

電離層臨界頻率變化影響 高頻通信頻率選用之研究

海軍中校 李健鵬

提 要：

我國國軍對於高頻無線電波於長距離通訊的需求甚大，而國防長距離通信亦不能全部仰賴通信衛星，因而有必要對高頻無線電波通訊做更有效的使用與管理。本研究運用國立中央大學太空及遙測中心電離層實驗室於2002年建立的中壢站動態式電離層觀測儀，以主動脈衝波遙測臺灣上空電離層，自動判讀觀測資料得到2008年至2011年每日電離層F2層臨界頻率數值，藉以分析電離層臨界頻率變化現象，依其變化現象探討較佳的頻率選用作業方式。

關鍵詞：高頻通信，動態式電離層探測儀，電離層，臨界頻率。

壹、前言

中共在2007年1月11日運用陸基中程攔截彈道飛彈，摧毀了一枚在地表上空865公里低軌氣象衛星，此測試行動足以代表中共已具備攻擊「低軌道衛星」之能力。理論上，此次測試意味中國大陸此後可以擊中任何低軌道衛星，其中包含通信衛星，同時亦證實低軌道衛星極其脆弱，代表對國防的間接威脅，中共「反衛星」武器將可依任務需求，針對各國低軌軍事衛星進行攻擊以奪取制天權，戰時勢將影響我國國軍通信能量之發揮。由上述可知國軍遠距離通信不能全然仰賴衛星，我們必須對「高頻通信」做更有效的運用與頻譜管理，以避免戰時受制於敵，影響遠距作戰指通力。

高頻通信主要是利用電離層反射，或在電離層與地面之間的多次反射而達到接收點的一種遠距離通信方式，一次電離層反射可遠達到4,000公里，假設在理想的傳播條件下，經多次反射後即可達全球通信傳播，可見高頻通信所能產生之通信效益，實不遜於衛星通信，且相較於衛星通信昂貴的建置成本，高頻通信可運用簡單且成本低廉的收發機設備，即可達到遠距離傳播之目的。故在可用的無線電頻譜資源中，高頻通信實佔有一席相當重要的地位，而基於高頻頻段天波傳播特性的原因，因此特別適用於遠距離的通信以及國際的廣播業務。

國家通信傳播委員會(NCC)為我國通信與傳播服務監管機關，負責規劃、協調及調整全國頻率分配運用，審查並核發無線電臺

許可執照，更進一步負責電波監測作業及電波干擾處理之業務，以提升頻率資源使用效率及通信秩序。而國軍單位依「軍事無線電頻率管制分配及干擾處理規定」規範，在投資建案或戰訓任務有使用新增頻率之需求時，用頻單位必須依需求擬定「頻率運用計畫」，依行政程序呈報至國防部通次室審核，再轉發NCC複審核配後，再由國防部逐級令頒申請之頻率，用頻單位始得合法使用相關頻率，一般頻率申請作業程序所需時間往往超過一個月。由上可見，頻率在申請初期必須審慎規劃、完成評估，以妥善運用有限的頻譜資源。

國軍目前尚未成熟發展國人自主高頻通信選頻專用工具及電離層高頻通信最大可用頻率的預報程式，頻管官或通信幹部在選用次月或次季高頻通信頻率時，方法多數採用「經驗模式」，依據單位奉核分配之既有頻率及長年作業累積之經驗傳承，挑選次月或次季所需運用之頻率，無科學理論基礎可確保預選的頻率可用。雖然如此，海軍自民國97年起，積極推動學術合作委託研究案，在國防科技發展委員會（簡稱國科會）及財團法人國防工業發展基金會研究經費的支持補助下，分別委託國立中央大學太空科學研究所及太遙中心之研究團隊，運用福爾摩沙三號衛星及動態式電離層探測儀進行電離層的各項參數變化研究，更進一步投入國內首見之高頻通信頻率預報技術的開發工作，使我國軍的電離層與高頻通信領域得以持續發展。

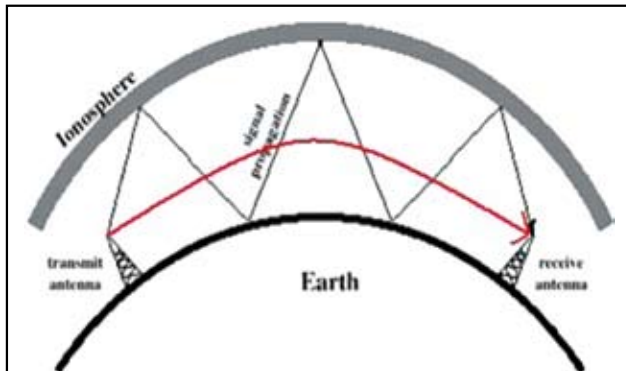
本研究係運用國立中央大學太空及遙

測中心電離層實驗室於中壢校區（中壢站）及花蓮東華大學校區（花蓮站）所建置之「動態式電離層探測儀」系統觀測電離層變化，蒐整該系統自2008年起至2011年每日探測電離層所得F2層臨界頻率（foF2）參數資料，據以研究並分析在不同週期之電離層臨界頻率變化現象，並對照美國國家海洋及大氣管理局（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）所觀測發布之太陽黑子數，就相對變化現象予以探討驗證，期提供一個較符合國軍高頻通信頻率選換作業之建議。

貳、電離層傳播概論

高頻（High Frequency）電波的傳播模式，一般區分為天波傳播（Sky Wave Propagation）與地波傳播（Ground Wave Propagation）兩種模式（如圖一），其中紅色線為地波傳播路徑，黑色線為天波傳播路徑）。對於傳播距離超過50公里以上的高頻通信而言，由於地波傳播的電場衰減造成信號強度減弱，無法有效達成通信目的，故此時將以利用電離層（Ionosphere）反射的天波傳播為主。高頻電波在天波傳播的過程中，可被電離層與地面多次反射而仍維持一定訊號強度，所以能比其他無線電波頻段傳播得更遠¹。由於無線電波極化現象，在傳播的過程中，電波會因途中介質的電子影響而產生折射，直至發射頻率與電漿頻率相等時，訊號全反射使得地面得以接收到回波，達到通信之目的。「電離層」為高頻天波傳播關鍵因素，

註1：陳明煌，〈臺灣第二代動態式電離層探測儀之建置與資料處理〉，國立中央大學太空科學研究所碩士論文，2010年。



圖一 高頻無線電傳播方式示意圖

資料來源：陳明煌，〈臺灣第二代動態式電離層探測儀之建置與資料處理〉，國立中央大學太空科學研究所碩士論文，2010年7月。

其中可造成電波反射之「臨界頻率」即是代表電離層可反射以「垂直」方式入射電波的最大頻率，應用在不同天線型式電波發射角度，則會產生不同的最大可用頻率限制，此頻率會因在不同的時間、地點而會有不同的變化。

一、臨界頻率

由地面向上空垂直發射高頻電波時，在發射頻率低時電波由電離層反射回地面，如逐漸提高發射頻率則到某一頻率後，電波「射穿」電離層逸向太空，不再反射回來，對這垂直射入電波不再反射之界限頻率稱為「臨界頻率(Critical Frequency, 簡稱 f_o)」。由於電離層中的每一副層游離電子密度不同，造成其可反射的信號頻率並不相同，且將電波以「垂直入射」方式向上發射至電離層反射後，電波實際到達接收地點會離發射地點很近，將無法達成遠距離的通信目的。

因此為了達到遠距離通信之目的，必須將天線設計成可傾斜發射電波，使高頻電波

在發射時是以「斜向」的方式入射到電離層，將發射頻率控制在其電離層臨界頻率範圍內，電波才可以反射並到達較遠距離之接收站。在一特定的高頻通信路徑上，天線所需傾斜的角度大小及最佳的操作頻率受到許多的因素影響，像反射的電離層高度及地面距離等²。

二、最大可用頻率

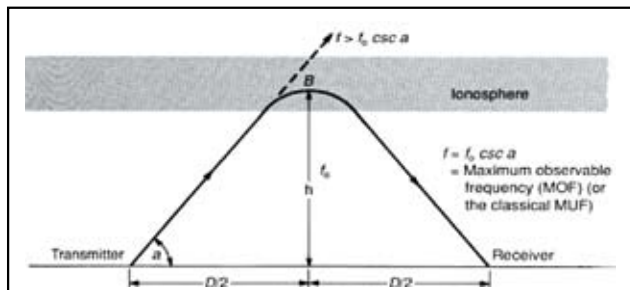
通信人員僅知道電離層臨界頻率是無法達到遠距離通信之要求，必須進一步知悉天線發射仰角(依天線型式不同而有不同的電波發射仰角)、電波反射點之電離層臨界頻率等參數，再以反射點之電離層臨界頻率乘上天線發射仰角(Take-Off-Angle)之三角函數值，以求得所謂「最大可用頻率」(Maximum Usable Frequency, MUF)，作為高頻天波傳播頻率選用範圍上限。一般為了提高通信穩定度及通達率，電波頻率會使用以MUF的80%至90%之間的頻率當作實際的使用頻率，稱作最佳使用頻率(Frequency of Optimum Traffic, FOT)。

最大可用頻率是在特定且已知的通信條件下，高頻電波能夠透過電離層反射的最大操作頻率。以圖二為例，假設在基本通信條件均為已知(如站台位置、發射機天線型式、通信時間等)，取收發兩端距離之中點為反射點B，在B點電離層臨界頻率 f_o 為10MHz，發射天線發射仰角 α 為 30° ，則可求得在此通信條件下發射機最大可用頻率為：

$$MUF = 10\text{MHz} * \csc 30^\circ = 20\text{MHz}$$

由圖二中計算式我們須特別注意二件事

註2：邱漂鴻，〈短波通訊預測模式之發展與優化〉，國立中山大學電機工程研究所碩士論文，2001年。



圖二 入射頻率與MUF之示意圖

資料來源：邱景鴻，〈短波通訊預測模式之發展與優化〉，國立中山大學電機工程研究所碩士論文，2001年6月。

，其一為依三角函數值表餘割函數數值均大於或等於1，故可推知在正常通信模式下 $MUF \geq f_o$ ；其二為高頻通信機發射功率的大小並不會影響到最大可用頻率的計算，只有天線發射仰角和操作頻率之改變，才會決定電波是否穿透電離層或被電離層反射回地面接收點。這與我們所知的特高頻(VHF)及超高頻(UHF)通信觀念大不相同，在高頻天波傳輸模式下，即使加大發射功率，也無法改變最大可用頻率的大小及有效增加通信傳輸之距離。

三、最低可用頻率

最低可用頻率(Lowest Usable Frequency, LUF)定義為接收端的信號電場強度對雜訊比(SNR)等於我們要求的值時，所能使用的最低頻率。當使用的頻率低於最低可用頻率時，信號對雜訊比的值會低於可接受的值，提高頻率時，信號對雜訊比就可獲得改善，最佳的操作情況是發生在使用頻率接近最大可用頻率時，此時的信號對雜訊比及可靠度都可達到最大³。

因發射端使用的功率、發射和接收天線的增益與指向性、電波傳播路徑長度、使用的調變方法及接收端的雜訊高低等等都會影響到接收的場強值大小，故最低可用頻率相當於是信號對雜訊比的邊界值所對應的頻率。電離層吸收所產生的訊號強度損失量，與高頻電波的頻率成反比。頻率越高，電離層的吸收效應亦越大。因此一旦某頻率的電波電場強度計算出後，便可以根據接收機系統所設定的所能接收到的最低訊號強度，來決定最低可用頻率。而LUF之估算必須針對特定之電台，依據個別的條件做個別的估算。簡言之，在高頻天波傳播中有一個最低可用頻率之限制，低於這個頻率，就會因為電離層對電波的吸收作用太大而無法工作。

最低可用頻率的選擇與發射機功率、發射天線增益、接收天線增益、電離層之吸收、電波傳播之衰減量、接收地點環境雜訊強度均有關係，所以是人為可以控制的，但是最大可用頻率由電離層(自然環境)變化而決定，無法藉由人為控制。但是因其原理及計算複雜度較高，在國軍通信作業實務面，往往將最低可用頻率忽略不予探討。

四、電離層結構

電離層產生原因為太陽紫外光照射，使得大氣層氣體游離而產生電子，不同的紫外光照射量及大氣層不同的氣體種類及密度，造成了電子密度呈現「層狀」分布，因此稱之為「電離層⁴」。電離層電子密度的大小，會直接影響到高頻電波進行天波傳播時所

註3：同註2，頁8。

註4：同註2，頁2。



能反射的頻率，在大氣層的頂端太陽輻射最強，空氣分子幾乎百分之百游離，但該處空氣稀薄，故電子密度不高。而靠近地面的大氣層，因大多數輻射能量已被中層大氣吸收，所能產生游離電子的密度也不多，因此中間高度的電離層電子密度為最大。然而因空氣由多種氣體分子組成，再加上陽光輻射光線內含有多種頻率，造成至少3個不同密度而分別具有峰值強度的區域，一般而言，電離層依照不同的電子濃度與高度，大致上又可分為D層、E層與F層，以下簡要介紹每一層的特性：

(一)D層

其範圍約在距地球表面高度65到100km之間，為電離層的最低層，基本上只有在白天的時候存在，在日落後，游離電子會快速的「復合」(Recombination)，使D層因此消失。D層屬電離層底層，因大氣分子密度高之緣故，產生較大的電子碰撞頻率，使得入射電波信號的能量往往直接被其電子吸收，故無法以垂直入射的方法量測其特性。以高頻通信傳播的觀點來看，D層相當於是個「信號衰減器」，高頻電波信號能量的吸收主要由D層所造成，且入射頻率越低越容易被吸收。故由上述特性可知，D層僅可提供白天高頻通信運用，且僅適合高頻頻段中頻率較高的電波(較不易被吸收)通信使用，其穩定性不足，不利於軍事高頻通信運用。

(二)E層

其範圍約在距地球表面高度100km到125km之間，其電子游離現象係由太陽的X射線及遠紫外線輻射所造成，最主要發生在白

天，但是因E層中存在有多種複雜的游離機制，故在夜晚時亦不會完全消失。E層的電子密度會隨著地區緯度、季節及太陽活動情形的不同而產生明顯變化，複雜的游離機制亦使得E層穩定性及效果均不佳，同樣地不利於軍事高頻通信運用。

(三)偶發性E層(Es)

約在距地球表面高度100km處存在，因Es層不像其他固定的電離層會在較規律及穩定的時間發生，考量其對高頻通信無較具體的影響，在實質通信運用方面亦無效益，故不將Es層列入探討範圍。

(四)F層

F層為電離層的最上層，對於高頻天波傳播(長距離傳播)而言是相當重要的，在白天此層可分為F1和F2層，而夜間F1層消失，由F2層持續提供高頻通信的機制。F1層約在距地球表面高度150km到250km之間，F2層則從F1層頂端開始，在冬天時最高，此時距地球表面的高度約有500km。F2層的高度最高，利用此層來反射的電波，通信距離則可達到最遠。

1. F1層：其電子密度略低於F2層，會隨日落後的快速電子復合影響，使得F1層在夜晚會消失。其特性為在白天時能提供較低的高頻頻率傳播使用，而其最大電子游離現象會發生在接近中午的時候。

2. F2層：其存在於白天及夜晚，在夜晚時F2層距地球表面的高度約為250km到420km，因為其電子復合率相當的低，故在日落後能一直存在並提供夜晚傳播的機制，可以提供幾乎全天的高頻天波通信傳播運用。故對

軍事高頻通信運用而言，F2層為最重要的傳播區域，而F2層可反射電波臨界頻率(簡稱foF2)的變化，即為本研究之重點。

五、電離層變化

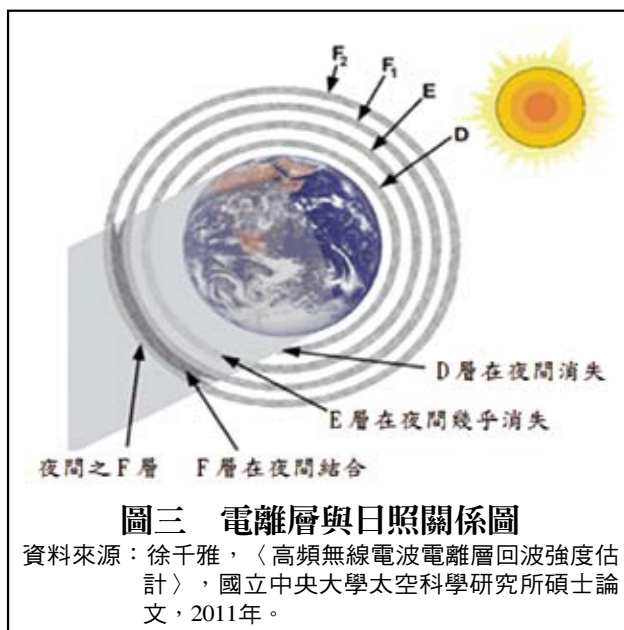
由於電離層的存在和太陽輻射息息相關，只要地球與太陽相對位置改變(亦即地球公轉及自轉現象)即會影響電離層電子密度的變動，而直接造成了電離層各層臨界頻率之變化，對高頻通信具有非常重要之影響；另地震、颱風、季節異常、赤道異常及太陽磁暴等自然因素均會造成電離層電子密度異常變化之影響，學界亦有從事相關研究之論文發表，考量上述現象屬特殊現象，除發生機率較低亦無規律週期性可言，故以下僅針對電離層較基本的變化的理論作一大致之介紹。

(一) 日夜變化

日夜的電離層變化主要是由地球自轉所造成。因自轉的日夜變化使得紫外線輻射照射大氣層的程度有所不同，造成在白天的電子游離程度高，而夜晚時電子游離程度低。對於D、E及F1層而言，游離的電子密度會由日出前的為最低值，到中午時為最大值，而後又因電子復合現象慢慢減少至日落，在夜晚時即已幾乎無法作用(如圖三)。對F2層而言，由於夜晚電子復合率低，使得較其他層可存在更長的時間，而成了重要的日間及夜晚傳播機制。

(二) 季節變化

季節的電離層變化最主要就是由地球公轉造成。對於E和F1層而言，在夏天的游離電子會較強；而對F2層來說，在冬天時，太陽較接近地球，使得白天游離程度很強，但



也因夜晚的時間較長，使得其游離電子數目降到很低。故以相對比較性方式論述可知，夏天F2層臨界頻率低於冬天的頻率值，而冬天夜晚的F2層臨界頻率低於夏天夜晚的頻率值。

(三) 地域變化

全世界各地區在緯度上的不同即為電離層在地域變化最主要的原因。由於太陽直射赤道地區，使得大氣游離程度會高於高緯度地區，換言之，電離層各層的電子密度明顯地由太陽直射與否決定，於赤道地區太陽輻射最強，故電子密度最高，其臨界頻率亦為最高，而往南北極方向則是逐步遞減。

(四) 太陽活動性變化

太陽活動性的強弱，直接影響到太陽的紫外線和X射線輻射以及粒子輻射(亦即太陽風)強度的高低，這些輻射是造成電離層自由電子產生的主要機制。涉及太陽活動性的關鍵因素為「太陽黑子(Sunspot)」，



其數量循環變化週期為11年，此一週期性之變化為影響電離層臨界頻率變化最重要的因子，隨著太陽活動性的變化，太陽黑子數(Sunspot Number, 簡稱為SSN)的數量亦相對有明顯的增減。在太陽擾動最劇烈時，太陽黑子數亦達到最高峰，而太陽活動性趨於平靜時，太陽黑子數亦隨之減少。當太陽黑子數達到高峰時，其電離層臨界頻率甚至大於太陽黑子數最低時頻率的2倍以上，故太陽的活動情形是電離層變化研究中必須考慮的重要因素。

參、電離層探測技術研析

本文中所使用的動態式電離層探測儀(Dynasonde)研發，由美國國家海洋暨大氣局(NOAA)的太空環境實驗室(Space Environment Laboratory, 現改稱為Space Weather Prediction Center, SWPC)，其測量精準度高，適合做長期電離層觀測學術研究。配合現今的數位科技，動態式電離層探測儀也有了進一步發展，重新設計了雷達硬體設施，利用數位收發機技術，設計了第二代動態式電離層探測儀，其性能已大幅提升⁵。

一、動態式電離層探測儀原理

所謂動態式電離層探測儀(Dynasonde)這個名稱是取其具有量測電離層動態(Dynamics)的能力所制定。其探測原理與雷達原理相近，係運用其控制系統設定操作模式為「主動式觀測模式」後，由發射機元件作用產生一連串連續的中高頻頻段無線電脈波

，再經由「寬頻天線」將其不同頻率之脈波持續發射至電離層，頻率超過臨界頻率之電波即穿出電離層，無法反射，而未超過電離層各層臨界頻率值之脈波，將被電離層反射回來。此時，電離層探測儀的4至8組接收機則接收從電離層反射之回波訊號，經由類比數位轉換介面將原始類比訊號取樣、量化、壓縮、編碼轉換成數位訊號，取樣並傳給資料處理系統，進一步分析回波資訊換算成電離層參數後，再以系統自動判讀程式，將觀測所得之電離層參數以電離圖(Ionogram)的形式呈現，動態式電離層探測儀電離層觀測原理(如圖四)。

二、系統特性

我們由圖四可知動態式電離層探測儀系統是由五個區塊之設備所組成，其接收及發射是使用不同之天線，各區塊設備功能概述如下：

(一) 電腦

探測儀系統之控制核心，內含控制程式、數位訊號處理卡及資料儲存設備，主要作回波訊號後端數位處理及分析，並可用來控制發射機及接收機工作模式。

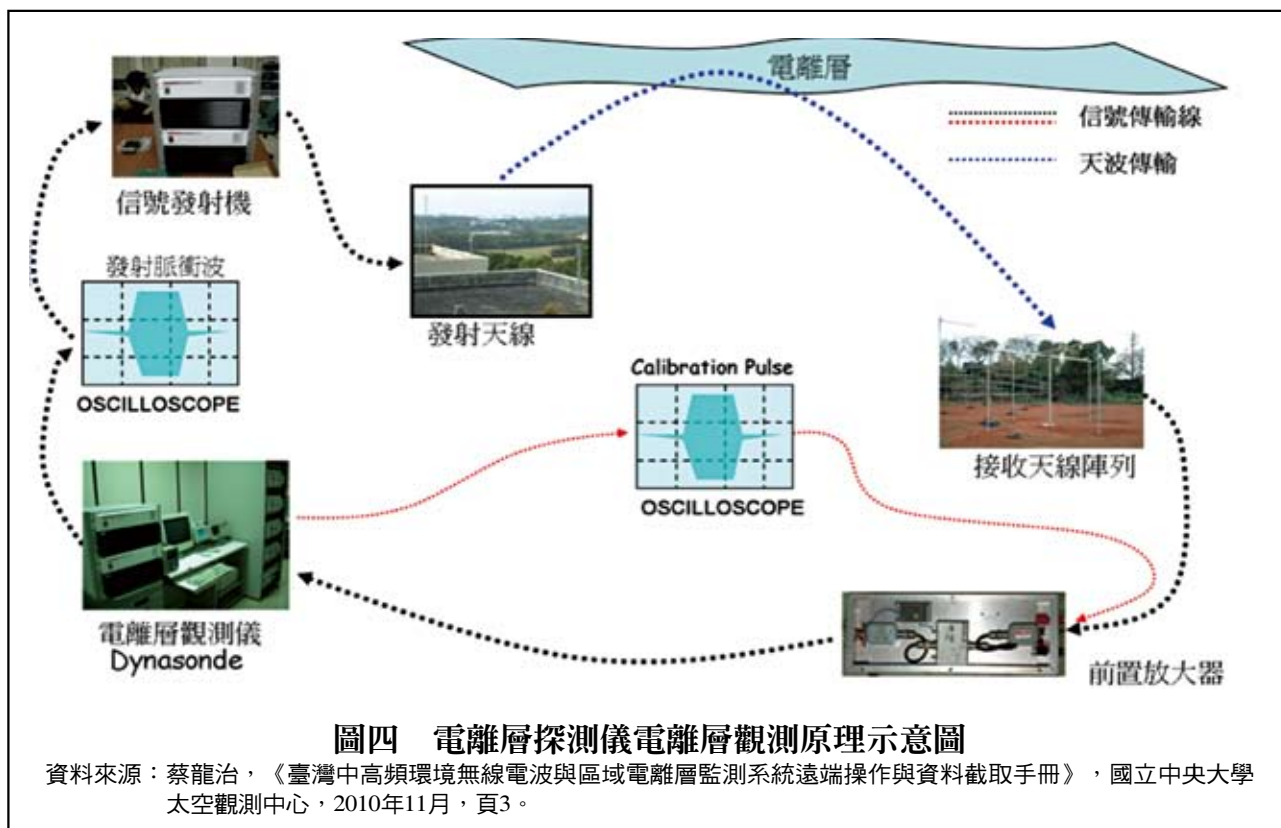
(二) 發射機

在系統設定在「主動式觀測模式」下，會產生一連串連續的中高頻無線電脈波，搭配功率放大器及發射天線，發射脈衝波至電離層，而在「被動式觀測模式」下則是保持靜默，不發射信號。

(三) 發射天線

本系統所使用之發射天線為「寬頻摺疊

註5：同註1。



偶極天線」(Broadband Folded Dipole Antenna)，屬於行進波天線的一種，天線長90呎，操作頻率1.8MHz~54MHz，在高頻範圍內不需要使用天線調諧器，符合電離層探測儀的「寬頻」特性，可同時將發射機發射不同頻率的高頻脈衝波傳播出去。

(四) 接收天線

本系統所使用之接收天線為「主動偶極陣列天線」，主動天線(Active Antenna)是由天線與前置放大器所組成，用來接收訊號，前置放大器的設計是在訊號經過傳輸線時，先調整訊雜比(SNR)，以避免訊號受到干擾或損耗。

(五) 接收機

系統在「主動式觀測模式」下，接收機

主要是接收發射機打出去的脈衝波經電離層反射回來的脈波回波訊號；而在「被動式觀測模式」時，僅接收周遭環境中游離之高頻率電波，可作高頻頻段環境電波的監測。

動態式電離層探測儀系統除了測量傳統的回波信號強度及飛行時間之外，也可以測量回波極化值、回波角度與位置及都卜勒值。綜合而言，動態式電離層觀測系統優點包含：

1. 自動化觀測，含主動(發射脈衝波)與被動(不發射脈衝波)操作模式。
2. 數位化觀測頻率選定與信號分析。
3. 觀測頻率解析度高達5kHz，能於2分鐘觀測3,000個電波頻率。
4. 觀測無線電波強度靈敏度高。



5. 觀測信號取樣時間間隔小至1微秒。

系統細部特性簡單介紹如下：

1. 4組接收機(中壢站)或8組接收機(花蓮站)。

2. 操作頻率範圍：0.2~30 MHz。

3. 最小接收信號強度： ≤ 0.4 mvolts (~ -120 dBm)。

4. 瞬間最大發射信號強度：18KW(中壢站)或4 KW(花蓮站)。

5. 類比數位信號轉換精敏度：16位元。

三、自動判讀功能

電離層觀測儀在正常操作模式下，可設定15分鐘作一次主、被動模式電離層掃描工作排程，每一次掃描均會產生1張「數位電離圖」，平均1日產生96張、1年至少產生35,040張數位電離圖資料，經年累月下來累積了相當多的資料，將電離圖上的電離層參數找出來的工作即為判讀。過去判讀電離層的工作是以人工進行，極度耗費人力，因此研究團隊運用電腦技術來輔助判讀作業，運用自動化程式處理這些電離圖，解讀出我們所需的電離層參數，故發展出自動判讀系統以取代人力判讀電離圖。

自動判讀的優點在於節省人力並提供即時的電離層資訊，電離層參數自動判讀資訊處理將電離層參數自動判讀過後的資料資訊截取出來，整理成圖表方便觀察，藉由處理接收下來的資料，增加資料可讀性。目前亦可將整天的資料經過處理後產生當天的foF2頻率曲線圖，之後可自動產生置放於網頁上，提供通信作業參考。另系統可讀取電離層

參數資料，繪製出電離圖上F2層臨界頻率(foF2)與最小頻率(Fmin)曲線圖，即分別可得知臺灣地區MUF與LUF⁶。有關技術面之系統程式設計在本研究不予探討，係直接運用此技術簡化資料蒐集之作業時間。

四、遠端控制平台

海軍通信系統指揮部自民國97至99年以國科會學術合作計畫預算，委託中央大學太空及遙測中心研究團隊運用動態式電離層觀測儀執行主、被動模式觀測工作，獲得了每日電離層及中高頻電波環境各項參數資料，並據以建立了「中高頻頻帶背景資料庫」，資料庫資料種類包含：

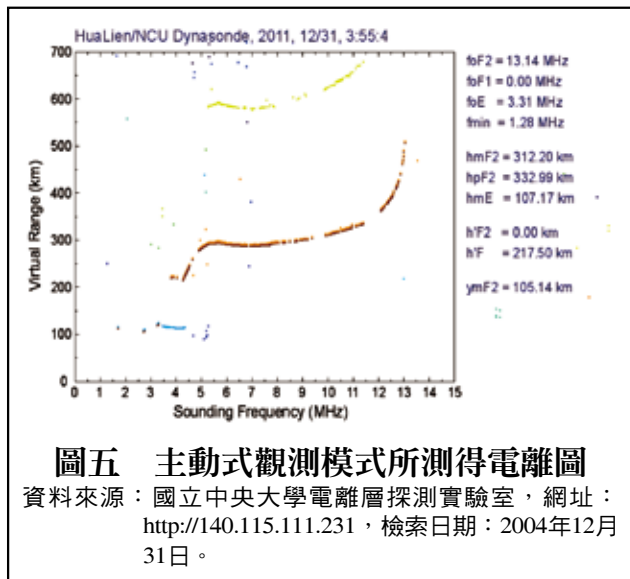
1. 中高頻通信環境電離層電離圖：每15分鐘產生一張。

2. 電離層參數自動判讀：每15分鐘判讀1組高頻通信最高可用頻率(MUF)與最低可用頻率(LUF)。

3. 中高頻無線電波環境監測結果：利用被動觀測模式，全天候24小時連續監測中高頻段背景訊號。

研究團隊亦依委託單位使用需求建置了「遠端控制平台」。目前遠端控制平台係以網頁介面方式架設，依使用、管理權限不同賦予用戶不同權限帳號，不需另外加裝作業軟體及程式，可以進行遠端設定，也能進行指定頻率的主動式掃頻及被動式掃頻模式工作，以便於系統管理。此平台可分別提供位於中壢站以及花蓮站兩處的動態電離層探測儀的觀測結果，兩站的資料皆包含主動掃頻模式與被動掃頻模式。

註6：蔡龍治，《臺灣中高頻環境無線電波與區域電離層監測系統遠端操作與資料截取手冊》，2010年。



本研究即以登入遠端控制平台操作獲得2008年1月起至2011年12月止，每日以「主動掃頻模式」觀測電離層所獲得之電離層foF2參數做為探討依據(如圖五)，資料優先以中壢站觀測電離圖參數為主要研究使用數值資料，如資料有不足或品質不佳無法使用時，則以花蓮站觀測電離圖參數為輔助參考資料。

肆、資料分析與處理

一、foF2實測值可信度

為了瞭解動態式電離層探測儀(以下簡稱Dynasonde)觀測所得之F2層臨界頻率實測值的可信度，我們規劃隨機挑選30筆運用Dynasonde在2010及2011年所測得foF2實測值，與「國家通訊傳播委員會電離層觀測站」在同時間所發布電離層圖資做比較。

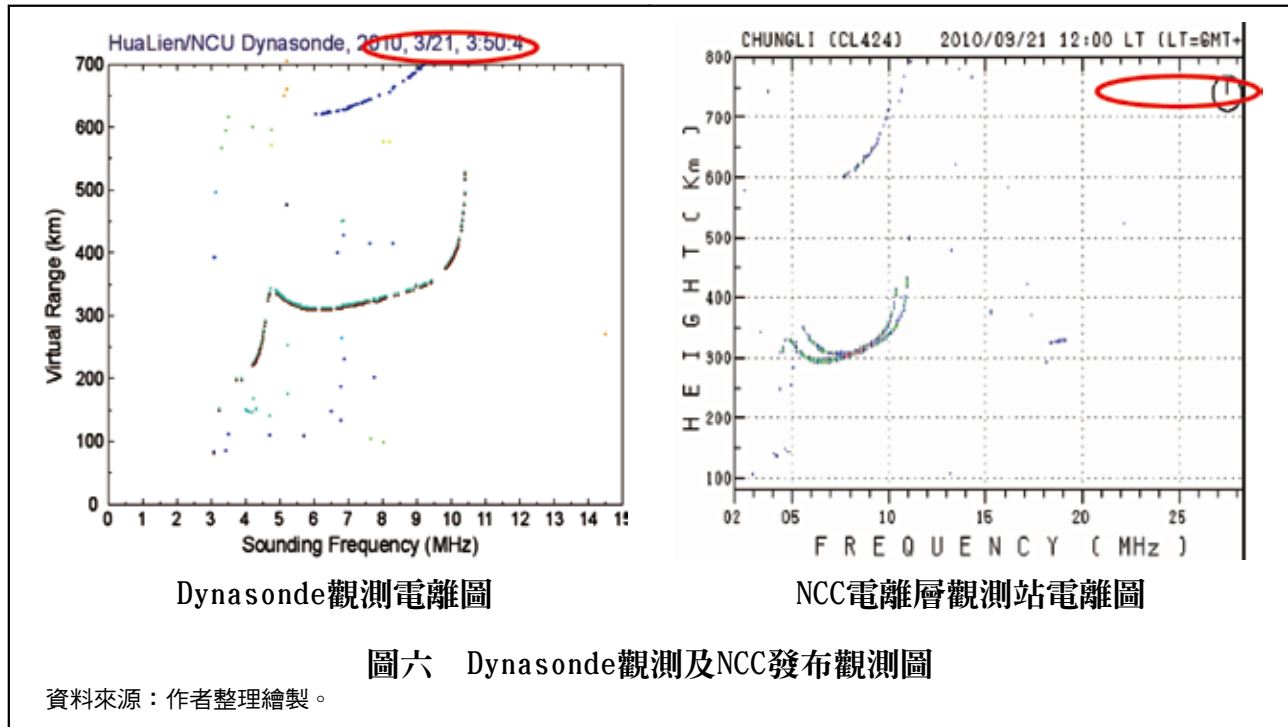
步驟一「獲取Dynasonde觀測foF2實測值」。以電離層實驗室所賦予之使用者帳號登入Dynasonde探測儀遠端控制平台網頁，

選取以「中壢站主動觀測模式」進入系統，分次設定30筆不同歷史觀測時間，即可在系統資料庫中獲得30筆原始觀測電離圖，再依圖擷取其由系統自動判讀之foF2數值。

步驟二「獲取NCC電離層觀測站foF2實測值」。在進入國家通訊傳播委員會電離層觀測網站，申請使用者帳號並登入後，輸入欲查詢日期、時間及圖別，即可獲得所要之歷史「電離層圖(Ionogram)」，再依電離層圖擷取正常回波之F2層臨界頻率。在輸入查詢條件後，我們依其電離層圖可獲得2012年2月14日12時的F2層臨界頻率值(foF2)為9.4MHz(如圖六紅圈處)，即可與Dynasonde在同一時間所測得之數值做一差異比較。

步驟三「觀測值差異值比對」。依上述兩步驟分別獲得同時間條件下，運用不同電離觀測系統所得之foF2觀測值，藉由兩系統數值之差異比對，確認動態式電離層探測儀觀測資料之可信度。在這裡定義兩者實測值之間的差異值，我們利用了兩種差異估計的方式，第一種為「相對均方根差異(the relative RMS difference)」，另一種為「相對平均差異(the relative mean difference)」。均方根差異係將差異值平方後，取平均再開根號，可以了解相對平均的差異值為多少(MHz)；而相對平均差異則是表示各實測值差異程度之百分比(%)。其兩者表示式如下：

$$\text{相對均方根差異(the relative rms difference)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}{n}} \quad (1)$$



相對平均差異 (the relative mean difference) =
$$\sum_{i=1}^n \frac{|a_i - b_i|}{b_i} \times 100\% \quad (2)$$

其中n為比較的總數， a_i 為Dynasonde之foF2量測值、 b_i 為NCC發布foF2觀測值。

故依上述公式我們可計算Dynasonde之foF2量測值對照NCC發布foF2觀測值之「相對均方根差異值」為0.29MHz，而「相對平均差異比」為2.6%，表示運用Dynasonde量測所得之foF2值具有相當好的可信度。

二、Dynasonde實測foF2蒐集分析

驗證了Dynasonde實測foF2值之可信度後，即開始著手蒐集Dynasonde自2008年1月1日起至2011年12月31日止之電離層F2層臨界頻率值(foF2)觀測資料，經由彙整4年完整的電離層觀測資料並進行不同週期之foF2數值變化分析，期能說明及掌握電離層臨界

頻率具週期性之變化現象。

在登入Dynasonde探測儀遠端控制平台網頁後，選取以「中壢站主動觀測模式」進入系統，分次設定自2008年1月1日起至2011年12月31日止每日臺灣本地時間12時及24時之觀測時間，合計輸入1,460日之12時及24時觀測需求，即可獲得由Dynasonde系統判讀輸出之觀測電離圖共計2,920張圖資，再依每一張電離圖內自動判讀之各項參數中，以人工方式擷取其由系統自動判讀之foF2數值做為資料分析依據，在完成了2008年1月1日起至2011年12月31日止每日臺灣本地時間12時及24時之電離層F2層臨界頻率值(foF2)數值資料彙整後，即可依實測值逐項探討各種變化差異。

(一) 日夜變化分析

為瞭解電離層F2層臨界頻率值實際之日

表一 2008至2011年日夜foF2變化值敘述統計

年度	資料數	變化範圍 (MHz)	最小變化值 (MHz)	最大變化值 (MHz)	平均值 (MHz)	標準差 (MHz)
2008年	365	9.22	0.46	9.68	4.4528	1.80586
2009年	365	5.20	2.12	7.32	4.2911	0.76475
2010年	365	5.23	1.77	7.00	4.2055	0.98450
2011年	365	6.81	0.46	7.27	3.5777	1.07427

資料來源：作者研究整理。

夜變化值，所以將手上現有4年的每日12時(日間)與24時(夜間)之foF2值做為差異探討之依據，直接將同日的兩個值相減，即可獲得當日之差異值(即變化值)，依此類推則可獲得4年的每日日夜變化值。經計算每日變化值(12時觀測值減去24時觀測值)結果，統計2008年起至2011年止每日的foF2差異值均為「正值」，印證了「日間foF2比夜間foF2數值為大」之理論。再進一步將每日差異計算資料匯入PASW Statistics 18.0.0版執行敘述統計之分析，會得到各年度的變化值範圍、最小值、最大值、平均值、標準差等敘述統計資料(如表一)。

以2008年為例說明，該年日夜差異變化最小值為0.46MHz、最大值為9.68MHz，差異值範圍高達9.22MHz，其變化範圍約已包括高頻頻段三分之一頻寬，足見foF2值日夜變化是非常大的。由表一可看出日夜變化範圍值以2008年9.22MHz為最大，其依變化範圍數值大小排序為2011年6.81MHz、2010年5.23MHz及2009年5.20MHz，由表一數值可知每年均有發生變化範圍值大於5MHz之現象。

而我們再將2008年日夜變化值重新分組並定義變數名稱，將365筆foF2日夜變化值取1MHz為每組組距範圍，共區分10組(0～

9.9MHz)，求得日夜變化值分布狀況。經統計變化值分布現象，變化值以3至3.99MHz之組距範圍間發生91次(天)為最多(眾數)，我們遂以3MHz為區分，統計2008年至2011年變化值分布在3MHz(不含)以下共計247次(天)，而於3MHz(含)以上至10MHz之間的變化值計達1213次(天)，可知在4年間平均每日日夜foF2值變化幅度在3MHz以下發生之機率為16.9%，4年平均每日日夜foF2值變化幅度在3MHz以上發生之機率為83.1%。綜觀2008至2011年各年度日夜變化幅度達3MHz以上之機率皆在70%以上，甚至可達到90%之可能性，已可明確驗證電離層F2層臨界頻率日夜變化之顯著性。

(二)週變化分析

將4年每日12時及24時的foF2數值，依序自每年之1月1日起，分別以每7日為1組求其「週平均值」，如此可求得每年53週之12時及24時的foF2數值「週平均值」，再將相鄰2週平均值相減(次週平均值減去本週平均值)，藉以比較其週變化現象，且考量其變化值有正負值之差異，就探討變化現象而言，平均值計算如以算術平均數方式將使正負值相互抵消而無實質變化之意義，故取變化值之絕對值作計算基準，各年度的週變化值

表二 2008至2011年每週foF2變化值敘述統計

年度	類別	變化範圍 (MHz)	最小變化值 (MHz)	最大變化值 (MHz)	平均值 (MHz)	標準差 (MHz)
2008年	週變化(日)	1. 6586	0. 0029	1. 6614	0. 5635	0. 3857
	週變化(夜)	1. 3071	0. 0043	1. 3114	0. 5475	0. 5327
2009年	週變化(日)	1. 2671	0. 0129	1. 2800	0. 4184	0. 3189
	週變化(夜)	1. 0300	0. 0029	1. 0329	0. 3025	0. 2264
2010年	週變化(日)	1. 2143	0. 0014	1. 2157	0. 3586	0. 3068
	週變化(夜)	1. 2500	0. 0057	1. 2557	0. 4086	0. 3173
2011年	週變化(日)	1. 1986	0. 0114	1. 2100	0. 3870	0. 3014
	週變化(夜)	1. 4557	0. 0357	1. 4914	0. 5752	0. 3746

資料來源：作者研究整理。

表三 2008至2011年每月foF2變化值敘述統計

年度	類別	變化範圍 (MHz)	最小變化值 (MHz)	最大變化值 (MHz)	平均值 (MHz)	標準差 (MHz)
2008年	月變化(日)	1. 9177	0. 1030	2. 0206	1. 0886	0. 6503
	月變化(夜)	1. 3878	0. 0613	1. 4491	0. 7011	0. 4672
2009年	月變化(日)	1. 2049	0. 0228	1. 2276	0. 6673	0. 4414
	月變化(夜)	1. 3797	0. 0263	1. 4060	0. 4112	0. 4273
2010年	月變化(日)	1. 9773	0. 2015	2. 1788	0. 9453	0. 5418
	月變化(夜)	1. 4993	0. 0848	1. 5842	0. 7318	0. 4503
2011年	月變化(日)	1. 3623	0. 3852	1. 7475	1. 0015	0. 4582
	月變化(夜)	1. 3581	0. 2339	1. 5919	0. 8998	0. 4649

資料來源：作者研究整理。

範圍、最小值、最大值、平均值、標準差等敘述統計資料(如表二)。

經統計4年之週變化現象，每週12時(日間)foF2平均值變化最小變化值為0. 0014MHz、最大變化值為1. 6614MHz，週變化平均值介於0. 35至0. 57MHz之間；每週24時(夜間)foF2平均值變化最小變化值為0. 0029MHz、最大變化值為1. 4914MHz，週變化平均值介於0. 30至0. 58MHz之間。

再進一步計算4年週變化值分布現象，統計總數204次(如以日夜分計則為408次)變化值分布在0. 5MHz以下計有136次(日間)及

131次(夜間)為最多、發生率占65. 4%，其次為變化值介於0. 5MHz至1. 0MHz之間計有49次(日間)及52次(夜間)、發生率占24. 8%，而變化值在1. 0MHz至1. 9MHz之間僅有19次(日間)及21次(夜間)、發生率僅占9. 8%。故由上可推知，在相鄰兩週之foF2值變化現象與前述之日夜變化現象相比較不顯著，仍有發生1. 5MHz以上變化值之可能性。

(三)月變化分析

與週變化計算方式相同，將4年每日12時及24時的foF2數值，依序以每月為1組求其「月平均值」，如此可求得每年12月之12

Product: Daily Solar Data 2011_DSD.txt
 Issued: 1900 UT 03 Jan 2011
 Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Weather Prediction Center
 Please send comments and suggestions to SWPC.Websmaster@noaa.gov

2011 Daily Solar Data

Date	Radio Flux 10.7cm	SESC Sunspot Number	Sunspot Area 10E-6 Hemis.	New Regions	Stanford Solar Mean Field	GOES15 X-Ray Bksgd Flux	X-Ray C	X-Ray M	X-Ray X	Flares S	Optical 1	Optical 2	Optical 3
2011 01 01	91	65	350	2	-999	B1.0	0	0	0	1	0	0	0
2011 01 02	91	38	260	0	-999	A8.8	0	0	0	0	0	0	0
2011 01 03	92	51	320	0	-999	A8.7	1	0	0	1	0	0	0
2011 01 04	91	54	360	0	-999	B1.0	1	0	0	0	0	0	0
2011 01 05	88	50	250	0	-999	A8.4	0	0	0	0	0	0	0
2011 01 06	87	28	230	0	-999	A7.4	0	0	0	0	0	0	0
2011 01 07	86	52	170	1	-999	A7.7	0	0	0	0	0	0	0
2011 01 08	85	52	180	0	-999	A7.2	0	0	0	0	0	0	0
2011 01 09	83	50	150	2	-999	A7.2	0	0	0	0	0	0	0
2011 01 10	83	35	140	1	-999	A7.2	0	0	0	0	0	0	0
2011 01 11	83	26	130	0	-999	A6.5	0	0	0	0	0	0	0
2011 01 12	80	23	80	0	-999	A6.8	0	0	0	0	0	0	0
2011 01 13	80	14	10	0	-999	A7.3	0	0	0	0	0	0	0
2011 01 14	79	11	0	0	-999	A9.3	2	0	0	0	0	0	0
2011 01 15	80	11	120	1	-999	B1.0	1	0	0	0	0	0	0
2011 01 16	80	15	120	0	-999	A7.3	0	0	0	0	0	0	0
2011 01 17	82	36	170	1	-999	A9.0	0	0	0	0	0	0	0
2011 01 18	81	34	190	0	-999	A5.7	0	0	0	0	0	0	0
2011 01 19	81	28	140	0	-999	A5.7	0	0	0	0	0	0	0
2011 01 20	82	28	190	0	-999	A5.8	0	0	0	0	0	0	0
2011 01 21	88	42	160	1	-999	B1.1	7	0	0	3	0	0	0
2011 01 22	88	36	240	0	-999	B1.0	1	0	0	0	0	0	0
2011 01 23	84	38	260	0	-999	A7.7	0	0	0	0	0	0	0
2011 01 24	83	28	270	0	-999	A6.4	1	0	0	0	0	0	0
2011 01 25	81	27	230	0	-999	A5.7	0	0	0	0	0	0	0
2011 01 26	80	25	400	0	-999	A6.1	0	0	0	1	0	0	0
2011 01 27	81	0	0	0	-999	A7.2	2	0	0	0	0	0	0

圖七 NOAA發布每日太陽活動參數表

資料來源：NOAA網站，網址http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old_indices.html，檢索日期：2011年1月27日。

時及24時的foF2數值「月平均值」，再將相鄰2月平均值相減(次月平均值減去本月平均值)，藉以比較其月變化現象，各年度的月變化值範圍、最小值、最大值、平均值、標準差等敘述統計資料(如表三)。

經統計4年之月變化現象，每月12時(日間)foF2平均值變化最小變化值為0.0228MHz、最大變化值為2.1788MHz，月變化平均值介於0.66至1.09MHz之間；每月24時(夜間)foF2平均值變化最小變化值為0.0263MHz、最大變化值為1.5919MHz，月變化平均值介於0.41至0.90MHz之間。

計算4年月變化值分布現象，統計總數44次(如以日夜分計則為88次)變化值分布在1.0MHz以下計有24次(日間)及32次(夜間)為最多、發生率占63.6%，其次為變化值介於1.0MHz至2.0MHz之間計有18次(日間)及

12次(夜間)、發生率占34.1%，而變化值在2.0MHz以上僅有2次(日間)及0次(夜間)、發生率僅占2.3%。故由上可推知，在相鄰兩個月之foF2值平均變化現象比週變化現象幅度大於1MHz較為明顯，且有發生2.1MHz以上變化值之可能性發生，而其發生時即將造成通信之負面影響。

三、太陽活動變化分析

太陽活動性(Solar Activity)有大約11年週期的變動，隨著太陽活動性的變化，太陽黑子數(Sunspot Number, SSN)的數量亦相對有明顯的增加或減少，亦直接影響到太陽的紫外線和X射線輻射以及粒子輻射強度的高低，而這些輻射是造成電離層自由電子產生的主要機制。根據上述太陽活動性與電離層自由電子密度之間的關係，進而探討分析太陽黑子數、輻射量與臨界頻率的關係。

表四 太陽活動性因素與每日臨界頻率相關分析表

		輻射通量	太陽黑子數	每日12時foF2	每日24時foF2
輻射通量	Pearson 相關	1	.831**	.689**	.596**
	顯著性 (雙尾)		.000	.000	.000
	個數	365	365	365	365
太陽黑子數	Pearson 相關	.831**	1	.536**	.473**
	顯著性 (雙尾)	.000		.000	.000
	個數	365	365	365	365
每日12時foF2	Pearson 相關	.689**	.536**	1	.773**
	顯著性 (雙尾)	.000	.000		.000
	個數	365	365	365	365
每日24時foF2	Pearson 相關	.596**	.473**	.773**	1
	顯著性 (雙尾)	.000	.000	.000	
	個數	365	365	365	365

**在顯著水準為0.01時(雙尾)，相關顯著。

資料來源：作者研究整理。

為達蒐集每日觀測太陽活動參數之目的，可至「美國國家海洋及大氣管理局(NOAA)」蒐集該局所觀測發布之每日太陽活動參數(Daily Solar Data)(如圖七)，擷取表內全年每日輻射量(如圖紅框處)及太陽黑子數(如圖藍框處)參數，以做為對應前一節所蒐集整理之動態式電離層探測儀在同一日觀測所得之foF2數值分析比較之用。

在完成太陽活動性資料蒐集後，我們初步假設「太陽活動性因素與每日臨界頻率無關」，針對「輻射量」、「太陽黑子數」、「每日12時及24時的foF2數值」執行複相關分析(如表四)，說明如下。

(一) 輻射通量與太陽黑子數

因同屬太陽活動性之參數，經檢定結果相關係數0.831，其後之兩個星號(**)表示於 $\alpha=0.01$ 之顯著水準下兩者顯著相關，其下之顯著性為 $0.000 < \alpha = 0.05$ ，棄卻兩者無關之虛無假設，接受兩者顯著正相關。表示

輻射通量與太陽黑子數間存有極高度之正相關，輻射通量會隨太陽黑子數增加而明顯增加。

(二) 輻射通量與每日12時foF2

經檢定結果相關係數0.689，其下之顯著性為 $0.000 < \alpha = 0.05$ ，棄卻兩者無關之虛無假設，接受兩者顯著正相關。輻射通量與每日12時foF2間存有中度之正相關，輻射通量增加則每日12時foF2數值亦隨之增加。

(三) 輻射通量與每日24時foF2

經檢定結果相關係數0.596，其下之顯著性為 $0.000 < \alpha = 0.05$ ，棄卻兩者無關之虛無假設，接受兩者顯著正相關，輻射通量與每日24時foF2間存有中度之正相關，輻射通量增加則每日24時foF2數值亦隨之增加。

(四) 太陽黑子數與每日12時foF2

經檢定結果相關係數0.536，其下之顯著性為 $0.000 < \alpha = 0.05$ ，棄卻兩者無關之虛無假設，接受兩者顯著正相關，太陽黑子數

表五 迴歸模式摘要表

模式	R	R平方	調過後的 R 平方	估計的 標準誤	變更統計量					Durbin- Watson 檢定
					R平方 改變量	F改變	df1	df2	顯著性 F改變	
1	0.689	0.474	0.473	1.21251	0.474	327.752	1	363	0.000	0.158

資料來源：作者研究整理。

表六 迴歸係數表

模式		未標準化係數		標準化係數	t	顯著性	共線性統計量	
		B 之估計值	標準誤差	Beta 分配			允差	VIF
1	(常數)	5.280	0.296		17.868	0.000		
	輻射量	0.046	0.003	0.689	18.104	0.000	1.000	1.000

資料來源：作者研究整理。

與每日12時foF2間存有中度之正相關，太陽黑子數增加則每日12時foF2數值亦隨之增加。

(五) 太陽黑子數與每日24時foF2

經檢定結果相關係數0.473，其下之顯著性為 $0.000 < \alpha = 0.05$ ，棄卻兩者無關之虛無假設，接受兩者顯著正相關。太陽黑子數與每日24時foF2間存有中度之正相關，太陽黑子數增加則每日12時foF2數值亦隨之增加。

將太陽黑子數固定下來後，求其偏相關，可以發現「輻射通量」與「每日12時foF2」同樣為顯著正相關(相關係數0.518、顯著性 $0.000 < \alpha = 0.05$)、「輻射通量」與「每日24時foF2」同樣為顯著正相關(相關係數0.415、顯著性 $0.000 < \alpha = 0.05$)，相關顯著性無改變，藉以驗證相關分析結論具正確性。

四、預測迴歸分析

在完成上述「相關分析」後，我們可以明確得到太陽活動性與電離層F2層臨界頻率呈現顯著之正相關之結論，接著嘗試以「迴歸分析」探討太陽活動性對電離層臨界頻率的影響，並建立一個較佳的迴歸方程式。首

先探討日間影響程度，定義自變項為「輻射量」及「太陽黑子數」，依變項為「每日12時foF2」，採用「逐步多元迴歸分析」，在「輻射量」及「太陽黑子數」2個自變項中，找出對「每日12時foF2」(依變項)最具預測力的自變項，以建構一個較佳的迴歸分析模式。

由「模式摘要」表(如表五)可看出僅「輻射量」一個自變項進入迴歸模式中，而「太陽黑子數」未達顯著被排除於迴歸模式之外。故在模式1中，我們可獲得「輻射量」多元相關係數R為0.689，其解釋量R²可達47.4%，增加變異量顯著性考驗的F值為327.752，顯著性機率值 $p = 0.000 < 0.05$ 已達到顯著水準。由F值達到顯著可檢定此迴歸模式達到統計上之顯著性，意即進入迴歸方程式自變項「輻射量」之迴歸係數不等於0。

表六為迴歸模式的「迴歸常數」及「迴歸係數」的顯著性考驗，非標準化之「常數」為5.280、「迴歸係數」為0.046，其顯著性機率值 $p = 0.000 < 0.05$ 均達到顯著水準，且



係數值為正值，表示輻射量對每日12時foF2值之影響均為正向。故可得迴歸方程式如下：

$$\text{每日12時foF2} = 5.28 + 0.046 \times \text{輻射量} \quad (3)$$

以相同方式執行「每日24時foF2」之「逐步多元迴歸分析」，同樣地「太陽黑子數」未進入迴歸模式，而獲得「輻射量」多元相關係數R為0.596，其解釋量R²可達35.6%，且常數及迴歸係數均為顯著，故可得迴歸方程式如下：

$$\text{每日24時foF2} = 2.951 + 0.035 \times \text{輻射量} \quad (4)$$

在完成迴歸方程式建立後，至NOAA網站蒐集2012年1月1日至3月31日每日太陽活動參數(Daily Solar Data)，計擷取91筆每日太陽「輻射量」參數輸入迴歸方程式(3)及(4)中，即可分別獲得91日之12時及24時foF2「預測值」，並運用Dynasonde在同日、同時段的實測值作為「門檻值」(threshold)，以驗證預測程式的可用性。

在實際作業面來看，假設如果foF2之預測值超過實測值(預測值－實測值>0)，則將預測頻率值視為無法使用之頻率；反之，如預測值未超過或等於實測值(預測值－實測值≤0)，則可初步判定所預測頻率值為可以使用的通信頻率。故依此概念，驗證迴歸預測結果如下：

(一) 每日12時foF2值預測結果

經計算2012年1月1日至3月31日共計91筆每日12時(日間)foF2預測值及實測值(門檻值)之差值，計87筆預測值小於門檻值為「可用頻率」，而4筆預測值超過門檻值為

「不可用頻率」，故日間foF2預測值可用率達95.6%。雖然預測值低於門檻值判定為可用頻率，然而較大誤差值在通信運用實務上是否確切可用，必須再以「通信驗證」方式確認。

(二) 每日24時foF2值預測結果

經計算2012年1月1日至3月31日共計91筆每日24時(夜間)foF2預測值及實測值之差值，計49筆預測值小於門檻值為「可用頻率」，而42筆預測值超過門檻值為「不可用頻率」，故夜間foF2預測值可用率達53.8%。故依可用率比較，夜間迴歸預測方程式所得結果明顯較日間迴歸預測方程式可用率為低。

參、結論與建議

一、結論

在完成了2008至2011年總計4年的日間及夜間電離層F2層臨界頻率變化現象計算、分析，以及太陽活動性之影響迴歸預測方程式應用後，本研究可得以下結論：

(一) foF2日夜變化幅度明顯

在日間太陽輻射作用較強，所以合理造成每日電離層日間的foF2值比夜間的foF2值大的必然結果，然而透過4年2,920筆的觀測值中1,460天日間及夜間foF2數值比較發現，日、夜間變化差異值介於3MHz(含)以上至10MHz之間總計發生1,213天、發生機率約為83%，以通信頻率運用的角度來看，這是相當大的頻率差異值及非常高之發生率，而電離層F2層臨界頻率大幅度變化現象更增加了正確選用適當通信頻率之困難度，故由本研究分析結果得知，日、夜間之高頻通信頻率

不可使用相同的頻率，若3MHz以上之頻率差異未作適度修正調整，在實際通信運用時是不可能滿足任務需求的，恐將至少造成半天以上的通信阻通現象。

為簡化上述結果，運用臨界頻率為可用通信頻率之最大值低於門檻值亦為「可用頻率」之邏輯，我們便可將每天日、夜間臨界頻率差異值視為至少3MHz以上，而夜間頻率仍屬於可用頻率之範圍。至此即可歸納出「電離層F2層臨界頻率日夜變化現象為經常性之大幅度變化，日夜臨界頻率差異值至少為3MHz」之結論，做為選頻作業之參考。

換言之，頻管官(通信官)在選用高頻通信頻率時，應將日、夜間變化之差異納入考量，若日、夜間通信皆使用過於相近(同)之頻率，勢必將造成日間(或夜間)通信阻通現象，無法滿足穩定良好通信效果，故在選取可用之日間通信頻率後，必須特別注意夜間通信頻率應至少比日間通信頻率低3MHz以上為較佳的選擇。

(二)每月選換通信頻率為較佳方案且具必要性

依分析結果，4年之間foF2月平均變化值較週平均變化值之變化幅度為大，且變化幅度在1MHz以上之月變化與週變化發生機率比值為3.7：1，顯見電離層F2層臨界頻率月變化幅度大於週變化，且月變化值發生大幅變化機率比週變化值高3倍以上。

對高頻通信實務而言，在跨週高頻通信作業時，因電離層F2層臨界頻率週變化值達1MHz以上現象之發生率不到10%，週變化值多呈現小幅度增加或減少趨勢，且變化值大

多分布於0.5MHz至1MHz以下，小幅度的電離層臨界頻率變化對通信品質所能產生之影響程度較低，並考量選換頻率作業所需人力及時間，所以可考慮沿用前一週使用之通信頻率或作微幅修正以為因應，無必要每週更換通信頻率。但是在跨月份時，因臨界頻率的部分時段週變化值有逐週「累積」趨勢，而造成電離層臨界頻率月變化值有較為明顯之差異現象，變化值在1MHz至2MHz以上發生機率接近40%，如果沿用前一月使用之通信頻率，恐將造成通信阻通之負面影響，故在通信頻率之調整或更換即有其必要性。另結合季變化分析結果，4年之季變化分布值較為平均，季變化值分布在1.0MHz以下及1.0MHz以上之機率概等(均為50.0%)，無顯著變化現象，惟在每年第4季的季變化幅度均為正值且大於1.4MHz以上，幅度遠較前3季為高，可推論在冬季之電離層F2層臨界頻率均高於夏季頻率值，此點須做為選用頻率時考量之因素。

綜上，頻管官(通信官)「每週」更換高頻通信頻率較無必要，以「每月」做為頻率換用作業週期，是較佳之方案，而在選用頻率時可參考以下技巧：

1. 日間頻率高於夜間頻率，且有3MHz以上差異。
2. 若夜頻通信效果不好，接近日出時，可改用較高頻率。
3. 若日頻通信效果不好，接近日落時，可改用較低頻率。
4. 冬季頻率高於夏季頻率。

(三)太陽活動性對電離層F2層臨界頻率



變化有顯著影響

本研究蒐集4年每日12時及24時之foF2數值與太陽活動性的參數執行「複相關分析」得到結果為：太陽活動性與電離層臨界頻率呈現相當顯著之正相關，意即太陽活動性越強(太陽黑子數、輻射量數值越高)，每日12時及24時之電離層F2層臨界頻率值也越大。

而運用「迴歸分析」針對2011年各項較完整變數資料，所建構出「輻射量與每日12時foF2值」及「輻射量與24時foF2值」之迴歸方程式，其中迴歸模式的解釋量可分別達到47.4%及35.6%之水準，再進一步比對迴歸方程式預測值及Dynasonde的實測值，得到日間foF2預測值可用率高達95.6%，驗證了運用迴歸分析預測電離層臨界頻率方式為一可行方案。綜合上述「複相關分析」及「迴歸分析」之結果，可獲得「太陽活動性(輻射量)對電離層F2層臨界頻率變化有顯著影響」之結論，在此亦呼應了太陽活動性對電離層臨界頻率變化影響之理論。

本研究因自變項之一的「太陽黑子數」未達顯著水準而被排除於迴歸模式外，故以進入迴歸模式的自變項「輻射量」作為主要探討對象，與學界較為探討「太陽黑子數」之預測略有不同，究其本質均為太陽活動性參數之研究，惟差異在於運用不同之研究方法及工具所致，因此在太陽活動性對電離層變化影響之研究範圍尚有許多議題可再予深入探討及研究，值得我們作為持續研究電離層變化之參考方向。

二、建議

(一)運用科學工具及方法選用最佳通信

頻率

因應上述研究結論，可知「每月」實施高頻通信頻率的選用及更換是較佳之用頻方案，在國內現無自主選頻軟體現況下，此種以迴歸(數值)分析方式下建構臨界頻率之預測模式，藉由掌握NOAA網站所「預報」次月太陽活動性之各項月平均參數，以科學方法預測次月電離層臨界頻率，其結果無虞可作為國軍頻管人員選用高頻通信頻率之參考。而通信人員在選用高頻通信頻率時，亦可多加運用產、官、學界現有電離層研究軟體工具及研究成果相關資料執行選頻作業，茲將相關工具及方法分列如下：

1. 商規選頻軟體：如美國的AREPS、VO-ACAP或澳洲的ASAPS選頻軟體等，上述選頻軟體的優點為均以「全球電離層變化模式」作為軟體設計基礎之選頻工具，較可滿足全球高頻通信任務(如海軍敦睦遠航訓練任務)；其缺點為須付費，且選頻軟體之精準度在不同地域(非生產國本地)恐將有所差異。

2. 官方發布預報：

(1)臺灣國家通訊傳播委員會(NCC)：所屬電離層觀測站所發布之「歷史電離層圖資查詢」及「電離層高頻通訊最佳運用頻率預報」，其中最佳運用頻率預報可直接提供當月臺灣地區高頻通信頻率運用參考。

(2)美國國家海洋及大氣管理局(NOAA)：該網站發布之「太陽每日活動觀測資料(Daily Solar Data)」及「27天太陽活動性發展預報(27-day Forecasts & Solar-Cycle Progression/Predictions)」，可提供未來27天有關太陽活動性之各項參數預測

，作為選頻時參考。

(3)澳洲太空氣象局：澳洲政府提供「電離層摘要與預測」(Ionospheric Summary and Forecast)之服務，資料含括全球性高頻傳播運用資訊及電離層相關參數，雖以澳洲地區為服務主體，仍具相當之參考價值。

3. 學界研發成果：中央大學太空及遙測中心及太空科學研究所運用福衛三號衛星、動態式電離層探測儀及VHF雷達等高科技儀器設備，在各領域專業研究團隊從事多年之電離層及太空氣象研究後，已陸續建立可信度高、不同模式之選頻工具，如「太陽黑子預報模式」、「臺灣自主電離層數值模式」等，可提供臺灣地區各項電離層研究所需之重要參數及資料，更可進一步運用於選頻作業，滿足國軍通信人員需求。

上述產、官、學界現有電離層研究軟體工具及研究成果，均可以科學程式或頻率選擇軟體工具取代人工操作選頻方式，降低依經驗模式選頻可能產生之錯誤，在「既有」的頻率中挑選真正可用之頻率，運用在通信實務上方可有效提升通達率。

(二)強化通信頻譜管理作為，統一分配可用高頻通信頻率

各單位現有高頻通信頻率，其獲得來源多數經由歷年通信系統與裝備建案作業程序中申請核配，在通信網路或裝備壽期之內，統一由資電作戰指揮部頻管辦公室管制核配頻率使用狀況。然而現代資通訊科技發展一日千里，無線技術已普遍應用在日常生活中舉凡交通、網際網路、倉儲及物流等，使得在環境中電磁頻譜日趨複雜，通信所遭受的

電磁干擾日益嚴重，多數單位在初始申請頻率時，未使用相關科學工具過濾高頻頻段頻率現況，精準的挑選「可用」之頻率，僅能在表列無人使用的頻率中予以挑選所需的頻率，而結果往往造成申請頻率可用性不佳，無法滿足作戰任務要求之通信效果。因此國軍實應秉持科技先導之精神，落實頻譜管理之作為，最快的方法即是在現有的產、官、學界電離層研究成果及電離層探測作業能量的基礎上，持續推動通資電頻管系統建案或學術合作研究案，將科技技術及知識，落實於通信實務作業層面。

囿於三軍高頻通信頻率需求不一，秉持事權統一之原則下，在此建議「強化通信頻譜管理作為，統一分配可用高頻通信頻率」，不違背國軍現行頻譜管理制度，由國防部頻率(譜)管制專責單位通資次長室及資電部頻管辦公室，運用前述既有的電離層探測工具，全天候長期監測並過濾高頻全頻段之背景頻率，挑選可用頻率，再依據各軍種所提頻率申請需求，妥予分配三軍需求單位使用。最後再由三軍需求單位依獲分配之「可用」通信頻率，運用適切的選頻軟體及相關選頻工具，選取「最佳」之通信頻率，將更可滿足作戰任務所需，提升通信能量以支援戰訓任務需求。

(三)未來研究方向

太陽活動性週期約11年，本研究僅蒐集2008年至2011年4年之太陽活動參數及foF2值資料做為相關分析之用，在資料完整性尚有加強之處，未來研究可蒐集一完整太陽週期(11年)之相關太陽活動性與每日臨界頻率



參數，作更進一步針對電離層臨界頻率執行迴歸分析及預測之研究。

雖然本研究將預測值低於門檻值判定為可用頻率，然而較大誤差值在通信運用實務上是否確切可用，必須再以「通信驗證」方式確認，在前文即已述明本研究無規劃架設通信設備實施通信驗證，而通信驗證可做為未來研究方向。

<參考資料>

1. 邱滢鴻，〈短波通訊預測模式之發展與優化〉，國立中山大學電機工程研究所碩士論文，2001年6月。

2. 徐千雅，〈高頻無線電波電離層回波強度估計〉，國立中央大學太空科學研究所碩士論文，2011年6月。

3. 陳明煌，〈臺灣第二代動態式電離層探測儀之建置與資料處理〉，國立中央大學太空科學研究所碩士論文，2010年7月。

4. 蔡龍治，〈臺灣中高頻環境無線電波與區域電離層監測系統遠端操作與資料截取

手冊〉，2010年11月。

5. J. M. Goodman, 1992. HF Communications: Science and Technology. Van Nostrand Reinhold.

6. Tsai L. C., F. T. Berkey, 2000. Ionogram analysis using fuzzy segmentation and connectedness techniques, Radio Science, VOL. 35, NO. 5, pp. 1173-1186.

7. International Reference Ionosphere-IRI-2007: http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri_vitmo.html.

8. National Geophysical Data Center (NGDC): http://www.ngdc.noaa.gov/ngdc.html303450_0926266809_leslie2002. 

作者簡介：

李健鵬中校，中正理工學院87年班，海軍通信電子軍官班93年班，國防大學管理學院指參班101年班，現服務於國防大學管理學院。

老軍艦的故事

韓江軍艦 PC-124



韓江軍艦係由美國為因應二次世界大戰的需要而委托George Lawly & Sons Co.公司所建造之巡邏艦，1943年在美國麻州的 Weponset下水完工，並於當年成軍服勤，當時命名為「Vandalia」，編號PC-1175，擔任近岸巡邏任務。

民國46年7月15日美國政府依據中美共同防禦協定，於美國西雅圖將該艦及另外4艘同型艦一併移交我國，我海軍於接收該艦後，立即成軍，命名為「韓江」軍艦，編號PC-124，隸屬巡防艦隊，開始正式服勤，擔任臺海巡弋、護航及外島駐防等任務，另韓江軍艦服役期間曾參加過多次重要戰役，八二三砲戰期間，該艦曾多次護送運補船團至金門運補，以執行「閃電計畫」及「轟雷計畫」，每次均能冒著中共密集的砲火，突破封鎖，達成任務。該艦於民國61年1月1日，在海軍服役15年後，由於艦體及機件均老舊，維修困難，且大部份裝備已不合現代戰爭需求，奉命除役。(取材自老軍艦的故事)