

戰場環境大氣折射效應之監控與誤差修正方法之研究

蔡世樵¹、楊國峰²、朱延祥³¹國防大學理工學院環境資訊及工程學系²國防部軍備局中山科學研究院系統發展中心³國立中央大學太空科學研究所

摘要

電磁波在大氣對流層中的傳播，會受到大氣折射指數 (Atmospheric Refractive Index) 隨空間變化的影響，而在對流層的大氣折射指數又與大氣環境的氣壓、水蒸氣壓及溫度相關，因此，電磁波在對流層中將會受天氣與氣候因素影響而導致傳播路徑之偏折，一般而言可將此折射現象分成四類：正常折射(Standard)、次折射(Sub-refractive)、超折射(Super-refractive)和陷捕(Trapping)。正因為不同之大氣環境會產生不同之電波折射效應，進而產生仰角誤差及路徑延遲等大氣折射誤差現象，影響雷達偵蒐效能及造成電波遙測設備誤判；由此可知，若能有效監控戰場環境之大氣折射指數變化，並藉此進行大氣折射誤差修正，將可大幅提高武器裝備之打擊精準度，增加作戰成功之勝算。本研究即針對現行可用來監控大氣折射指數剖面之方法，如探空氣球、經驗方程式及電波掩星法 (Radio Occultation) 等，分析各方法之優缺點及條件限制，並藉由大氣折射誤差修正方法，模擬不同狀況下之仰角誤差及路徑延遲量，以探討大氣折射誤差修正之必要性。

關鍵字：大氣折射指數，次折射，超折射，陷捕，仰角誤差，路徑延遲，電波

掩星法 (Radio Occultation)

一、前言

在二次世界大戰之後，科學家們開始對此期間雷達所接收到的訊號予以分析研究，並發現了一些訊號突然衰減或增強的異常現象，因而感到疑惑，於是開始注意到電磁波在對流層傳播特性研究的重要性；而研究結果顯示，電磁波在對流層的傳播與大氣環境的氣壓、水蒸氣壓及溫度等氣象參數有很大的關係。

許多國家的軍事作戰單位亦很早便發現此一現象，並進行相關研究；1961年，蘇聯

由波羅的海常見的电波異常傳播現象得到啟發，開始進行超地平線反艦飛彈射控雷達的研發，當時其發現在某些大氣條件情況下，可以讓波長3公分(X頻)至20公分(S頻)訊號傳輸超越水平線，最遠達400公里(220海哩)。因為發現這樣的特性，研發人員將導管系統整合在一系列火控系統中，發展出一種稱為米列拉爾(Mineral)型的射控雷達系統，並已安裝於中共現代級驅逐艦上，大幅提升中共艦艇之飛彈攻擊能力。(蔡，

2012)[1]。

自1972年起，美國海軍電子實驗室(NELC)，針對美海軍艦上電子戰系統之所需，著手研究大氣與海洋間微觀交互作用，及其對於不同頻率雷達對目標偵測性能所造成之影響，而於1976年，發展出大氣折射效應預報組合系統(IREPS)，並於1978年試用於美海軍企業號航空母艦。自1982年起，IREPS開始大量被使用於各級巡洋艦及驅逐艦上，成為船艦對空防禦系統的配備之一。1982年起，美國約翰霍普金斯大學所屬之應用物理研究實驗室(JHU/APL)，亦投入大量的人力物力，從事海面上大氣導管(Atmospheric Ducts)與電磁波傳播特性的研究(Ko et al., 1983) [2]。1994年更進一步利用電磁波之傳播方程，發展出新一代氣折射效應預報系統(AREPS)，用以模擬不同大氣環境下之電磁波傳播情況。

對於臺灣而言，由於位於副熱帶地區又為海陸交接帶，天氣變化多樣化，低層大氣又深受黑潮暖洋流影響，使大氣環境與大陸型標準大氣有顯著差異。另外每年亦受到許多西北太平洋颱風影響，在低層引進充沛的水氣，但高層仍是下沉運動而產生逆溫現象，易造成電磁波異常傳播路徑導致大氣折射誤差；因此，實有必要發展適用於我國環境之大氣折射效應監控及誤差修正方法，以降低戰場環境對武器系統所造成之影響。

二、理論基礎

2.1 電磁波傳播理論

關於電磁波在對流層的傳播現象，基於1864年Maxwell的電磁理論，吾人可以很清楚地知道，其與介質的介電常數有關，介電常數又與大氣折射指數(Atmospheric Refractive Index, n)有關，而在對流層的大氣折射指數會受到氣壓、水蒸氣壓及溫度等氣象參數之影響，其關係式可表示如下(Balsley, 1980)[3]：

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

其中 P 為大氣壓力(hPa)， e 為大氣中的水汽壓(hPa)， T 為大氣溫度(K)。在實際情況中，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；為了要能夠清楚地觀察到它的擾動情形，於是定義一個新參數，即大氣折射率(Atmospheric Refractivity, N)：

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

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隨空間的變化而影響其傳播路徑，也就是說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。根據司乃耳定律，吾人可以知道電波射線在不同折射指數的介質中傳播，會產生偏折或彎曲，而由射線彎曲的曲率和地球表面曲率的比較結果，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(Sub-refractive)、超折射(Super-refractive)和陷捕(Trapping) (圖一)；其分類標準主要依據大氣折射率梯度而定，茲分述如下：

2.1.1 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。

2.1.2 次折射

這種情形的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。

2.1.3 超折射

如果折射率梯度值介於 -157 至 -79 (N/Km)之間，這種折射就稱為超折射。其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。

2.1.4 陷捕

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，且宛如在導波管傳播，使電波有傳播到更遠處的趨勢，這也就是大氣導管的重要性質。

2.2 K因子及有效地球半徑

為了簡化電波傳播路徑的問題，並考慮地球曲率的影響，可利用有效地球半徑取代實際地球半徑，亦即利用電波路徑對地球之相對曲率，將彎曲的電波路徑簡化為直線幾何路徑。基於上述考量，定義K因子與有效地球半徑之關係式為：

$$R_e = KR \quad (3)$$

其中 R_e 為有效地球半徑， R 為真實地球半徑(黃, 2003) [4]。因此在推估大氣折射誤差前應先計算K因子，其計算方式如下：

$$K \approx \frac{1}{1+R \left(\frac{dn}{dh} \right)} \quad (4)$$

統計結果顯示，K值的大小會隨著季節變化，一般來說，夏季的K值比冬季時為大；而臺灣地區實測資料計算所得之K因子平均值為1.6204，比美國標準值4/3要來的大。

2.3 仰角誤差

在一般情況下，大氣具有水平成層的特性，而大氣折射指數會隨高度增加呈指數型遞減，造成無線電波傳播路徑向下彎折，使

得地面雷達或接收站在接收回波訊號時產生仰角方向上的誤判，此種誤差即稱為仰角誤差(圖二)。若假設水平方向大氣不均勻性很小，且在電波波長內折射指數的變化量很小，則可由球面層司乃耳定律，計算得到電波進入不同大氣折射指數層時的入射角，其計算方式如下(楊, 2013) [5]：

$$\theta_{i+1} = \left[\theta_i^2 + \frac{2(h_{i+1} - h_i)}{h_i + KR} - 2(n_i - n_{i+1}) \right]^{1/2} \quad (5)$$

其中 θ_i 、 n_i 分別為電波進入第i層時的仰角及折射指數， $h_{i+1} - h_i$ 為兩相鄰大氣折射指數分層之高度差。而電波路徑總彎曲角則可表式為(楊, 2013) [5]：

$$\tau = \sum_{i=0}^{i-1} \frac{2(n_i - n_{i+1})}{\tan \theta_i + \tan \theta_{i+1}} \quad (6)$$

將(5)式代入(6)式後，再將兩式計算結果代入下列關係式即可求得仰角誤差(楊, 2013) [5]：

$$\tan \varepsilon = \frac{\cos \tau - \sin \tau \tan \theta_i - \frac{n_i}{n_o}}{\left(\frac{n_i}{n_o} \right) \tan \theta_o - \sin \tau - \tan \theta_i \cos \tau} \quad (7)$$

仰角誤差會隨著大氣環境及仰角而改變，除了大氣環境所造成的季節變化外，當仰角增加時仰角誤差亦將會隨之減少；根據研究結果顯示，電波傳播在仰角10度以下時，仰角誤差不可忽略(Hitney, 1985) [6]。

2.4 路徑延遲

電磁波於中性大氣傳播過程中所產生的延遲量，大致可分為兩部分，其一為電波於大氣中的傳播速度比在真空中慢，因此，實際上傳播時所花費的時間，比在真空中要多，此即為速度延遲；其二為路徑本身之延遲，由於大氣折射指數於空間中的分佈為層狀結構，使得電波傳播產生偏折效應，傳播路徑變長，也增加了電波傳播時間(圖三)。

將上述兩項因素所增加的時間換算成等效距離，即為路徑延遲量(Path Delay) (楊, 2013) [5]：

$$D = C(t - t_0) = \int_L n * dl - G = L - G \quad (8)$$

其中C為真空中的光速， t 與 t_0 分別為電波在中性大氣及真空所需的傳播時間，G為通過中性大氣的直線距離，L為彎曲路徑的長度。若以L路徑上的高度變化描述上式中各物理量之關係，則可表為(楊, 2013) [5]：

$$D = \int_{h_0}^{h_T} (n(h) - 1) * \csc(\theta(h)) * dh \quad (9)$$

其中 $n(h)$ 是指彎曲路徑L上，任意一點位置對應其高度的折射指數， h_0 、 h_T 分別代表雷達及目標物的高度， $\theta(h)$ 為隨高度變化的仰角。

為簡化上述問題，可將大氣視為由許多具有不同折射指數之薄層所組成，則對相鄰兩層間可適用球面層司乃耳定律，因此可將隨高度變化的仰角表式為(楊, 2013) [5]：

$$\theta(h_i) = \cos^{-1} \left[\frac{n(h_0)(R + h_0) \cos \theta(h_0)}{n(h_i)(R + h_i)} \right] \quad (10)$$

其中 h_0 為雷達或接收器高度。利用(9)、(10)兩式代入地面雷達已知參數，經過計算便可得到路徑延遲量。

三、大氣折射效應之監控方式及優劣分析

由上述理論基礎可知，若欲計算仰角誤差、路徑延遲等大氣折射誤差量，以評估大氣折射效應對電波傳播之影響，必須先得到大氣折射指數在高度上的變化量，亦即折射指數剖面。以下就現行可用來進行大氣折射效應監控之方法，分別分析其優劣及條件限制。

3.1 探空氣球法

在氣象學上，利用氣球將探測儀器探測儀器攜帶升空，進行高空氣象參數觀測的方法，又稱為雷文送探測(Rawinsonde) (圖四)。雷文送探測主要用於探測離地面至30公里或以上各大氣層之溫度、濕度和氣壓，並以無線電信號將所觀測到的紀錄傳送到地面接收站。因此，吾人便可藉由量測得的大氣壓力、溫度及濕度等氣象因子，代入(1)、(2)式計算得到大氣折射指數或折射率剖面。

以德國GRAW探空裝備為例，其具有GPS(全球衛星定位系統)探空儀及地面接收站，每秒鐘接收一筆資料，垂直高度解析度約5公尺，接收距離可達40公里，可提供高解析度探空資料，該資料有助於更清楚了解大氣環境垂直變化情形。

3.1.1 優勢分析

利用雷文送探測可得到即時且空間解析度高之大氣折射率剖面，且其機動性高，可移動到欲觀測的地點進行大氣折射效應監控，是最能反應真實大氣狀況的方法之一。

3.1.2 劣勢分析

每個探測儀僅能使用一次，且高解析探空儀耗費甚鉅，要進行長時間大量連續的觀測機率不高，通常僅於特殊天氣系統或特定演訓任務中施放；另外，氣球上升到高層大氣後，受到高層風速增強影響，往往隨風飄移遠離原始施放地點，是否真能代表單一點位大氣折射率剖面仍有待商榷。

3.2 經驗方程式法

由於在標準大氣情況下，大氣折射率隨高度增加而呈現指數型遞減，因此，一些學者指出，大氣折射率剖面可用指數模型來表示，此模式可表示如下(Beane and Thayer, 1959) [7]：

$$N(h) = N_s * \exp(-k \cdot h) \quad (11)$$

其中 N_0 表示模型的地面折射率， k 表示指數常數。藉由實際觀測資料求得之 N 值與 h 值，再利用迴歸法和最小平方方法將 N_0 值與 k 值求出，即可得到模型的折射率剖面。統計結果顯示，臺灣地區冬季（12~2月）之 k 值約為0.000136，而夏季（6~8月）約為0.000165（黃2003）， N_0 值約為340~395（隨季節變化），由圖五可看出大氣折射率剖面於夏、冬兩季之差異。

3.2.1 優勢分析

利用經驗方程式法可快速得到大氣折射率剖面，且成本相當低，非常適合用來作為當天氣惡劣無法施放探空氣球時之替代方案。

3.2.2 劣勢分析

指數模型之 N_0 值與 k 值是經過長期統計所得到的結果，僅能代表大範圍之大氣折射率特性，無法真實反應各不同地理環境條件下之大氣折射率剖面，且僅適用於標準大氣條件下，若大氣中發生逆溫層或颶風等特殊現象，將無法真實反應大氣折射率剖面之變化。

3.3 電波掩星法

由於一般探空站都設在陸地上，利用探空氣球法獲得大氣折射率剖面還是有區域上的限制，對於佔地球較大部分的海洋來說，探空資料就相當的缺乏並難以大量取得。有鑑於此，科學家發展出一種新的技術來得到大氣參數與折射率等資料，此種技術稱為電波掩星法(Radio Occultation)。電波掩星法的原理是利用GPS衛星發出電波訊號，此電波在傳播的過程中經過大氣層或是電離層，因為折射率的緣故而產生偏折後被低軌道衛星(LEO)所接收，之後就可藉由此電波偏折的角度來反演出大氣折射率隨高度的分佈情形(圖六)。由Maxwell's方程式經過推導後，可以得到射線偏折角與大氣折射率剖面之關係式(Kursinski et al.2000)[8]:

$$n(\bar{r}) = n_0 * e^{-\frac{1}{\alpha} \int \left(\frac{a'(a')}{\sqrt{a'^2 - a_0^2}} \right) da'} \quad (12)$$

其中 $a' = nr$ (圖七)。透過上式吾人便可利用射線偏折的角度來求出折射率剖面，此即為電波掩星法的原理。

以德國CHAMP衛星為例，其軌道位於距離地球450公里之高度上，搭載有GPS的接收器，主要任務為測定地球的重力場和磁場，以及藉由接收GPS訊號推算大氣的探空資料。為了驗證利用電波掩星法所反演之折射率剖面的準確性，在此將CHAMP衛星所反演之折射率剖面資料，與東港和板橋探空站之探空資料所計算得到之折射率剖面做比較，同時利用經驗方程式之指數模型來進行配湊，資料的時間是從2001年至2002年，數量一共80筆。由於CHAMP衛星資料的位置分佈區域很廣，因此為了增加驗證的準確度，在此挑出了14筆較接近東港和板橋探空站的資料，資料所在的位置如圖八所示。

經過比較後結果如圖九所示，從圖中可以看到，在高度較低的區域探空資料得到的折射率擾動比較大，與CHAMP衛星資料的差異性也比較大，而在高度較高的區域折射率幾乎沒有什麼擾動，大致上呈現指數性遞減的規律分佈，兩者的差異性也相對的小很多；而在指數模型的配湊方面，也顯示在高度較高的區域配湊的結果要比在高度較低的區域來的好，同時在高度較低的區域指數模型與探空資料配湊的結果，要比CHAMP衛星資料來的好，而在高度較高的區域兩者配湊的結果都不錯。

為了進一步比較CHAMP衛星資料與探空資料在不同高度折射率之差異，在此先將CHAMP衛星資料中不同高度的折射率，利用內插法(Interpolation Method)將之內插到與探空資料相同高度，之後兩者相減，即可得

到在不同高度的折射率差值(圖十)。由圖中可以明顯發現到，不管是與東港探空資料還是板橋探空資料做比較，其折射率差值分佈都是在低層的區域較大，高層的差異較小。此結果顯示利用電波掩星法所反演的折射率，在低層(5公里以下)與實際的差異較大，準確性較低；而在高層(5公里以上)與實際的差異較小，準確性較高(蔡，2004)[9]。

3.3.1 優勢分析

利用電波掩星法所得到的大氣折射率剖面的資料點分佈幾乎是全球性的，可涵蓋地面探空測站無法觀測到的海洋區域，且每個GPS衛星在每天大約可以得到六百餘筆的資料，衛星越多資料就越多，其資料的數量及密度皆遠比探空資料要來的大，有助於分析全球的大氣參數及折射率的分佈，及進行海洋上大氣折射效應之監控。

3.3.2 劣勢分析

由上述驗證結果可知，利用電波掩星法反演之大氣折射率資料在低層較沒有明顯擾動的情形，但實際上大氣在較低的對流層常常會有一些天氣變化而造成大氣折射指數的不規則擾動，但此方法所反演的折射率就無法反映出這樣的一個現象；且其準確率在5公里以下較低，並非適用於大氣中所有各層高度。

四、大氣折射誤差之修正

由前述理論基礎可知，大氣折射誤差產生的原因，是由於大氣折射率在高度方向上的變化，造成電波在傳播過程中之偏折現象，導致仰角誤差及路徑延遲。若欲進行大氣折射誤差修正，需先藉由上節所述大氣折射效應監控方法，獲得折射指數高度剖面，進而計算 K 因子、路徑延遲量及仰角誤差量，其資料處理流程如圖十一所示。以下分別就仰角誤差及路徑延遲進行模擬，並探討不同情況下大氣折射誤差修正之必要性。

4.1 仰角誤差模擬

利用前述指數模型統計得到之臺灣地區冬、夏兩季大氣折射指數參數，代入(7)式後，可進行不同仰角對應的仰角誤差與目標物直線距離之模擬(圖十二)。其中，不同顏色代表不同仰角，實線虛線分別表示夏、冬之仰角誤差結果。由圖中可知，若目標物距離固定，仰角越低所對應的仰角誤差越大，且仰角誤差之季節差異性在低仰角時較為明顯，在高仰角的情況下則差異不大。由模擬結果可知，當觀測仰角小於10~15度時，其仰角誤差必須納入考慮並修正。

4.2 路徑延遲模擬

同樣利用前述指數模型統計得到之臺灣地區夏季大氣折射指數參數，代入(9)、(10)式後，可進行不同仰角對應的路徑延遲與目標物直線距離之模擬(圖十三)。由圖中可知，若目標物距離固定，路徑延遲同樣具有在低仰角時誤差量較大之特性；舉例來說，當目標物距離為50公里，觀測仰角為1度時，路徑延遲約為20公尺，當觀測仰角為10度時，路徑延遲減少為10公尺。由模擬結果可知，當觀測仰角小於10度時，其路徑延遲量在10公尺以上，故應納入考慮並加以修正。

五、未來精進方向及建議

由上述分析結果可知，各種大氣折射效應監控方法均有其優缺點及條件限制，而大氣折射誤差(仰角誤差、路徑延遲)在低仰角觀測的情況下亦有其修正之必要。因此，如何在複雜的戰場環境中，依地理環境條件、武器設備限制及有限經費資源，選擇合適之大氣折射效應監控方式並據以進行大氣折射誤差修正，使雷達及電波遙測定位設備精確度提升，將成為影響作戰成敗的關鍵因素。以下就未來我國軍可精進之方向，提出幾點建言：

5.1 結合數值模式資料進行大氣折射效應預報

針對特定區域採用氣象數值模式進行天氣預報與大氣環境模型建立，是補足傳統氣象觀測資料於時間與空間不足之有效方法，尤其以氣象模式輸出資料所建立之大氣環境，可以建立不同面向之氣象資訊。以區域波譜數值天氣預報模式為例，其可針對特定區域進行氣象參數預測，進而計算得到大氣折射率剖面，以評估並預測電磁波於大氣中之傳播路徑可能變化情形，儘管模式預報資料不可能百分之百正確，但其資料仍有一定之參考價值，尤其針對特定區域之短期預報精確度相當高。結合數值天氣預報模式資料，即可模擬臺灣周邊地區電磁波傳播狀況(圖十四)，此資訊將有助於戰場指揮官決心的下達以及狀況的適當處置。

5.2 利用微波輻射儀評估濕延遲對電波傳播之影響

由影響大氣折射指數的變因來看，可分為乾空氣與濕空氣所造成之折射變化，亦即大氣總路徑延遲量是由乾延遲(Dry Delay)與溼延遲(Wet Delay)所組成，其關係式可表示如下(施，2002) [10]：

$$D_{\text{total}} = \int N_d dl + \int N_w dl \quad (13)$$

其中 N_d 、 N_w 分別代表乾空氣、溼空氣的折射率。上式等號右邊第二項即為溼延遲量，溼延遲為大氣層水汽對傳播路徑的影響，導致電磁波傳播與在自由空間傳播時比較有延遲的現象。

由於臺灣位於亞熱帶地區且四面環海，氣候特徵為高溫潮濕，電磁波傳播會有較大的濕延遲，因此在進行大氣折射誤差修正時應將其納入考量。經長期統計結果顯示，臺灣地區溼延遲量平均值約為23cm，最大的溼延遲量發生在夏季，最小的發生在冬季(施，

2002) [10]。

微波輻射儀是一種對測量從具有溫度的物體所發出的微波輻射有高度敏感的接收器，可用來量測觀測路徑上的水汽、降雨及液態水含量等參數，且具有極高時間解析度，有利於即時濕延遲的監測。由於微波輻射儀所觀測的輻射強度，對於水汽的放射有很高的靈敏度，因此，觀測的亮度溫度(T_b)應該與由探空資料所計算的溼延遲量有一定之相關性。在地面無降雨情況下，由19.5 GHz輻射儀所觀測的亮度溫度和其對應之濕延遲關係圖(圖十五)，可以看出觀測的亮度溫度與濕延遲量大致呈現正相關；藉由最小平方方法，便可得到其迴歸方程式。若能建立臺灣各地區之微波輻射儀觀測網，對於大氣濕延遲之評估將更為精確。

5.3 藉由長期觀測建立臺灣地區折射效應預警機制

大氣折射效應可藉由長期觀測及彙整統計天氣系統特性後，配合氣象預報模式建立完整之資料庫預警機制，並結合國軍現正積極建置之C4ISR相關系統平台，透過數據資料鏈路傳送，供戰場武器設備操作人員及指揮官參考，俾有效提供更正確、迅速之決策支援。

六、結論

現代武器裝備日益精良，而戰場環境是影響武器裝備效能重要因素之一，但戰場情況瞬息萬變，故唯有能掌握天氣、運用天氣者，方能於戰時獲致決定性戰果。近年來，中共積極發展各項具遠距離作戰能力之電戰設備，其目的就是為了有效掌握我方情資，以具長程偵蒐能力之雷達搭配各項武器裝備進行遠距離攻擊，企圖瓦解我軍防衛戰力。面對中共持續擴充軍備及遠程攻擊武器的威脅，我國軍唯有持續加強對大氣環境參數之掌握，發展精進數值天氣預報模式，深入研

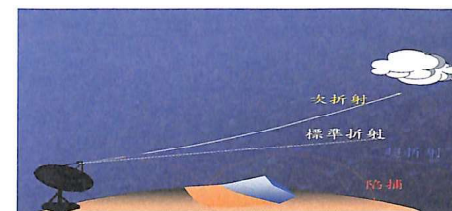
究各項武器裝備與環境適應性之關聯，積極發展適用於臺灣地區之大氣折射效應預警平台，以提升雷達偵蒐效能搭配各項武器裝備進行遠距離監控，方能建構更完善之雷達預警網，有效提升防空作戰能量。如此才能以可恃戰力，達成我「有效嚇阻，防衛固守」之戰略目標，確保國家安全。

七、參考文獻

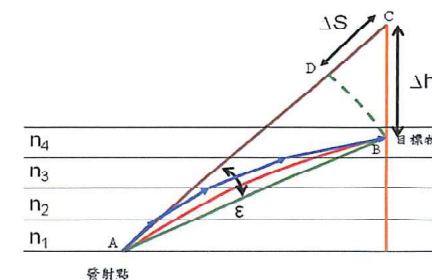
1. 蔡世樵, "海洋上大氣環境對海軍防空作戰之影響", 海軍學術雙月刊, 第四十六卷, 第五期, 第47-57頁, 2012。
2. Ko, H. W., J. W. Sari and J. P. Skura, "Anomalous Microwave Propagation Through Atmospheric Ducts," Johns Hopkins APL Tech. Dig., Vol. 4, No. 1 pp. 12-26, 1983.
3. Balsley, B. B., and K. S. Gage, "The MST Radar Technique: Potential for Middle Atmospheric Studies," P Appl Geophys., Vol. 118, pp. 452-493, 1980.
4. 黃胤年, "電波傳播與天線", 五南圖書出版股份有限公司, 2003。
5. 楊國峰, "大氣折射誤差之影響與修正方法之研究", 新新季刊, 第四十六一卷, 第二期, 第151-157頁, 2013。
6. Hitney H. V., J. H. Richter, R. A. Pappert, K. D. Anderson, and G. B. Baumgartner, "Tropospheric radio propagation assessment," Proc. IEEE Vol. 73, No. 2, 1985.
7. Bean, B. R., and G. D. Thayer, "On models of the atmospheric refractive index," Proc. IRE 47, No. 5, pp. 740-755, 1959.
8. Kursinski, E. R., G. A. Hajj, S. S. Leroy, and B. Herman, "The GPS radio occultation technique," TAO., 11, No. 1, 53-114, 2000.
9. 蔡世樵, "臺灣地區蒸發導管之特性研究", 中央大學太空科學研究所, 2004。
10. 施順鵬, "臺灣地區 Ka 波段大氣傳播通道之研究", 中央大學太空科學研究所,

2002。

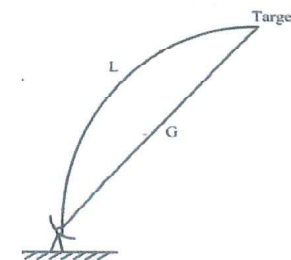
八、圖表彙整



圖一 大氣折射效應示意圖



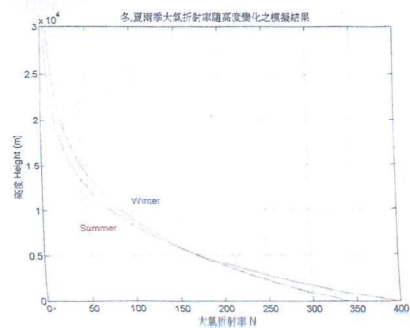
圖二 仰角誤差示意圖(綠色實線為發射點至目標物之直線距離、紅色實線為發射點至目標物之4/3地球曲率路徑、藍色實線為發射點至目標物之電磁波實際傳播路徑、棕色實線為發射點沿電磁波實際傳播路徑之切線方向延伸的直線)



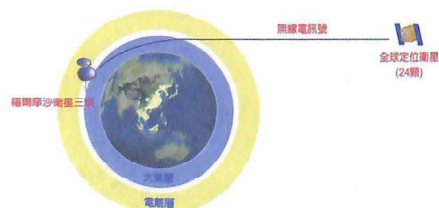
圖三 路徑延遲示意圖(摘自楊, 2013)



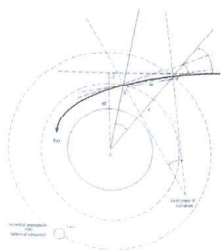
圖四 雷文送(Rawinsonde)高空探測儀



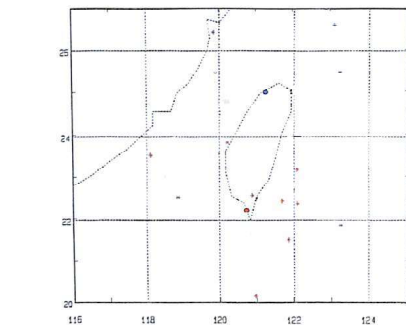
圖五 大氣折射率高度剖面季節變化模擬圖 (摘自楊, 2013)



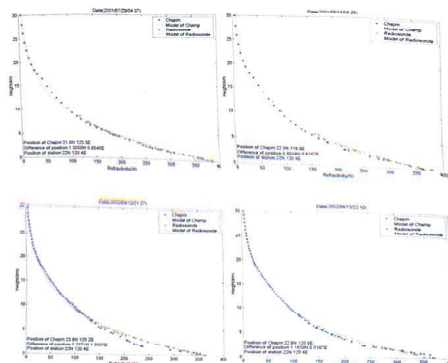
圖六 「電波掩星法」原理示意圖



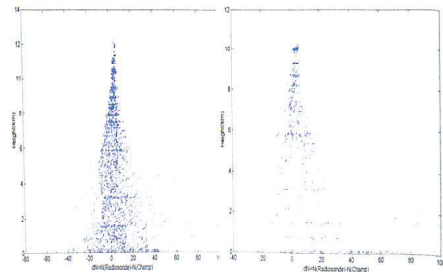
圖七 電波射線軌跡圖 (摘自蔡, 2004)



圖八 CHAMP衛星資料位置示意圖 (摘自蔡, 2004)

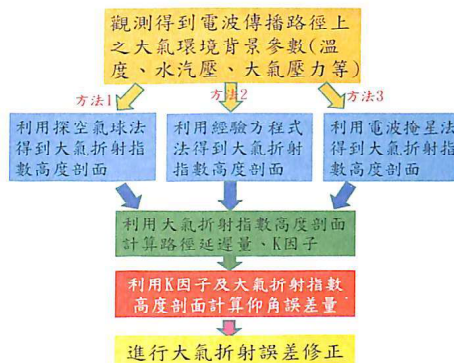


圖九 2001年6月18日、7月29日, 2002年4月12、13日CHAMP衛星與東港探空資料折射率比較與指數模型剖面圖 (摘自蔡, 2004)

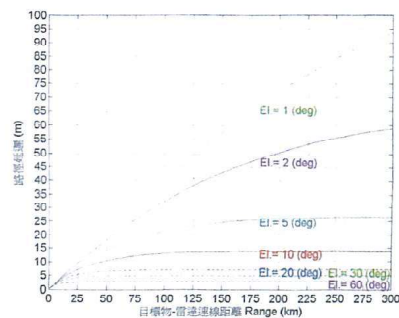


圖十 探空資料與CHAMP衛星資料之折射率差值隨高度之分佈圖：左為板橋探空

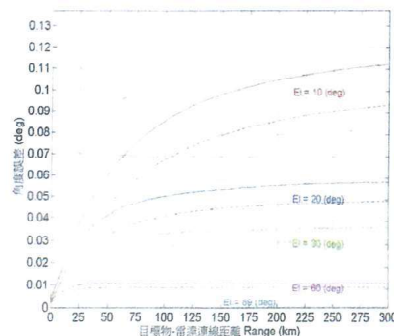
站；右為東港探空站 (摘自蔡, 2004)



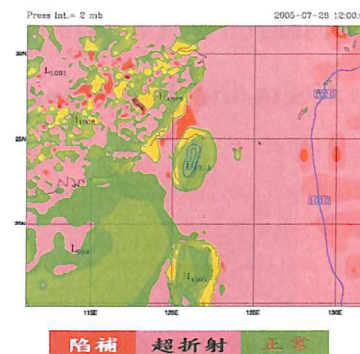
圖十一 大氣折射誤差修正流程圖



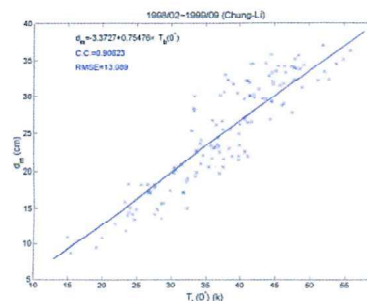
圖十二 目標物距離與不同仰角之仰角誤差變化關係圖 (摘自楊, 2013)



圖十三 路徑延遲隨目標物距離變化關係圖 (摘自楊, 2013)



圖十四 臺灣地區地面大氣折射效應模擬圖



圖十五 地面無降雨情況下, 溼延遲量與19.5 GHz 天頂亮度溫度的散布圖 (摘自施, 2002)

Research of The Monitoring of Atmospheric Refractive Effects and The Error Correction Method at Battlefield Environment

Shih-Chiao Tsai¹ Kuo-Feng Yang² Yen-Hsyang Chu³

¹ Environmental Information and Engineering,
CCIT, National Defense University

² Chung-Shan Institute of Science and Technology, Armaments Bureau, M.N.D.

³ Graduate Institute of Space Science,
NCU, National Central University

Abstract

When electromagnetic wave propagation in the troposphere, it will be influenced by spatial variation of the atmospheric refractive index, and the atmospheric refractive index in the troposphere are dependent on pressure, water vapor and temperature. Therefore, the propagation path of electromagnetic wave in the troposphere will be affected by weather and climate factors which led to deflected. Generally, the refractive effects can be divided into four categories: standard, sub-refractive, super-refractive and trapping. Because different atmosphere environment will make different effects of wave refraction, and produce the atmospheric refractive error which include of the elevation angle error and the path delay, affect the detection performance of RADAR and make misjudgment of radio telemetry equipment. So, If we can monitor the changes of atmospheric refraction index at battlefield environment effectively, and use it to correct the atmospheric refractive error, we can improve the accuracy of weapons equipment, and increase the odds of success fighting. This study analysis the advantages and disadvantages of each method which use to monitor atmospheric refractive index profile, such as radiosonde, empirical equation and radio occultation. Also use the method of atmospheric refractive error correction to simulate the elevation angle error and path delay in different conditions, to explore the necessity of atmospheric refractive error correction.

Keywords: atmospheric refractive index, sub-refractive, super-refractive, trapping, elevation angle error, path delay, radio occultation.