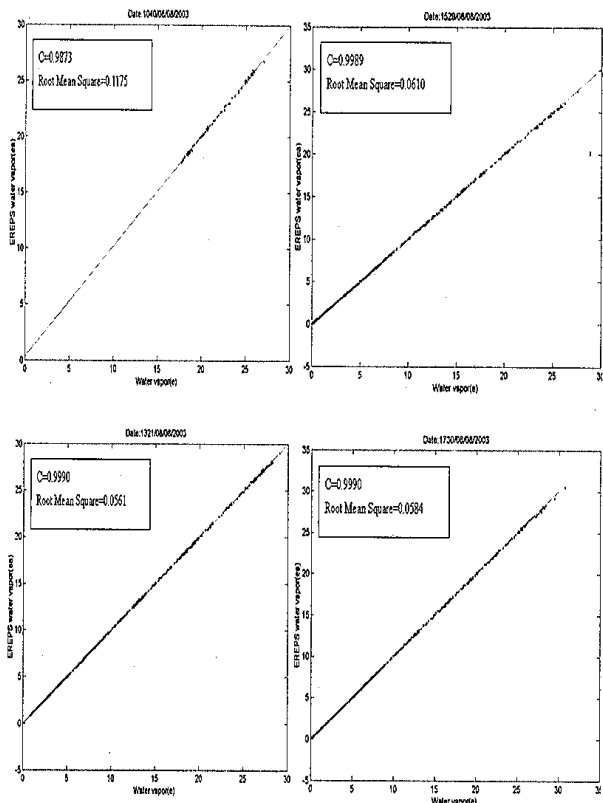


圖 5 2003 年 8 月 8 日 1040LT、1321LT、1529LT、1730LT 海上探空資料之理論水汽壓與 AREPS 模擬水汽壓的關係圖。

(二) 修正後的折射率隨高度分佈之比對

利用 2003 年 8 月 6 日至 18 日的實際海上探空資料，可以計算得到修正後的折射率隨高度分佈的資料，而將施放探空氣球當時記錄的海水溫度、空氣溫度、相對溼度和風速等參數代入 AREPS 蒸發導管模式後，亦可以模擬得到修正後的折射率隨高度分佈的資料。因此為了校驗 AREPS 蒸發導管模式模擬的準確性，在此將兩者計算出之修正後的折射率隨高度分佈的資料畫在同一張圖上做比較，其中輸入模式的高度值是由 1 公尺開始每隔 1 公尺輸入一點，並且由於蒸發導管高度一般介於 0 至 40 公尺之間，因此在圖中高度最高只取到 100 公尺（圖 6a~ 圖 6b）。由圖中可以發現到，兩者之修正後的折射率在高度較低的區域有較大的差異，在高度較高的區域則較為接近。而在探空資料顯示有蒸發導管發生時，兩者之間折射率的差值，要比在沒有蒸發導管發生時的差值小。

為了得到更詳細的結果，在此分別對這段期間有發生蒸發導管及無蒸發導管的事件，做折射率差值平均（50~100 公尺）的統計直方圖（圖 7a~ 圖 7b）。由圖中可以看到，在無蒸發導管發生事件中的折射率差值，確實要比有發生蒸發導管來的大。因此由以上分析的結果顯示，AREPS 蒸發導管模式模擬之修正後的折射率隨高度分佈資料，在實際有發生蒸發導管的情形下比較準確，在實際沒有蒸

發導管發生的情形下則偏差較大。

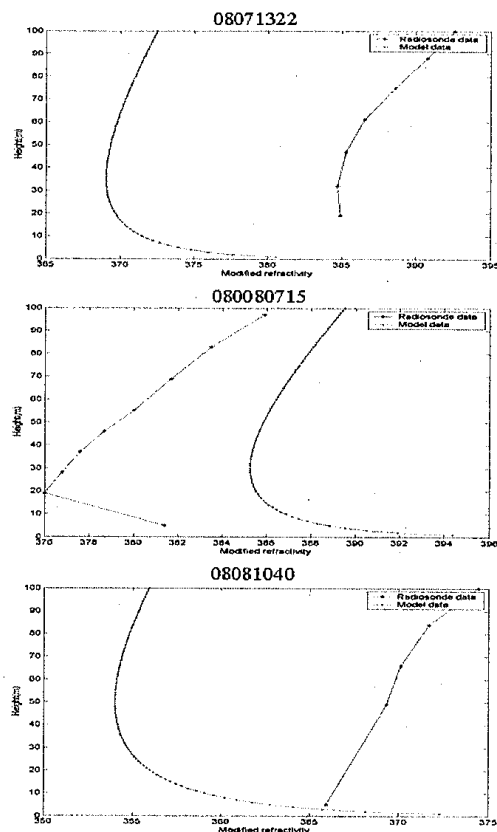


圖 6a 2003 年 8 月 7 日 1322LT、8 日 0715LT、1040LT 海上探空資料之 M-Profile 與 AREPS 模式模擬之 M-Profile 比較圖。

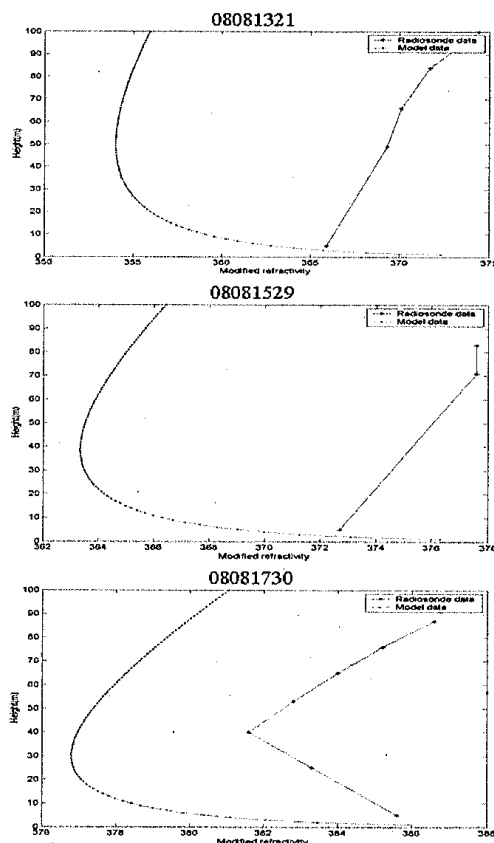


圖 6b 2003 年 8 月 8 日 1321LT、1529LT、1730LT 海上探空資料之 M-Profile 與 AREPS

模式模擬之M-Profile比較圖。

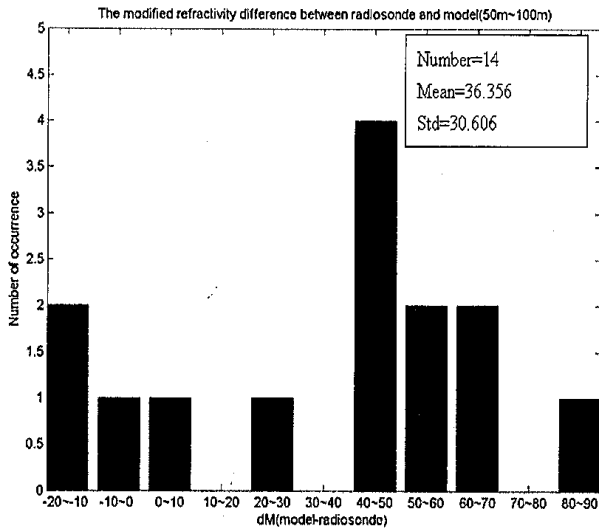


圖 7a 無蒸發導管發生時探空資料與模式折射率差值平均統計直方圖。

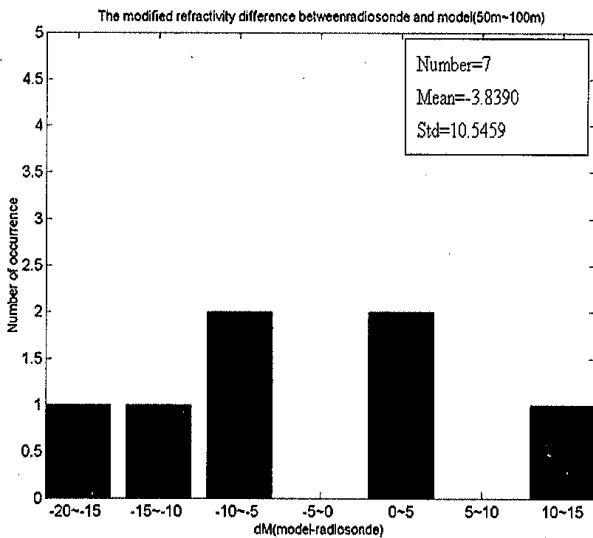


圖 7b 有蒸發導管發生時探空資料與模式折射率差值平均統計直方圖。

(三) 蒸發導管高度、強度之比對

在得到修正後的折射率隨高度分佈的資料後，便可以判斷有無蒸發導管的發生以及計算其高度、強度等特性。圖 8、圖 9 分別為 2003 年 8 月 6 日至 18 日期間，探空資料與 AREPS 蒸發導管模式模擬之蒸發導管高度、強度差值的統計直方圖，其中橫軸代表模式模擬之蒸發導管高度、強度減去探空資料計算之蒸發導管高度、強度的差值，縱軸代表發生的次數。由圖中可以看出兩者在蒸發導管高度的差值較大，分佈的範圍從 50~30 都有，而強度的差值較小，平均差值僅 5.5 左右。根據 Paulus 在 1985

年發表的論文中提出，IREPS 蒸發導管模式在空氣溫度大於海水溫度的情況下，模擬出的蒸發導管高度往往比實際高出許多，且溫度量測誤差會對其模擬結果造成很大的影響，表示在這種情況下其可信度較低。為了驗證此一說法是否正確，在此我們將施放探空氣球當時的空氣溫度、海水溫度，以及探空資料計算的蒸發導管高度、模式模擬的蒸發導管高度做比較表（表 1）。由此表可以發現，在空氣溫度大於海水溫度的情況下，模式所模擬的蒸發導管高度確實普遍較高，且與實際探空計算出來的蒸發導管高度差值也較大。

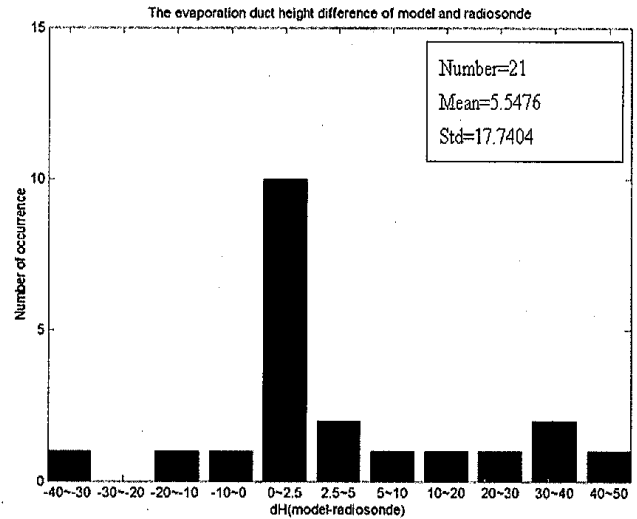


圖 8 AREPS 蒸發導管模式與探空資料計算之蒸發導管高度差值的統計直方圖。

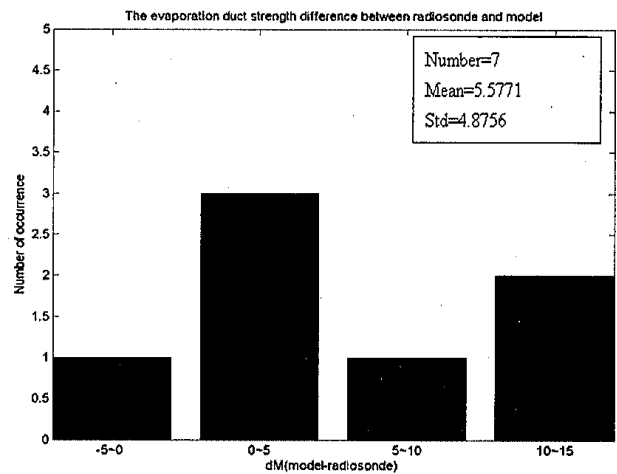


圖 9 AREPS 蒸發導管模式與探空資料計算之蒸發導管強度差值的統計直方圖。

為了得到更進一步的結果，在此將 2003 年 8 月 6 日至 18 日期間空氣溫度大於海水溫度的探空資料去掉，然後再做一次蒸發導管高度差值的統計直方圖（圖 10）。從圖中可以看到，蒸發導管高度差值比起還沒去掉空氣溫度大於海水溫度的探空資料時，明顯的變小了。由以上的分析結果可以知道，AREPS 蒸發導管模式在空氣溫度大於海水溫度的情況下，模擬出來之蒸發導管高度值的準確度及可

信度較低，而在海水溫度大於空氣溫度的情況下，模擬的結果則較為準確。

08181700LT	28.2	30	0	0
------------	------	----	---	---

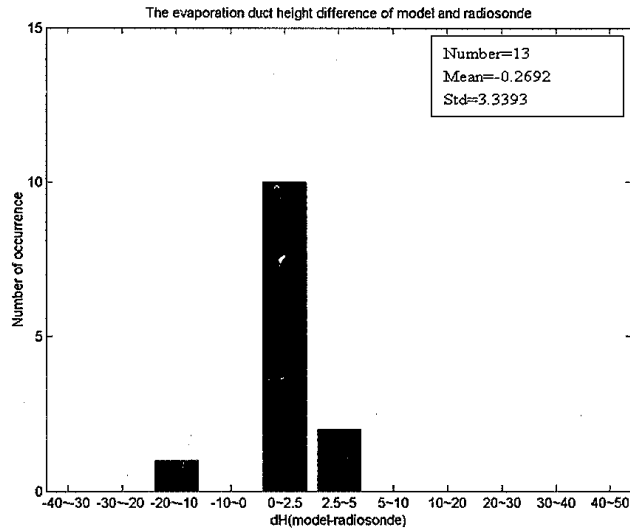


圖 10 去掉空氣溫度大於海水溫度的事件後探空與模式蒸發導管高度差值的統計直方圖。

表 1 蒸發導管計算值和模擬值與空氣、海水溫度的關係表

資料時間	空氣溫度	海水溫度	蒸發導管高度計算值	蒸發導管高度模擬值
08071322LT	28.1	29.0	32	35.5
08080715LT	30.8	30.0	19	29.5
08081040LT	30.8	30.0	0	49.5
08081321LT	28.4	28.9	30	33.5
08081529LT	29.0	28.9	0	38.5
08081730LT	28.6	28.9	40	29.5
08081939LT	30.8	28.9	15	5.5
08091825LT	29.4	29.0	0	8.5
08092115LT	28.9	28.9	0	0
08100752LT	31.0	28.9	0	23.5
08161900LT	28.6	29.1	0	0
08170800LT	25.6	28.0	0	0
08171100LT	26.8	30.0	0	0
08171400LT	25.3	29.0	0	0
08171700LT	25.3	30.0	0	0
08172000LT	25.1	30	0	0
08172300LT	27.1	30	0	0
08180800LT	28.0	29.9	0	0
08181100LT	29.2	29	4	35.5
08181400LT	30.6	30	50	17.5

四、結果與討論

經過以上統計的結果發現，在台灣附近海域，AREPS 系統中蒸發導管模式在實際有蒸發導管發生的情況下模擬的結果較為準確，在實際無蒸發導管發生的情況下則偏差較大，且其在空氣溫度大於海水溫度的環境時，模擬出的蒸發導管高度與實際相比往往會偏高許多，其預測的可信度也較低。

本研究所使用的資料是在船上施放探空氣球所得到的海上探空資料，不過由於要配合船艦的作業以及出海時間，再加上海上操作失敗率較高，導致資料的數量不是很多，比對結果的準確。未來如果能持續進行海上觀測而得到更多的海上探空資料，對於 AREPS 系統在台灣附近海域表現的比對結果將會更為精確，同時藉由比對的結果，也能夠對其系統做適度的修正，以建立起台灣海域大氣折射效應預報系統模式，對於船艦上雷達的通訊品質及偵搜能力必定會有很大的助益。

參考文獻

- 施順鵬，2002：“臺灣地區 Ka 波段大氣傳播通道之研究”，國立中央大學太空科學研究所博士論文。
- 許舜清，1995：“臺灣地區大氣導管現象特性研究”，國立中央大學太空科學研究所碩士論文。
- Balsley, B.B., and K.S. Gage, 1980：“The MST radar techniques: Potential for middle atmosphere studies”, *Pure Appl. Geophys.*, 118, 452-493.
- Jeske, H., 1965：“Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im cm-bis m-Band ueber dem Meer unter besonderer Beruecksichtigung der meteorologischen Bedingungen in der maritimen Grenzschicht”, *Hamburger Geophysikalische Einzelschriften*.
- Jeske, H., 1971：“The state of radar-range prediction over sea, Tropospheric Radio Wave Propagation, Part □”, *NATO-AGARD Conference Proceedings No. 70*.
- Jeske, H., 1973：“State and limits of prediction methods of radar wave propagation conditions over sea, Modern Topics in Microwave Propagation and Air-Sea Interaction”, A. Zancla, ed., Reidel Pub.
- Paulus, R.A., 1985：“Practical application of an evaporation duct model, *Radio Sci.*, 20, 887-896.