

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

高頻無線電波通信效益提升與頻率管理(I) 研究成果報告(完整版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 100-2623-E-008-008-D
執行期間：100年01月01日至100年12月31日
執行單位：國立中央大學太空及遙測研究中心

計畫主持人：蔡龍治
共同主持人：陳國輝
計畫參與人員：學士級-專任助理人員：張雅莉
碩士班研究生-兼任助理人員：張雅莉
碩士班研究生-兼任助理人員：呂俊賢
講師級-兼任助理人員：田茂禾

公開資訊：本計畫可公開查詢

中華民國 101 年 02 月 15 日

中文摘要：我國國軍對於高頻無線電波於長距離通訊的需求面大，而另一方面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甚至於監測，以提升高頻無線電波通信效益。中高頻無線電波傳播的形式，包括天波及地波二種，其中地波的傳播主要侷限在數百公里之內，而且相關電波傳播的強度衰減非常大。另一傳播機制也就是天波傳播，主是透過電離層反射，或者透過電離層與地面之間多次反射做長距離(數百至數千公里範圍)的通訊傳播，此一長距離通訊特性，使得中高頻無線電波天波傳播是除了衛星通訊外唯一的長距離通訊方法。本研究運用國立中央大學於2002年建立的中壢站動態式電離層觀測儀，以及2010年建立的花蓮站動態式電離層觀測儀，此一動態式電離層觀測系統網能於一秒鐘觀測25個無線電波頻率，同時具備數位化與電波相位觀測功能，能應用天線陣列干涉法、脈衝波時間干涉法、與脈衝波頻率干涉法，觀測無線電波波極化值、方位角、仰角與其它特性。本研究分別於台灣東西部，一方面以主動脈衝波遙測台灣上空電離層，自動判讀觀測資料得到中高頻無線電波通訊區域最高可用頻率、最低可用頻率、與最佳可用頻率參數；在另一方面，可透過全天候被動式觀測做中高頻全頻段數千頻率環境無線電波監測，得到此數千頻率環境無線電波對時間的電波強度分析資料，進而建置中高頻頻帶背景環境無線電波資料庫。而當我們需要做中高頻通訊傳播的時候，可依即時電離層狀況同時避免監測結果所得的干擾頻率，找出適當的頻率來做通訊傳播；另外亦可對於已存在的中高頻頻率通訊，使用背景環境無線電波資料庫中時間對無線電波電波強度分析資料，判讀頻率使用效益與合法性。

中文關鍵詞：中高頻電波通信、中高頻雷達、電離層探測儀

英文摘要：In 2004 and 2010, National Central University has built up two NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) MF/HF radars, also referred as Dynasondes, at ChungLi (24.97° N, 121.19° E) and HuaLien (23.89° N, 121.55° E), separately, in Taiwan. The Dynasondes utilize an interferometric array (including four or eight receivers connected to different spaced dipole antennas) to receive ionospherically reflected signals and/or echoes and is a fully digital research ionosonde capable of providing high precision spatial and temporal ionospheric measurements. Further utilizing a pulse

set defined by four pulses transmitted at two closely spaced frequencies, the measured parameters are the time-of-flight and sixteen or thirty-two complex-amplitudes from four or eight receivers. We propose to apply radar interferometry to improve measurements of incident/tilt angles, deduction of velocity estimates and wave parameters, and tracking of signals and/or echoes. The dynasonde data will be used for (1) remote sensing the ionosphere structure, which affects the MF/HF radio communications and determines the maximum usable frequency (MUF), the least usable frequency (LUF), and optimal operating frequency, and (2) MF/HF radio frequency environment surveillance.

英文關鍵詞： MF/HF radar, MF/HF radio communication, ionosonde

行政院國家科學委員會國防科技研究計畫 成果報告
 期中進度報告

(高頻無線電波通信效益提升與頻率管理 1/3)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 100-2623-E-008-008-D

執行期間：100年1月1日至100年12月31日

執行機構及系所：國立中央大學太空及遙測研究中心

計畫主持人：蔡龍治

共同主持人：陳國輝

計畫參與人員：田茂禾、張雅莉

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本計畫除繳交成果報告外，另須繳交以下出國心得報告：

- 赴國外出差或研習心得報告
- 赴大陸地區出差或研習心得報告
- 出席國際學術會議心得報告
- 國際合作研究計畫國外研究報告

處理方式：除列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

中華民國 101 年 2 月 11 日

一、計畫中英文摘要：

關鍵詞：中高频電波通信、中高频雷達、電離層探測儀

我國國軍對於高频無線電波於長距離通訊的需求面大，而另一方面國防長距離通信亦不能全部仰賴通信衛星，因而有必要對高频無線電波通訊做更有效的使用與管理甚至於監測，以提升高频無線電波通信效益。中高频無線電波傳播的形式，包括天波及地波二種，其中地波的傳播主要侷限在數百公里之內，而且相關電波傳播的強度衰減非常大。另一傳播機制也就是天波傳播，主是透過電離層反射，或者透過電離層與地面之間多次反射做長距離(數百至數千公里範圍)的通訊傳播，此一長距離通訊特性，使得中高频無線電波天波傳播是除了衛星通訊外唯一的長距離通訊方法。本研究運用國立中央大學於 2002 年建立的中壢站動態式電離層觀測儀，以及 2010 年建立的花蓮站動態式電離層觀測儀，此一動態式電離層觀測系統網能於一秒鐘觀測 25 個無線電波頻率，同時具備數位化與電波相位觀測功能，能應用天線陣列干涉法、脈衝波時間干涉法、與脈衝波頻率干涉法，觀測無線電波波極化值、方位角、仰角與其它特性。本研究分別於台灣東西部，一方面以主動脈衝波遙測台灣上空電離層，自動判讀觀測資料得到中高频無線電波通訊區域最高可用頻率、最低可用頻率、與最佳可用頻率參數；在另一方面，可透過全天候被動式觀測做中高频率全頻段數千頻率環境無線電波監測，得到此數千頻率環境無線電波對時間的電波強度分析資料，進而建置中高频頻帶背景環境無線電波資料庫。而當我們需要做中高频通訊傳播的時候，可依即時電離層狀況同時避免監測結果所得的干擾頻率，找出適當的頻率來做通訊傳播；另外亦可對於已存在的中高频頻率通訊，使用背景環境無線電波資料庫中時間對無線電波電波強度分析資料，判讀頻率使用效益與合法性。

Keywords: MF/HF radar, MF/HF radio communication, ionosonde

In 2004 and 2010, National Central University has built up two NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) MF/HF radars, also referred as Dynasondes, at ChungLi (24.97°N, 121.19°E) and HuaLien (23.89°N, 121.55°E), separately, in Taiwan. The Dynasondes utilize an interferometric array (including four or eight receivers connected to different spaced dipole antennas) to receive ionospherically reflected signals and/or echoes and is a fully digital research ionosonde capable of providing high precision spatial and temporal ionospheric measurements. Further utilizing a pulse set defined by four pulses transmitted at two closely spaced frequencies, the measured parameters are the time-of-flight and sixteen or thirty-two complex-amplitudes from four or eight receivers. We propose to apply radar interferometry to improve measurements of incident/tilt angles, deduction of velocity estimates and wave parameters, and tracking of signals and/or echoes. The dynasonde data will be used for (1) remote sensing the ionosphere structure, which affects the MF/HF radio communications and determines the maximum usable frequency (MUF), the least usable frequency (LUF), and optimal operating frequency, and (2) MF/HF radio frequency environment surveillance.

二、前言

中國在 2007 年一月十一日測試用陸基中程攔截彈道飛彈，摧毀了一枚在地表上空 865 公里低軌道上的氣象衛星。理論上，此次測試意味中國此後可以擊中任何低軌道衛星，其中包含提供通訊衛星，是現代國防作戰能力的必要一環，此次測試證實低軌道衛星極其脆弱，代表對國防的間接威脅，中國

「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，戰時將影響國軍情資蒐整。此次測試也突顯國防通信不能全部仰賴通信衛星，有必要對傳統地對地中高频無線電波通信做更有效的使用與管理甚至於監測，以為通信衛星的替代方案。

三、 研究目的

中高频無線電波傳播的形式，包括天波及地波二種，其中地波的傳播主要侷限在數百公里之內，而且相關電波傳播的強度衰減非常大。另一傳播機制也就是天波傳播，主是透過電離層反射，或者透過電離層與地面之間多次反射做長距離(數百至數千公里範圍)的通訊傳播，此一長距離通訊特性，使得中高频無線電波天波傳播是除了衛星通訊外唯一的長距離通訊方法。中高频通訊的相互影響及干擾非常的容易而且難以隔離，在此我們提出相關台灣上空中高频電波環境的監測與訊號分析有兩方面目的：(1)在被動面上，可透過動態式電離層觀測儀做全面中高频率電波環境的監測，進而建置中高频頻帶背景資料庫，而當我們需要做中高频通訊傳播的時候，可依即時電離層狀況同時避免監測結果所得的干擾頻率，找出適當的頻率來做通訊傳播。(2)主動面上，中高频電波環境的監測結果也可提供頻率管理者相關資料(通訊頻率與電波強度)，判讀各通訊頻率合法性，本研究運用中央大學於 2002 年建立的中壠站動態式電離層觀測儀，以及 2010 年建立的花蓮站動態式電離層觀測儀，可透過全天候被動式觀測做中高频率全頻段數千頻率環境無線電波監測，得到此數千頻率環境無線電波對時間的電波強度分析資料以及電波方位角與仰角分析資料，進而建置中高频頻帶背景環境無線電波資料庫。

四、 研究方法

在本研究中，我們利用中壠站與花蓮站動態式電離層觀測系統網以不同操作模式對台灣東西部中高频無線電波通訊環境做 (1)主動脈衝波遙測台灣上空電離層，自動判讀中高频無線電波通訊頻率參數，(2)被動式全頻域 24 小時分時(至少每 15 分鐘一次)監測，或 (3)被動式特定頻率密集監測。以下分別對系統特性、系統操作模式與觀測資料分析一一說明：

4.1 中大動態式電離層觀測系統網介紹與系統特性

在本研究中，我們所使用的儀器為中壠站與花蓮站動態式電離層觀測儀(Dynasonde)。動態式電離層探測儀 [Wright, 1979] 的概念起源於 1966 年美國國家電信資訊總署電信科學研究所(Institute for Telecommunication Sciences, National Telecommunications and Information Administration)。直到 1975 年，由 J. Townsend 監督以及 R. N. Grubb 領導的科學團隊，以及美國科學基金會(National Science Foundation, NSF)的支持下，在科羅拉多州美國國家海洋暨大氣局(NOAA)的太空環境實驗室(Space Environment Laboratory, now renamed Space Weather Prediction Center, SWPC)進行著一套現代化電離層探測儀的發展，以符合當時國際磁層研究(International Magnetospheric Study)所需，主要能用來探測電離層的動態變化。而 dynasonde 這個名稱則是由 J. W. Wright 取其具有量測電離層動態(dynamics)的能力所制定。1986 年，Los Alamos National Laboratory(LANL)的大氣科學團隊(Atmospheric Science Group)針對原始動態式電離層探測儀的控制系統、訊號處理過程及資料儲存設備，設計了新的類比數位轉換(ADC)卡、GRAM 卡(雷達控制系統)以及數位訊號處理(DSP)卡，將控制系統由工作站轉移到個人電腦來操作。2002 年，本文作者研究團隊

將 Los Alamos National Laboratory 之動態式電離層探測儀(參考圖一)遷移至中壢市中央大學校區並更新發射器與數位訊號處理(DSP)卡 [Hsiao et al., 2008]。

目前最新一代的 dynasonde 由 R. N. Grubb 等人在 Scion Associates (Inc. in Washington) 所設計 [Grubb, 2008]，利用快速的資料擷取及外頻(主機板匯流排系統的運作速度)、特殊應用積體電路(ASICs)與嵌入式控制，再加上 DUC(digital up converter)和 DDC(digital down converter)的研製，一套有效益的儀器就可完成。2010 年，本文作者在國科會國防科技計畫支持下，於花蓮市東華大學校區建置一部新一代的動態式電離層探測儀(參考圖二)。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、同時回波傳播虛擬長度精確度也可改進至 100 米，為過去的 1/100，同時操作者也可通過網路遙控整個系統，隨時達到監視作用。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 1Hz，能於 2 分鐘觀測 3000 個無線電波頻率；(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。系統細部特性介紹如下：

基本系統參數：

- 4組接收機(中壢站)或8組接收機(花蓮站)
- 操作頻率範圍：0.2~30 兆赫 (MHz)
- 最小接收信號強度： $\leq 0.4 \mu\text{volts}$ ($\sim -120\text{dBm}$)
- 瞬間最大發射信號強度：18 KW(中壢站)或4 KW(花蓮站)
- 類比數位信號轉換精敏度：12 位元(中壢站)或14 位元(花蓮站)
- 類比數位信號轉換取樣間隔：1, 2, 5, 或 10 μsec

接收天線：

- 結構與天線種類：6 (中壢站)或 8(花蓮站) 管狀偶極天線
- 前置放大器效益：10 dB

發射天線：

- 結構與天線種類：中間供應交疊型偶極天線

干涉式相位測量 [Tsai et a., 1993; 1997]：

應用天線陣列干涉法、脈衝波時間干涉法、與脈衝波頻率干涉法三種干涉法，能觀測無線電波方位角與仰角、無線電波波極化值與都卜勒值、脈衝波傳播虛擬長度、與其它無線電波特性。



圖一、第一代(中壢站)動態式電離層觀探測儀(Dynasonde)



圖二、第二代(花蓮站)動態式電離層觀探測儀(Dynasonde)

4.2 動態式電離層觀測系統操作模式與觀測資料

4.2.1 應用主動式觀測模式決定電離層參數與高頻無線電波通訊頻率參數

電離層是指大氣層分子及原子因太陽輻射、宇宙射線、流星或微粒輻射等因素，而被游離化以致於能持續影響電磁波傳播的區域。其高度分布由距地表數十公里以至一二千公里，其中擁有為數眾多的游離電子與離子。依照離地面的高度和電子密度的分布，電離層可分為 D 層(約距地表六十公里以

至八、九十公里)、E層(約距地表八十公里以至一百五十公里)和F層(約距地表一百五十公里以至一、二千公里)。我們對電離層的了解大部分來自於遙測(Remote sensing)技術,目前,利用電離層探測儀進行遙測仍被世界各地的觀測站廣泛使用,主要原因有二:1. 花費較低廉。2. 穩定性及實用性均較佳。電離層探測儀根據電離層能影響電磁波行進的原理,由地面垂直向上發射一系列頻帶(1~20MHz之間)的電磁脈衝訊號,然後量測自電離層反射回來的回波之物理特性(如回波強度、飛行時間等),而記錄成電離圖。通常吾人可以在電離圖上看到屬於E層與F層的回波軌跡,由於地磁造成電磁波偏極化(polarization)的關係,單一電離層在電離圖上至少呈現兩條回波軌跡,即正常回波(0-mode)與異常回波(X-mode),有時中高緯度地區還會出現所謂 Z-mode 回波,再加上二次及以上回波的軌跡,則形成吾人所看到的電離圖 [Wakai et al., 1987],電離圖上的資訊能幫助吾人了解電離層的狀況,電離層探測儀在正常操作時可保持 5 至 15 分鐘做一次電離層掃描,每一次掃描均產生一電離圖,經年累月下來累積了相當多的資料。同時每一電離圖資訊量也太大,研究時顯得不經濟,所以有必要經過判讀(Scaling)的手續,獲取電離圖上具有實用及研究價值的參數值。

本文作者相關研究中已開發理論與分析軟體,利用模糊分類技術自動鑑定及認證電離層探測儀電離圖中虛高軌跡 [Tsai and Berkey, 1995; Tsai et al., 2000],決定電離圖中回波信號之間的連續性,進而達到電離圖中不同虛高軌跡的分割,不但可以區分正常(Ordinary)和不正常(Extraordinary)回波,同時可過濾周邊干擾訊號、雜訊及重覆反射回波,後自動鑑定及認證電離層虛高軌跡,而得到所需電離層參數,其中還包含 Sporadic E 最高(最低)頻率,Spread F 發生頻率、頻寬、高度分佈等。其中電離層 F 層臨界電漿頻率(f_oF2)即可運用為高頻無線電波垂直通訊最高可用頻率(Maximum Usable Frequency, MUF), $0.834 * f_oF2$ 即為垂直通訊最佳可用頻率,而電離層軌跡最低頻率即是垂直通訊最低可用頻率(Least Usable Frequency, LUF)。

我們以中壢站與花蓮站動態式電離層觀測儀觀測產生之數位式電離圖為輸入資料,經由程式處理後輸出各電離層參數。程式處理的步驟為:

- 自圖像中切割分離出有意義的訊號,並移除干擾訊號。
- 確認回波軌跡群並以模糊相鄰程度作為回波分類依據。找出最重要的 F 層回波與 E 層回波。
- 區分 E 層中的 E 層與散塊 E 層回波。
- 確認真正的回波軌跡。
- 修飾回波軌跡(平順化、外插補足、內插補足)。
- 以 U. R. S. I. 的標準擷取電離圖參數值。

以下就幾個重要步驟一一討論:

(a) 切割分離回波訊號與背景

本文應用模糊理論 [Zadeh, 1965; 1975],所有的回波像素都可根據其強度找出歸屬 μ 值,根據回波像素的歸屬值,採用一個約略的常數值為分界區分背景與回波訊號(含電離層回波、干擾訊號與雜訊等)。接下來利用強干擾訊號(interference)的特徵而採取簡便的移除干擾的技巧:將固定頻率上有不隨高程變化且高而一致強度的回波訊號整條加以移除。如此,較微弱的干擾訊號依然存在,但接下來的回波分類工作可以將其辨識出來,不會與真正回波訊號混淆。

(b) 回波分類

首先利用模糊連接性質 connectedness [Rosenfeld, 1979; 1983; Zheng, 1984; Chen et al.,

1994]，作為切割出的初步影像繼續分類的依據。令 Σ_2 表示二維空間（頻率，虛高）中所有獨立空間（像素）的相關資訊，我們把幾何學中”路徑”的概念拓展至模糊集合，電離圖由於有時反射訊號過於微弱及移除干擾訊號造成影像中斷的關係，一條路徑在電離圖上不以一系列相連的像素組成，改採用一系列以模糊連接性質 λ (λ -connectedness) 相連的像素代替。令 $\Pi = p_0, p_1, p_2, \dots, p_n$ 為 Σ_2 中一條模糊相連的路徑，由式(2)像素的相鄰程度的觀念，我們定義路徑 Π 的 connectedness C_p 為

$$C_p(\Pi(p_0, p_n)) = \min\{a(p_i, p_{i+1}) \mid i=0, 1, 2, \dots, n-1\}$$

定義兩像素 p, q 的 degree of connectedness $C(p, q)$ 為：

$$C(p, q) = \max\{C_p(\Pi(p, q)) \mid \Pi(p, q) \text{ 為 } \Sigma_2 \text{ 上通過 } p \text{ 與 } q \text{ 的任一路徑}\}$$

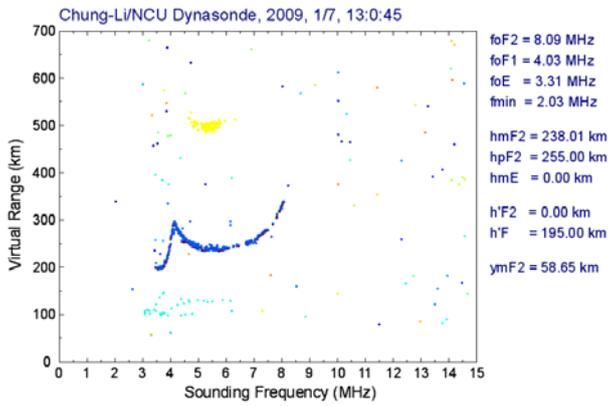
對於一個 λ 值 ($\lambda \in [0, 1]$) 而言，若 $C(p, q) \geq \lambda$ ，則我們說 Σ_2 中的 p 與 q 的連接程度在 λ 以上，或者說存有一條路徑 Π' 連接著 p 與 q ，且 $C_p(\Pi') \geq \lambda$ 。而 λ -連接程度就是一種模糊幾何學的连接度，其意義在此為電離圖上兩點之間的模糊相連性。如此，只要函數 $\lambda(p, q)$ 跟 $C(p, q)$ 確定，選取適當的 λ 值，就可以找出電離圖中所有連接程度為 λ 等級的軌跡群。步驟如下：

- p_0 為 Σ_2 上的一像素，首先假設 p_0 的前一連接點為空點，處理順序由下而上、由左至右。
- 開啟一個位於 p_0 左邊且大小適當的窗口，對所有窗口內的點 p_a ，若有一點 p 使 $\lambda(p, p_0) = \max\{\lambda, a(p_a, p_0)\}$ 則 $L(p_0)$ 以 p 取代，且將原含 p 點之軌跡群與 p_0 的聯集做為新的軌跡集合，亦即將 p_0 也納入原含 p 點的軌跡成為新軌跡集合的一分子，再回到上步驟尋找下一 p_0 的連接點，若找不到 p 則進入下步驟。
- 找不到與 p_0 相連的 p ，則視 p_0 為一個新線段起點，回第一步驟，再尋找新線段的相關 p 點。

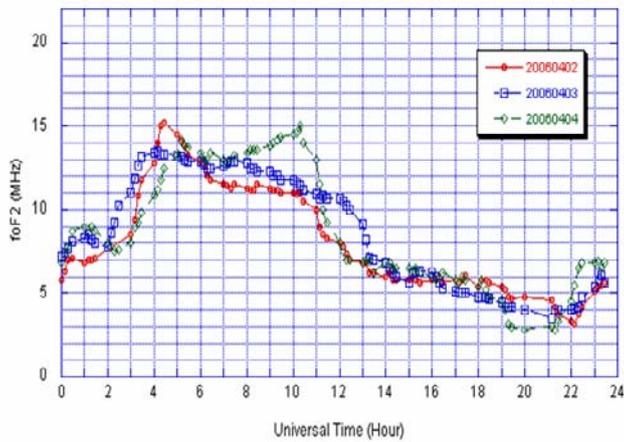
當電離圖所有的像素都經過以上步驟運算處理後，所有回波軌跡皆被分類，分別屬於不同軌跡集合（每群軌跡具有 λ 等級連接度），不同的軌跡集合代表電離層不同各層回波或雜訊。

(c) 電離層各分層的理想化回波軌跡的確認

回波軌跡經過分類後，計算所有回波軌跡群的幾何性質可以大致找出該軌跡群的屬性，藉此指定出何者為 F 層或 E、Es 層甚至是弱干擾的回波軌跡群。但在電離圖上，我們要更進一步萃取出理想化的線段軌跡，原則上我們希望在單一分層的軌跡中，單一頻率只有相對的單一虛高回波訊號，也就是圖上每一縱軸都最多只有對應於單一軌跡集合的單一像素。我們再度應用兩像素間的 degree of connectedness 為所有經過此二像素的所有路徑中最大的 connectedness 的觀念，在分類過的單一(如 F 層)軌跡中，如果謹慎選好起點與終點，就可找出經過此二像素的路徑中 connectedness 最大者，而此路徑可視為我們真正需要的 F 層線段軌跡，E 層與 Es 層尋跡方法亦同。圖三舉例動態式電離層觀測儀應用自動化電離圖軌跡辨識及判讀電離層參數之結果：不同軌跡集合及理想軌跡線段的萃取結果，可以看出 E 層回波、F 層回波及二次回波甚至較微弱的干擾雜訊皆以不同灰階表示；分類好的 E、F 層軌跡群中，連續實線部份為真正需要的線段軌跡；最後的步驟則以 U. R. S. I. 的標準讀取各參數值，完成自動判讀工作，圖四則顯示連續三天全天候高頻無線電波垂直通訊最高可用頻率結果。



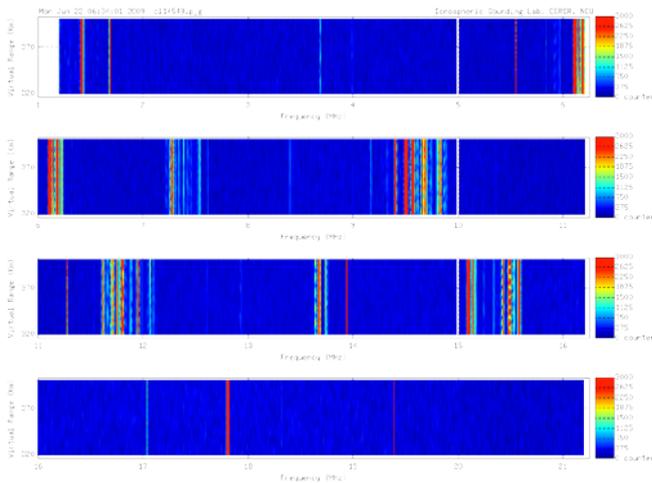
圖三、 自動化處理判讀電離圖中電離層參數實例



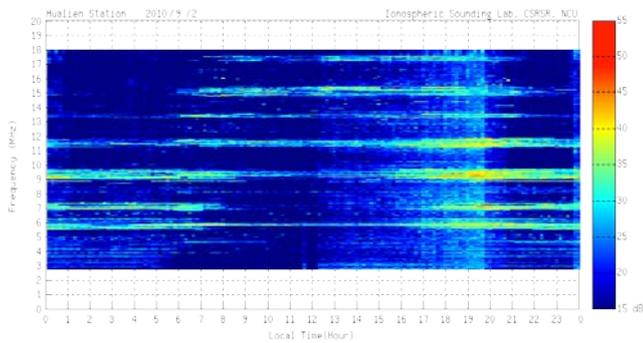
圖四、 自動化處理判讀電離圖決定全天候高頻無線電波垂直通訊最高可用頻率實例

4.2.2 應用被動式觀測模式於中高頻電波短波環境監測

動態式電離層觀測儀以被動式觀測模式(不主動發射電波，只被動接收環境無線電波)，觀測中高頻無線電波環境，圖五是一無線電波環境 (1.2 ~21.2 MHz) 監測結果，橫軸座標為頻率，注意的是在 600Khz 到 1.2Mhz 之間左右的訊號強度頗大，其實也就是 AM(Aplitude Modulation)廣播電臺的頻帶，因訊號強度大，不列入監測範圍。此觀測記錄不但可得到干擾頻率分布，如 1.4 MHz, 1.6 MHz, 6.1~6.3 MHz, 7.2~7.6 MHz, 9.3~9.8 MHz, 11.6~12.1 MHz 等，透過這些監測結果，可以找到中高頻通訊空窗頻率，選擇空窗頻率來做傳播，同時依照當時電離層結構與電子密度分布的情況，選擇傳播的途徑，也就是選擇透過 E 層，F 層或 Es 層的傳播，一次或多次電離層回波傳播，還有傳播的角度。總合而言，動態式電離層觀測儀無線電波背景噪音監測結果優點：1. 監測頻率解析度高 (1Hz)，2. 監測無線電波強度靈敏度高 (12~16 bit)，3. 監測信號取樣時間間隔小 (0.01sec)。透過全天候 24 小時分時(至少每 15 分鐘一次)監測，圖六說明被動式全頻域 24 小時無線電波強度監測圖，圖中可以看出白天時期(至 18MHz)環境無線電波干擾頻率分布較廣，晚上時期(至 13 MHz)環境無線電波干擾頻率分布較窄。該無線電波環境監測資料經分析處理後，亦可獲得各個頻率的時間對電波強度與時間對電波方位角與仰角關係，用以分析與監測高頻無線電波通信效益或是該頻率遭受周圍環境無線電波干擾狀況，進一步可以配合電離層模式找出特定中高頻率的通訊發射站位置，而後判斷其中高頻率通訊是否合法。



圖五、2009 年 1 月 22 日 06:34:01 UT，無線電波環境（1.2 ~21.2 MHz）監測結果



圖六、被動式全頻域 24 小時無線電波強度監測實例

4.2.3 中高频電波方位角測量與其精準度評估

動態式電離層觀測儀 (Dynasonde) 可以產生 200KHz~30MHz 的發射頻率，在線性天線的接收控制範圍有 30dB~40dB，接收天線的 3dB 頻寬為 33KHz，動態式電離層觀測儀能夠在一脈波組中，推算回波相位參數 [Tsai et al., 1993]。在其開放的控制軟體中，能使動態式電離層觀測儀使用者依其實驗需要，自行設計適當的脈波組接受序列和天線陣列的擺放方式，而目前中央大學與東華大學動態式電離層觀測儀的接收天線陣列為本文作者自行設計(見圖七與圖八)。動態式電離層觀測儀發射時每四個脈衝信號當作一組脈衝波，接收時則由選擇器 (multiplexed) 從接收天線中，選擇其中四根或八根天線接收回波(見圖七與圖八)。每一組脈衝波接收的資料包含 16 (i.e. 4*4) 或 32 (i.e. 8*4) 個回波相位 ($\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots$)，進而從其中 16 或 32 個回波相位導出六個電離層相位參數(phase parameter)， $\Phi_0, \Phi_x, \Phi_y, \Phi_t, \Phi_p$ 和 Φ_f ，以估計回波方位角，都卜勒頻移，回波極化值和虛高。

其中：

Φ_i ：在一脈波組中，Dynasonde 量測到的 16 或 32 個相位，其中 $i=1, 2, \dots, 32$ 。相當於每組 4 個脈衝發射波，每個發射波可於 4 個接收機分別接收到的回波。

Φ_0 ：為一參考位置的相位。

Φ_x 、 Φ_y ：此相位變化來自天線分置相對於參考位置，在 x 方向或 Y 方向的相位變化。

$$R_x' = R' \times \frac{\lambda}{D_x} \times \frac{\Phi_x}{2\pi}$$

(其中：

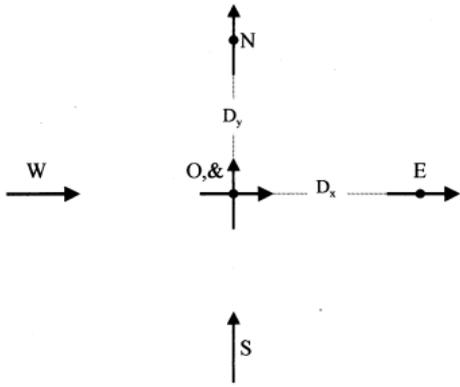
$$R_y' = R' \times \frac{\lambda}{D_y} \times \frac{\Phi_y}{2\pi}$$

Φ_p ：此相位變化來自天線放置方向的影響，由此相位可知回波極化是正常(ordinary)波或是異常(extra-ordinary)波。

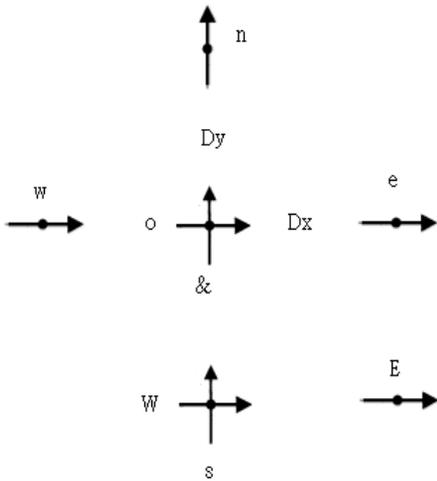
Φ_t ：此相位變化來自時間的影響，由此相位可得都卜勒速度， v_d ， $v_d = (\lambda_0/2) \times (\Phi_t/360^\circ) \times (1/\Delta t)$ ， $\Delta t = 0.01$ 秒。(以 100pps 計算)。

Φ_f ：此相位變化來自電波頻率改變的影響。

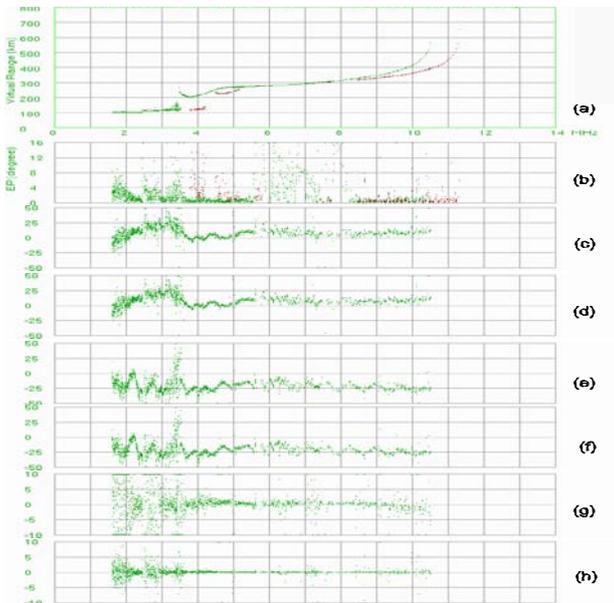
由於動態式電離層觀測儀，一次發射 4 個脈衝，用 4 或 8 個接收機回收，我們將會得到 16 或 32 個回波相位，其中我們以 0 點南北向的天線的回波做為參考相位 Φ_0 ，因此天線擺設位置的不同，會有因距離改變造成的相位變化 Φ_x 、 Φ_y ；天線擺設方向改變（東西向）會有極化方向改變的相位變化 Φ_p ，時間變化時則會有相對於參考時間產生的相位變化 Φ_t ，發射頻率改變則會有因頻率產生的相位變化 Φ_f 。由於所得的相位測量侷限於 $-\pi$ 至 π (i.e. 360°)，會有無法確知的相位差 $2n\pi$ 為多少的問題，因此無法直接由最小平方法求得上述參數的解。但是由 *Jarvis and Dudeney*[1986]，我們可以先假設所得相位為理想相位沒有 ε_i 的差值，因此我們現在有六個未知數但是有 16 或 32 組方程式，解是無解。於是我們只取其中六組來計算（有 $C_6^{16} = 8008$ 種取法）再配合最小平方法，找出 σ 最小的一組 ε_i ，得到最佳回波相位參數(phase parameter)， Φ_0 ， Φ_x ， Φ_y ， Φ_t ， Φ_p 和 Φ_f 解 [Tsai, et. al. 1993, Tsai, et. al. 1997]，進而估計回波方位角(或位置)，都卜勒頻移，回波極化和虛高。回波相位參數 Φ_0 ， Φ_x ， Φ_y ， Φ_t ， Φ_p 和 Φ_f Ambiguity 和 Relative Confidence Limit Factor (RCLF) 值如下： Φ_0 : 2π & 0.5306, Φ_x : 2π & 0.4082, Φ_y : 2π & 0.3536, Φ_t : 2π & 0.2240, Φ_p : 2π & 0.5088, Φ_f : 2π & 0.5054 (RCLF Summary: 2.5292)。圖九為一動態式電離層觀測儀回波相位測量實例：(a)電離圖，(b)回波相位的誤差值與(c)-(h)其回波相位參數(Φ_0 ， Φ_x ， Φ_y ， Φ_t ， Φ_p 和 Φ_f)解，由子圖(b)回波相位誤差值分佈結果可知標準差 σ 約為 2 度，中央大學動態式電離層觀測儀回波相位目標誤差值亦限定於 2 度。



圖七、中壢站動態式電離層觀測儀接收天線陣列結構圖



圖八、花蓮站動態式電離層觀測儀接收天線陣列結構圖



圖九. 動態式電離層觀測儀一(a)電離圖實例, (b)相位的誤差值(error parameter, EP)與(c)-(h)其回波相位參數 Φ_0 , Φ_x , Φ_y , Φ_t , Φ_p 和 Φ_f 解

4.2.4 中高頻天波傳播電波強度相關評估

中高頻天波電波強度的評估主要含二部份，一是增益的部份，二是損失的部份。以下是電波強度的評估方程式 [Kelley, 1989]，

$$E(dB) = 107.2 + 20 \log_{10} f + P_t + G_t + G_r - (L_{bf} + L_i + L_g)$$

首先看增益的部份，增益的部份含有三個主要成分：發射機發射電波的強度 (P_t)，發射天線的增益 (G_t)，與接收天線(陣列)的增益 (G_r)，三個增益成分皆為硬體系統與電波頻率相關函數，與電離層數值模式無關，以下分別就各增益的部份一一介紹。

- 發射機發射電波的強度 (P_t)：發射機發射電波的強度隨著系統設計而變，一般攜帶型發射機可從數瓦到數十瓦都有，而固定型發射機則可由數百瓦到數百萬瓦。
- 發射天線的增益 (G_t)：發射天線的增益，比如點天線就是 0dB，而一般的 Dipole 天線大概有 3~6 dB。隨著特殊天線的設計，它的增益也可增加，但在高頻天線設計部分，由於高頻相對的波長較長，從 10 米到 100 米的波長，相對地它的天線設計就是高增益天線就比較困難。所以在此主要針對 Dipole 天線估計大約在 3~6 dB。
- 接收天線(陣列)的增益 (G_r)：接收天線陣列就如剛才所講發射天線一樣，點天線就是 0 dB 而 Dipole 天線大概 3~6 dB。由於接收機是屬於地面固定型，所以可做成高效能的天線設計，而達到較高的天線接收增益。

前面三項指的電波增益的部份，特別值得注意的是電波強度增益會隨著頻率的升高而增加，但此部份在往後隨著損失的部份，損失的部份也會著頻率的增高而增加，所以互相抵消而可把它忽略。再回到剛才講到第二成分損失的部份，主要損失的部份有三樣：直接傳播損失或者真空中傳播損失 (L_{bf})，電離層傳播損失 (L_i)，以及地面反射損失 (L_g)，其中前兩損失部份與電離層數值模式相關，以下分別就各電波強度損失的部份一一介紹。

- 直接傳播的損失或者真空中傳播的損失 (L_{bf})：此損失主要跟傳播距離有關和頻率有關，頻率部分就是剛才提到強度增益隨著頻率增高可跟頻率抵消。而傳播距離的部分，它的損失就是 $20 \log D$ ，另外再加上 32.44 dB，此為第一樣損失。相關傳播距離評估需依電離層數值模式計算。

$$L_{bf}(dB) = 20 \log_{10} \frac{4\pi D}{\lambda} = 32.44 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} D$$

- 電離層在傳播中的損失 (L_i)：此損失隨著電離層不同電波頻率傳播而有變化，另外傳播的途徑，它是屬於一次傳播或二次傳播有關頻率，或者 E layer、F layer 傳播有關。相關電離層傳播損失亦需依電離層數值模式模擬計算，以下是電離層傳播損失的方程式評估，

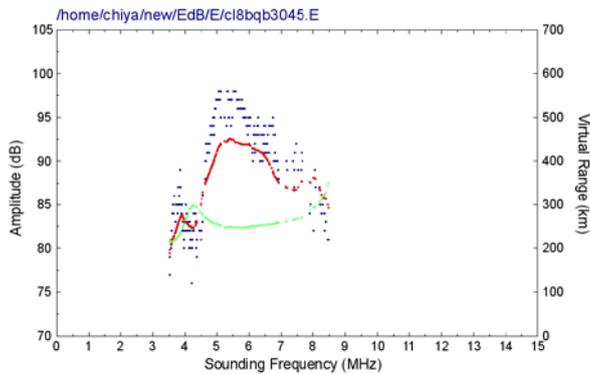
$$L_i = \frac{677.2 (\sec \phi)}{1.98 (f + f_H) + 10.2} \times \sum_{j=1}^N I_j$$

其中 N 就是傳播途徑的次數，N=1 是屬於一次電離層回波傳播，N=2 是屬於二次電離層回波傳播。 ϕ 是電波入射角度，特別提的是 100 公里處電波的入射角度。 f_H 就是地磁頻率 (gyrofrequency)，100 公里的地磁頻致在低緯的地區可估計是 1.2 MHz。 I_j 是跟太陽黑子數有關，還有入射角度的關係， R_{12} 是 12 個月的平均太陽黑子數。特別有二點值得注意，第一電離層傳播的損失，它與傳播回波反射點(反射高度)有相當的關係，比如說 F 層的傳播如果 9MHz 在 F layer 傳播來講它的損失大概 $677 \div 30$ ，大概是 22 dB。可是到 E 層的傳播，估計約 $677 \div 20$ ，大概是 34 dB。F 層的傳播跟 E 層的傳播差異有 12 dB 之多，也就是 E 層的損失較高，差 12 dB，最主要 E 層是高頻中相對屬於低頻的波吸收較強，造成電離層傳播的損益。第二點是，電離層傳播中一回波與二次回波的差異，今天多一

趨回波傳播的差異，以 F layer 來講，F 層就多一個 $677 \div 30$ 也就是 22 個 dB，也就是多一次電離層回波傳播，回波損失就多 22 dB。當然 E 層多一次電離層回波傳播的損失相當於多了 34 dB 的損失。

c. 地面反射的損失(Lg)：此地面反射的損失跟地面的特性有關，比如說在平坦的如河面、海面，損益較小。相對來講地面較粗糙的，比如都市它的損益較大，一般而言地面的損益估計在 3~6 dB。

圖十結果即利用中壢站電離層觀測儀所得電離層資料比較電離層回波(綠色軌跡)之電波強度估計(紅色軌跡)與實際電離層回波強度值(藍色軌跡)，所得平均誤差小於 5dB。



圖十. 動態式電離層觀測儀(a)電離圖實例 [徐千雅，2011]

五、 結果與討論

1. 完成電離層觀測儀主動觀測電離圖與被動觀測中高頻頻帶無線電波環境監測資料庫

中央大學中壢站與花蓮站動態式電離層觀測儀高頻頻帶資料庫建立完成，資料庫網址：<http://isl.csr.sr.ncu.edu.tw>，相關資料亦供與另一國科會計畫”太空資料庫”。中壢站與花蓮站動態式電離層觀測雷達可提供的資料共有三種：

- (1) 原始電離圖，中壢站與花蓮站各站至少每 30 分鐘一張數位電離圖，一天共~48 張。該電離圖資料尚含回波特徵資訊，即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、回波位置、及 Doppler 值。
- (2) 利用電離層參數自動判讀決定電離層參數及中高頻通訊最高可用頻率(MUF)與最低可用頻率(LUF)，至少每 30 分鐘一份台灣中壢站與花蓮站上空電離層參數資料。
- (3) 中高頻無線電波環境監測結果，本研究經常性利用動態式電離層觀測儀不發射電磁脈衝波，並採用全時間 (P mode)的觀測模式來監測所有中高頻頻帶背景訊號上在短波環境分部情況，至少每隔 15 分鐘掃頻觀測一次，全天候二十四小時連續監測，在此這種特殊的觀測方式吾人特別稱之為被動觀測模式。該全天候被動式觀測，可得到數千頻率環境無線電波對時間的電波強度分析資料，進而建置中高頻頻帶背景環境無線電波資料庫。而當我們需要做中高頻通訊傳播的時候，可依即時電離層狀況同時避免監測結果所得的干擾頻率，找出適當的頻率來做通訊傳播；另外亦可對於已存在的中高頻頻率通訊，使用背景環境無線電波資料庫中時間對無線電波電波強度分析資料，判讀頻率使用效益與合法性。

2. 動態式電離層觀測系統遠端操作平台

電離層觀測儀之中高頻頻帶資料庫已建立，且中高頻電波環境監測的遠端控制平台也已建立完成。遠端控制平台的網址是：<http://140.115.111.231>，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。遠端控制平台工作包含：透過網路服務，從平台與資料庫中下載過去主動式觀測電離圖與高頻無線電波通訊MUF與LUF參數，以及被動式觀測高頻無線電波環境全頻域 24 小時分時監測資料，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訊截取出來後，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 頻率圖，之後可自動產生置放於網頁上，以供通訊參考。遠端控制平台亦可獲得各個頻率的時間對電波強度與時間對電波方位角與仰角資料，用以分析與監測高頻無線電波通信效益或是該頻率遭受周圍環境無線電波干擾狀況，同時可以遠端操作被動式即時監測模式，即時下傳與刪除監測結果。目前以網頁平台方式架設，不需另外加裝軟體，且易管理權限。

遠端控制平台，提供分別位於中壢中央大學、以及花蓮東華大學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，其中被動掃頻有以下三種觀測模式可以選擇，分別為：全日少頻觀測查詢、瞬時全頻觀測設定、全日全頻設定查詢。圖 十一為遠端控制平台之架構圖。

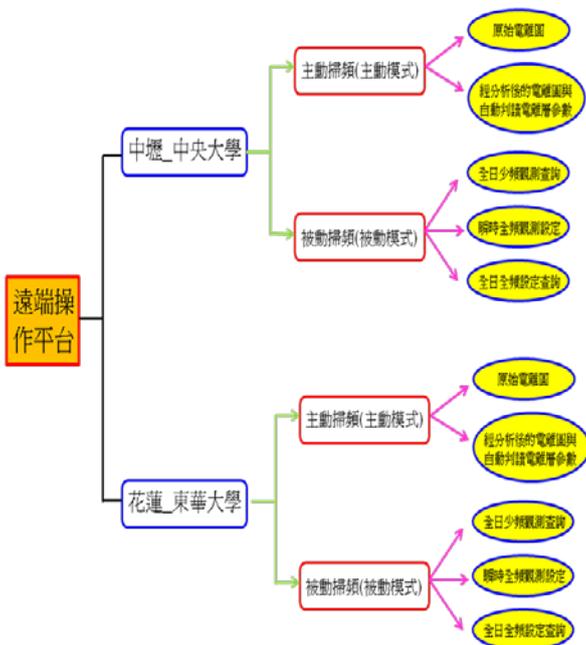


圖 十一、 遠端控制平台之架構圖

3. 動態式電離層觀測系統遠端操作平台短期訓練課程

本研究可於遠端透過網路服務，從平台與資料庫中下載過去主動式觀測電離圖與高頻無線電波通訊MUF與LUF參數，以及被動式觀測高頻無線電波環境全頻域 24 小時分時監測資料，同時可以遠端操作被動式監測模式，即時下傳與刪除監測結果，已達即時監聽、資料保密效果。本研究亦包含不定期舉辦短期訓練課程，訓練相關人員使用動態式電離層觀測系統遠端操作平台與資料庫。研究期間亦製作工作報告”台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” [張雅莉與蔡龍治，2010]，歡迎索取

參考文獻

Chen, L., H. D. Chang, and J. Zhang, 1994: Fuzzy subfiber and its application to seismic lithology

- classification, *Info. Sci.*, 1, p77-95.
- Grubb, R.N., Livingston, R., Bullett, T.W. A new general purpose high performance HF Radar. XXIX URSI General Assembly, Chicago, IL, USA, 2008.
- Hsiao, T. Y., L.-C. Tsai, and F. T. Berkey, The initial results of the Chung-Li Dynasonde for the RF environment surveillance and ionospheric observations, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* (SCI Journal), 19 (5), 515-524, 2008.
- Kelley, M. C., 1989: The Earth's ionosphere, Academic Press.
- Rosenfeld, A., 1979: Fuzzy digital topology, *Inform & Control*, 40, p76-87.
- Rosenfeld, A., 1983: On connectivity properties of grayscale pictures, *Pattern Recognition*, 16, p47-50.
- Tsai, L.-C., F. T. Berkey, and G. S. Stiles, On the derivation of an improved parameter configuration for the Dynasonde, *Radio Sci.*, 28 (5), 785-793, 1993.
- Tsai, L.-C., F. T. Berkey, and G. S. Stiles, The true-height analysis of ionograms using simplified numerical procedures, *Radio Sci.*, 30 (4), 949-959, 1995.
- Tsai L.-C., F. T. Berkey, and G. S. Stiles, Derivation and error analysis of echo phase parameters for the dynasonde, *Radio Sci.*, 32 (2), 557-566, 1997.
- Tsai, L.-C., and F. T. Berkey, Ionogram analysis using fuzzy segmentation and connectedness techniques, *Radio Sci.*, 35(5), 1173-1186, 2000.
- Wakai, N., H. Ohya and T. Koizumi, 1987: Manual of Ionogram Scaling, 3rd Version, Radio Research Laboratory.
- Wright, J. W., and M. L. V. Pitteway, Real-time data acquisition and interpretation capabilities of the dynasonde, 2, Determination of magnetoionic mode and echolocation using a small spaced receiving array, *Radio Sci.*, 14(5), 827-835, 1979.
- Zadeh, L. A., 1965: "Fuzzy sets", *Inform & Control*, 8, p338-353.
- Zadeh, L.A., 1975:Fuzzy Sets and Their Application to Cognitive and Decision Process(Academic Press,London), p1-39.
- Zheng, Chong-you, 1984: Fuzzy path and fuzzy connectedness, *Fuzzy Sets and Systems*,14, p273-280.
- 徐千雅，2011，高頻無線電波電離層回波強度估計，碩士論文，國立中央大學。
- 張雅莉，蔡龍治，2010 台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。

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表 未發表之文稿 撰寫中 無

專利： 已獲得 申請中 無

技轉： 已技轉 洽談中 無

其他：（以 100 字為限）

1. Tsai, L.-C., C. H. Liu, T. Y. Hsiao, and J. Y. Huang, A near real-time phenomenological model of ionospheric electron density based on GPS radio occultation data, *Radio Science*, 44, doi:10.1029/2009RS004154, 2009.
2. Tsai, L.-C., C. H. Liu, and J. Y. Huang, Three-dimensional and numerical ray tracing on a phenomenological ionospheric model, *Radio Science*, doi:10.1029/2010RS004359, 2010.
3. Tsai, L.-C., K. Kevin Chang, and C. H. Liu, GPS radio occultation measurements on ionospheric electron density from low Earth orbit, *Journal of Geodesy (SCI Journal)*, doi:10.1007/s0019001104769, 2011.

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

透過相關台灣上空中高頻電波通信頻率管理與環境監測計畫，可以達到環境電波的監測，並利用東台灣花蓮東華大學的動態式電離層觀測儀，結合中大動態式電離層觀測儀，以兩站法配合電離層模式找出特定中高頻率的通訊發射站位置，判斷其中高頻率通訊是否合法。亦可以藉由經常性電離層遙測，得到即時電離層狀況，而當我們需要做中高頻通訊傳播的時候，可依即時電離層狀況同時避免監測結果所得的干擾頻率，找出適當的頻率來做通訊傳播。

國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2012/02/14

國科會補助計畫	計畫名稱: 高頻無線電波通信效益提升與頻率管理(I)
	計畫主持人: 蔡龍治
	計畫編號: 100-2623-E-008-008-D 學門領域: 電子與資訊系統
無研發成果推廣資料	

100 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：蔡龍治		計畫編號：100-2623-E-008-008-D					
計畫名稱：高頻無線電波通信效益提升與頻率管理(I)							
成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數(含實際已達成數)	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	9	0	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力 (本國籍)	碩士生	2	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	1	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	1	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	5	0	100%		
		專書	0	0	100%		章/本
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力 (外國籍)	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

<p>其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	<p>無</p>
--	----------

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表 未發表之文稿 撰寫中 無

專利： 已獲得 申請中 無

技轉： 已技轉 洽談中 無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

本研究可於遠端透過網路服務，從平台與資料庫中下載過去主動式觀測電離圖與高頻無線電波通訊 MUF 與 LUF 參數，以及被動式觀測高頻無線電波環境全頻域 24 小時分時監測資料，同時可以遠端操作被動式監測模式，即時下傳與刪除監測結果，已達即時監聽、資料保密效果。本研究亦包含不定期舉辦短期訓練課程，訓練相關人員使用動態式電離層觀測系統遠端操作平台與資料庫。研究期間亦製作工作報告'台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' [張雅莉與蔡龍治，2010]