

財團法人國家實驗研究院國家太空中心

全球定位科學應用研究委託案(3/3)

101年度「全球定位科學應用研究中心」

期末報告

工作項目(4.1)：台灣自主的電離層監測模式(第二版)報告（III）

期末報告計畫名稱：以掩星資料應用於太空天氣分析模擬等前置技術發展：發

展台灣自主的電離層監測模式

執行期間： 2012/02/18~2013/02/17

分項工作管理人：蔡龍治

參與人員：

中 華 民 國 1 0 2 年 0 2 月

一、摘要

福衛三號即在利用六顆低軌道衛星接收 GPS 衛星訊號，電波訊號傳播過程中，在經過電離層或大氣層時，由於傳播介質的改變，所以造成電波訊號產生一偏折角度或電波延遲，此即為電波掩星現象。系統所測得的資料可推算出偏折角度或電離層全電子含量，再經由 Abel 積分轉換而換算成電離層中的電子密度對高度的剖面資料，進而進行全球電離層模式數值分析。本計畫目的在應用福衛三號掩星觀測資料建立全球電離層電子密度估計與四維數值模式系統，並應用電離層數值模式於觀測全球電離層氣象與相關高頻天波傳播研究。本子計畫分層目標分別為：(1) 利用經驗正交函數(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析於福衛三號掩星所得電離層垂直電子密度資料凝合，用以過濾不規則垂直電子密度資料，同時挑選正常垂直電子密度資料用以進行以下全球三維模式數值分析；(2) 利用於挑選所得電離層正常垂直電子密度資料進行全球三維模式數值分析方法：二維球面諧波函數最佳化加上垂直雀普曼(Chapman)函數最佳化，用以建立即時全球電離層模式系統；(3) 利用全球電離層三維數值模式系統建立高頻天波傳播途徑預估與電波強度相關評估。

二、前言

本計畫目的在應用福衛三號掩星觀測資料建立全球電離層電子密度估計與四維數值模式系統，用於研究全球電離層氣象與相關高頻天波傳播研究。本項計畫主持人已發展出一橫向不均勻電離層電子密度反演技術，並確實掌握相關的資料分析與驗證能力，達到技術自主的地步。計劃使用國內中壢站與花蓮站動態式電離層觀測儀及全球電離層觀測儀設備，驗證 COSMIC 反演電離層資料，以確定資料的正確性。除此之外，計畫主持人亦已發展出電離層參數映射技術，根據適當的球諧函數(Spherical Harmonic function)將 COSMIC 電離層參數做全球分布的展開，以近即時監測並研究電離層全球的動態變化，建立台灣第一套自主的全球電離層數值模式，我們將此全球電離層數值模式命名為 TWIM (the TaiWan Ionospheric numerical Model)，我們將此 TWIM 數值模式持續發展與改進。本子計畫分層目標分別為：

(1) 利用經驗正交函數(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析於福衛三號掩星所得電離層垂直電子密度資料凝合，用以過濾不規則垂直電子密度資料，同時挑選正常垂直電子密度資料用以進行以下全球三維模式數值分析；(2) 利用於挑選所得電離層正常垂直電子密度資料進行全球三維模式數值分析方法：二維球面諧波函數最佳化加上垂直雀普曼(Chapman)函數最佳化，用以建立即時全球電離層模式系統；(3) 利用全球電離層三維數值模式系統建立高頻天波傳播途徑預估與電波強度相關評估。

三、成果報告

3.1 電離層垂直電子密度經驗正交函數(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析

福衛三號 FORMOSAT-3 /COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate)則於 2006 年 4 月 15 日於美國加州升空，並執行新的 GPS 電波掩星觀測任務，其衛星軌道高度為 700~800 公里，軌道面與赤道面傾角為 70 度，衛星每繞行地球一週約 100 分鐘，未來利用六顆低軌衛星(每顆衛星上之 GPS 接收器有兩個掩星觀測天線)提供每天超過 2500 筆的掩星觀測資料，圖 2-1. 顯示福衛三號系統(FORMOSAT-3/COSMIC)自 2006 年至今每日所得電波掩星觀測資料數(Level 1b)以及各子衛星(FM1..FM6) 所得垂直電子密度資料數，由於 GPS 衛星和 LEO 衛星在軌道高度上的差異，使得當由 GPS 衛星發射信號到 LEO 衛星時，電離層和大氣層會遮蔽到傳播信號，造成在傳播路徑上介質的改變，因而產生一偏折角度。這其中包含了電子密度、折射係數和偏折角度之間的相關性。事實上，以 GPS 載波的頻率，即使在電離層變化最激烈的狀態下，由電離層及大氣層所造成的偏折角度仍然是相當微小的，當 GPS 信號通過電離層而產生偏折角度的傳播路徑，和直線的傳播路徑相比較時，其偏折距離不過是數公里甚至更少，此偏折距離遠小於傳統之電離層電子密度對垂直高度的高度等級。甚至是在白天或太陽極大時，在 F 層（偏折角度最大）不論是以 L1 或 L2 的載波頻率傳播，其偏折角度均不會超過 0.03 度[Schreiner et al., 1999]。因此，UCAR 對於應用在無線電波掩星觀測反演的的方法，是直接將其偏折角度忽略不計，以直線為其傳播路徑。然而，在真實狀態下，對於 L1 和 L2 信號的傳播路徑是不同的，而且分別求得的全電子含量(Total Electron Content，簡稱 TEC)亦有些許的差距。但由於直接以直線為其傳播路徑，故 L1 和 L2 信號的傳播路徑是相同的，因此不論是用相位延遲量 S_1 或 S_2 來計算，所得到的 TEC 皆相同。而在沿著傳播路徑上，TEC 的計算如下：

$$T = \int n_e dl = -\frac{f^2}{40.3} \int (n-1) dl = -\frac{f_1^2 S_1}{40.3} = -\frac{f_2^2 S_2}{40.3} = -\frac{(S_1 - S_2) f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)}$$

其中 $T(\text{el/m}^2)$ 是沿著傳播路徑的 TEC； $n_e(\text{el/m}^3)$ 是電子密度； S_1 、 $S_2(\text{m})$ 則分別是對應於 L1 及 L2 的相位延遲量。使用上式中雙頻的 GPS 信號（最右邊那一項）於 TEC 的計算，便可由相位延遲量計算而得到 TEC，此法可以直接將軌道誤差和時鐘誤差自動去除，不再需要額外的地面站資料，故可以讓反演的過程更為即時完成。在直線傳播路徑的假設下，TEC 對電子密度的關係如下：

$$T(r_t) = \left[\int_{r_t}^{r_{GPS}} + \int_{r_t}^{r_{LEO}} \right] \frac{r n_e(r)}{\sqrt{r^2 - r_t^2}} dr .$$

應用 Abel 積分轉換，在球對稱的假設下，電子密度可以轉換成如下的積分式：

$$n_e(r_t) = -\frac{1}{\pi} \int_{r_t}^{r_{LEO}} \frac{dT(r)/dr}{\sqrt{r^2 - r_t^2}} dr .$$

再將已求得的 TEC 資料代入上式中，便可獲得電子密度。至西元 2012 年 12 月，福衛三號電離層垂直電子密度反演成功率可高於 75%。

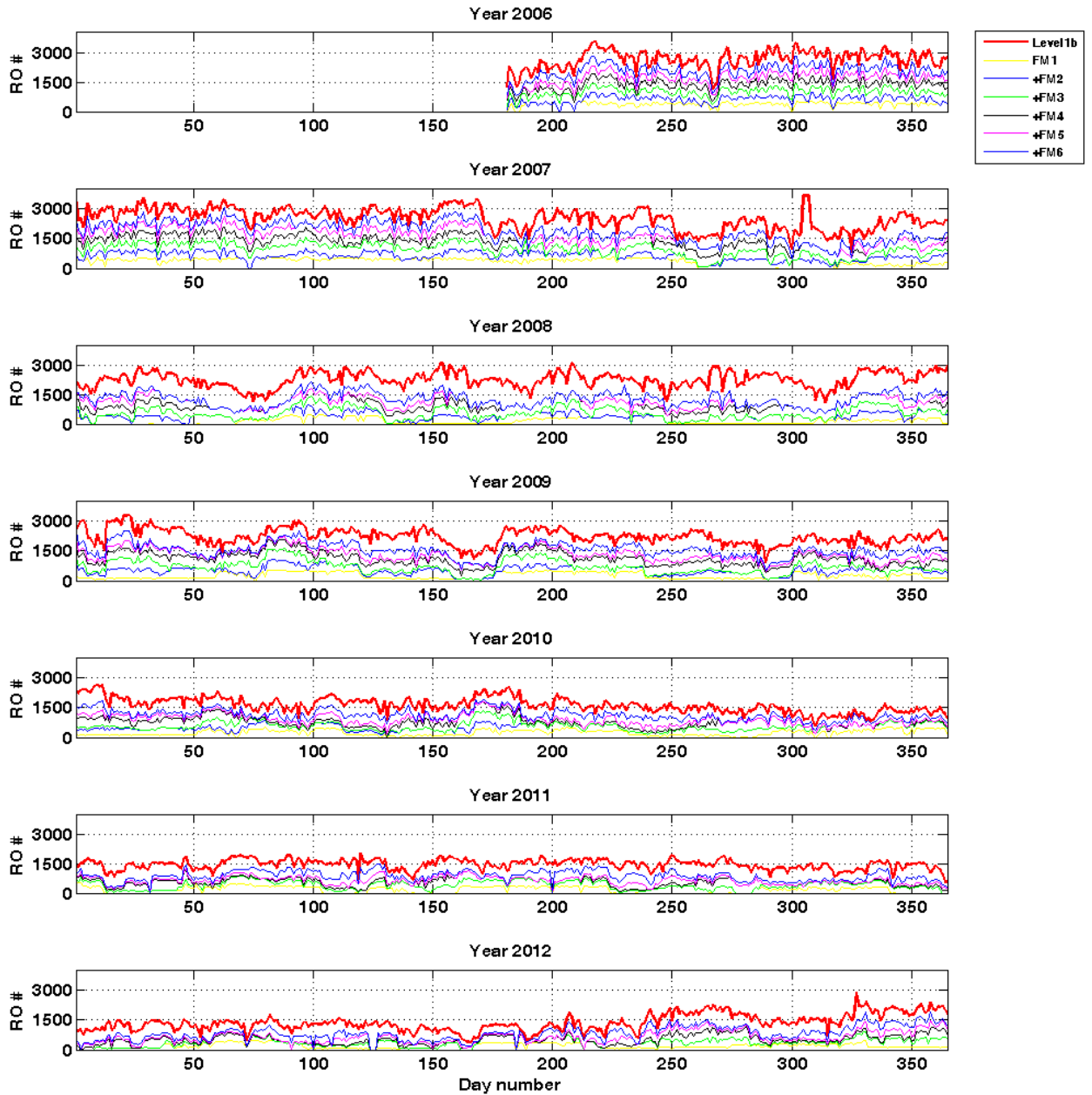


圖 3-1. 福衛三號(FORMOSAT-3/COSMIC) 自 2006 年至今每日所得電波掩星觀測資料數 (Level 1b)以及各子衛星(FM1..FM6)所得垂直電子密度資料數.

本子計畫將利用經驗正交函數(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析於福衛三號掩星所得電離層垂直電子密度資料凝合，用以過濾不規則垂直電子密度資料，其中垂直電子密度資料經驗正交函數(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析如下：

$$f_N(\theta, \lambda, g(\theta, \lambda) \times h) = foF2(\theta, \lambda) \left(\overline{f_N(h)} + \sum_{i=1}^n a_i(\theta, \lambda) \times E_i(h') \right)$$

其中 $g()$ 和 $a_i()$ 為球面諧波函數， $E_i(h')$ 為垂直經驗正交函數，圖 3.2 為一 FormoSat-3/ COSMIC 掩星觀測電離層垂直電子密度分佈與相關經驗正交函數分析後所得標準化平均垂直電子密度分佈與一組相關經驗正交函數圖。透過經驗正交函數(EOF)分析，我們可以把 FormoSat-3/ COSMIC 掩星觀測電離層垂直電子密度分佈分類，資料種類包含

- (1) 正常垂直電子密度分佈(見圖 3.3)及其經驗正交函數(EOF)分析(見圖 3.4)
 - (2) 含散塊 E 層垂直電子密度分佈(見圖 3.5)及其經驗正交函數(EOF)分析(見圖 3.6)
 - (3) 不規則垂直電子密度分佈(見圖 3.7)及其經驗正交函數(EOF)分析(見圖 3.8)
 - (4) 不正常強 E 層垂直電子密度分佈(見圖 3.9)及其經驗正交函數(EOF)分析(見圖 3.10)
 - (5) 不正常強 F1 層垂直電子密度分佈(見圖 3.11)及其經驗正交函數(EOF)分析(見圖 3.12)
- 同樣由利用經驗正交函數(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析於福衛三號掩星所得電離層垂直電子密度資料凝合，用以挑選正常垂直電子密度資料用以進行以下全球三維模式數值分析，得到全球電離層模式系統。

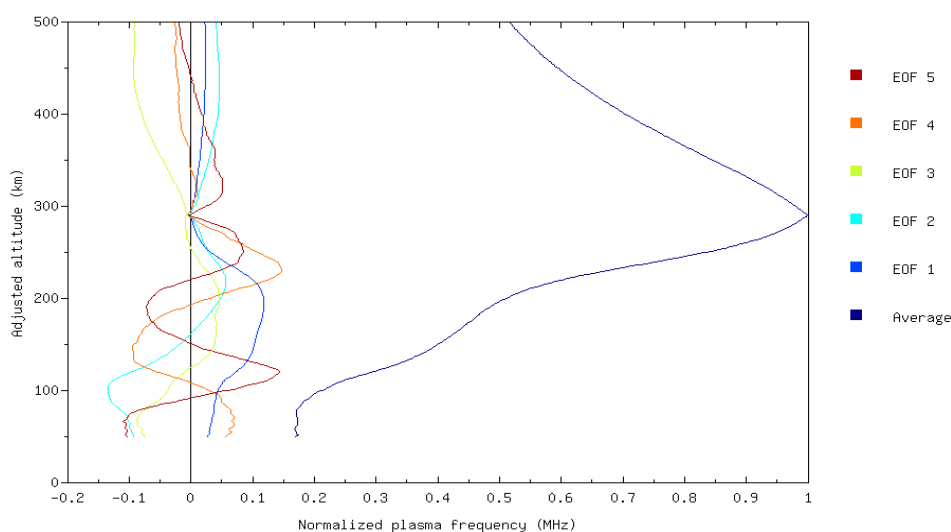


圖 3.2. FormoSat-3/ COSMIC 掩星觀測垂直電子密度分佈相關經驗正交函數分析後所得標準化平均垂直電子密度分佈與一組相關經驗正交函數圖。

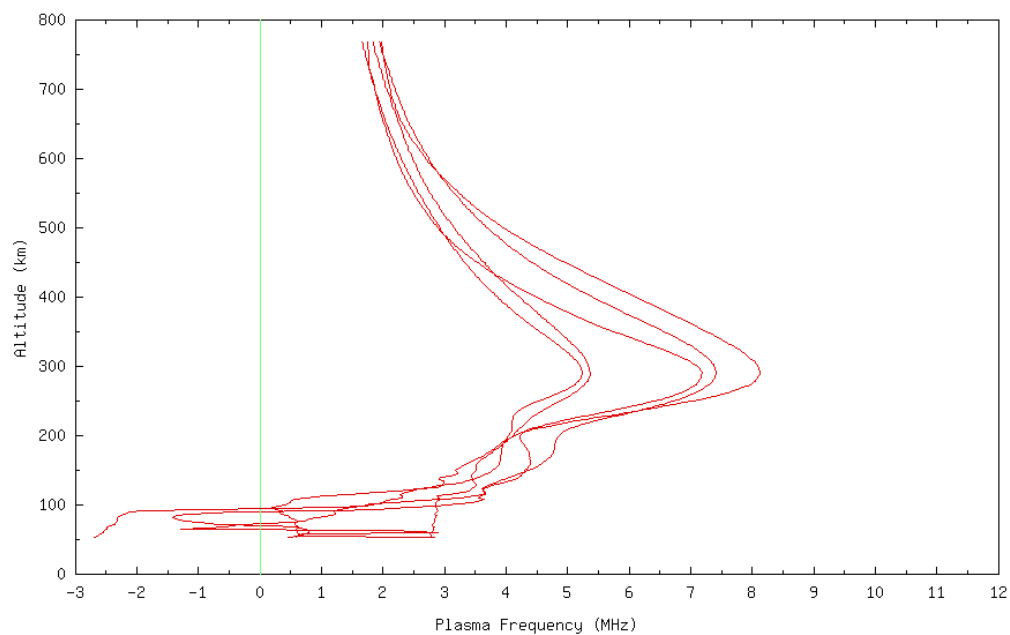


圖 3.3. 正常垂直電子密度分佈

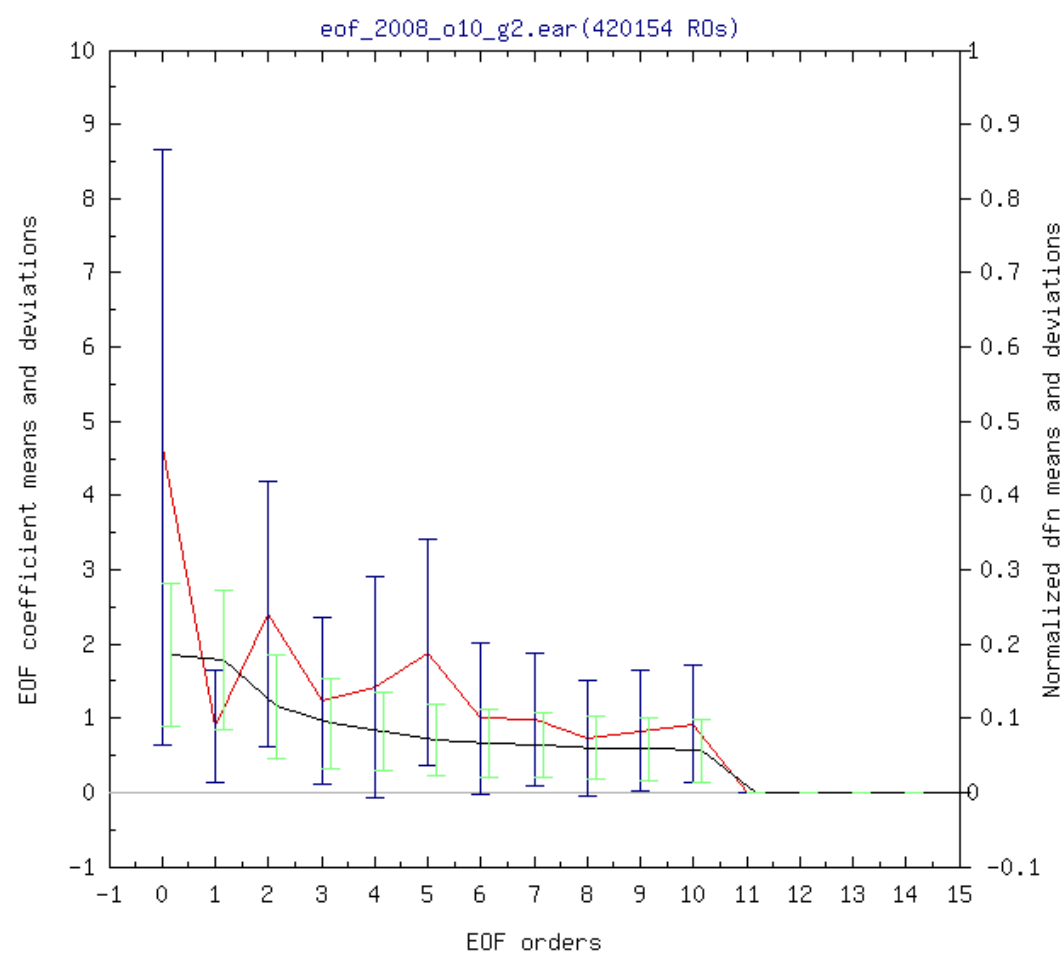


圖 3.4. 正常垂直電子密度分佈其經驗正交函數(EOF)分析

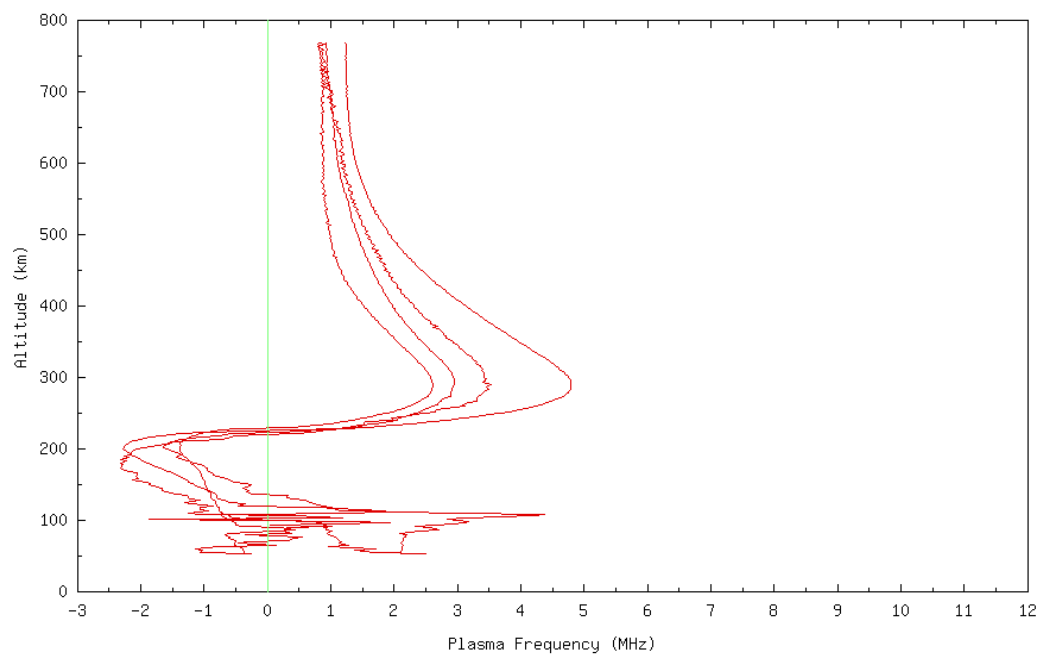


圖 3.5. 含散塊 E 層垂直電子密度分佈

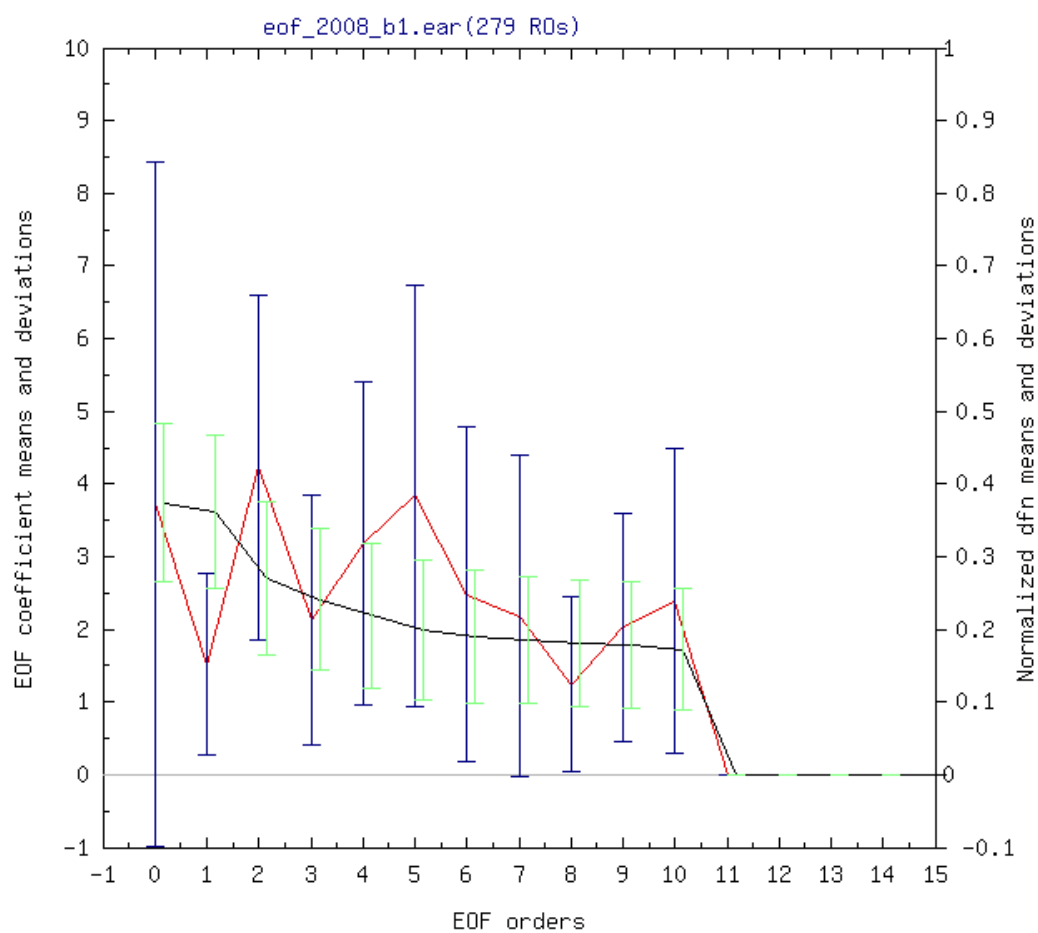


圖 3.6. 含散塊 E 層垂直電子密度分佈其經驗正交函數(EOF)分析

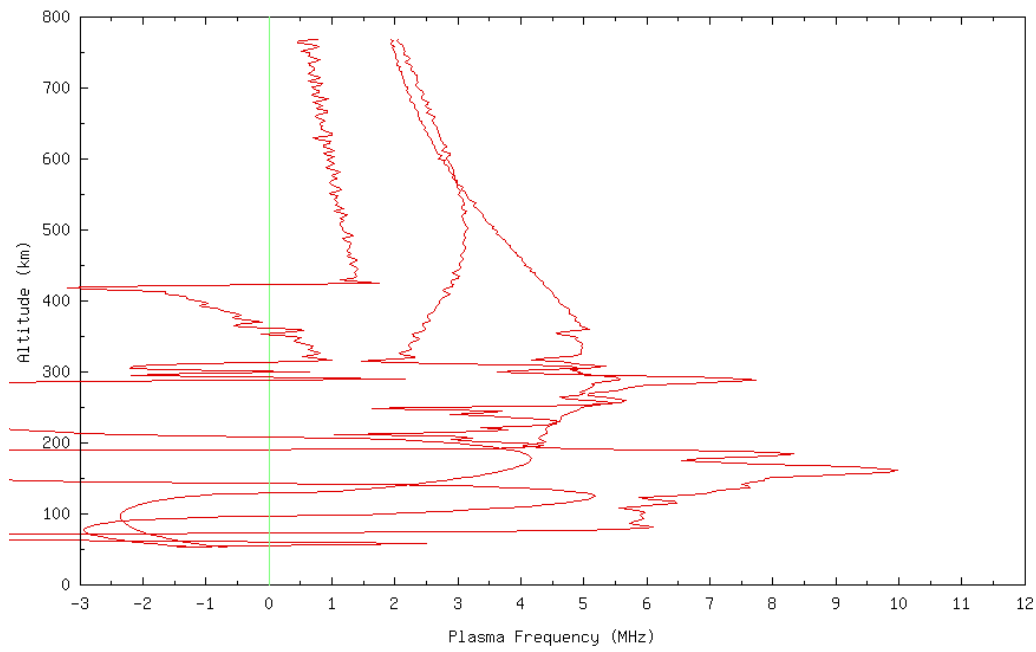


圖 3.7. 不規則垂直電子密度分佈

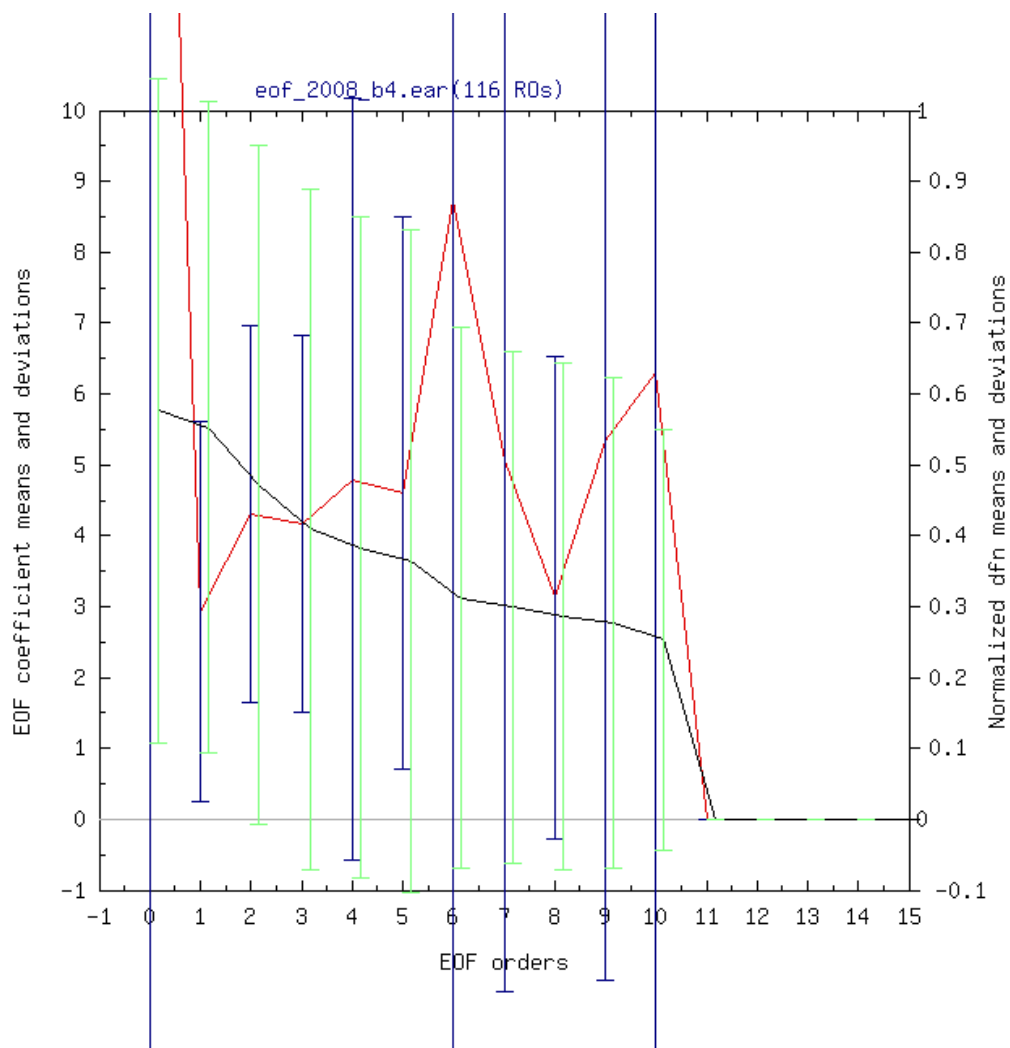


圖 3.8. 不規則垂直電子密度分佈其經驗正交函數(EOF)分析

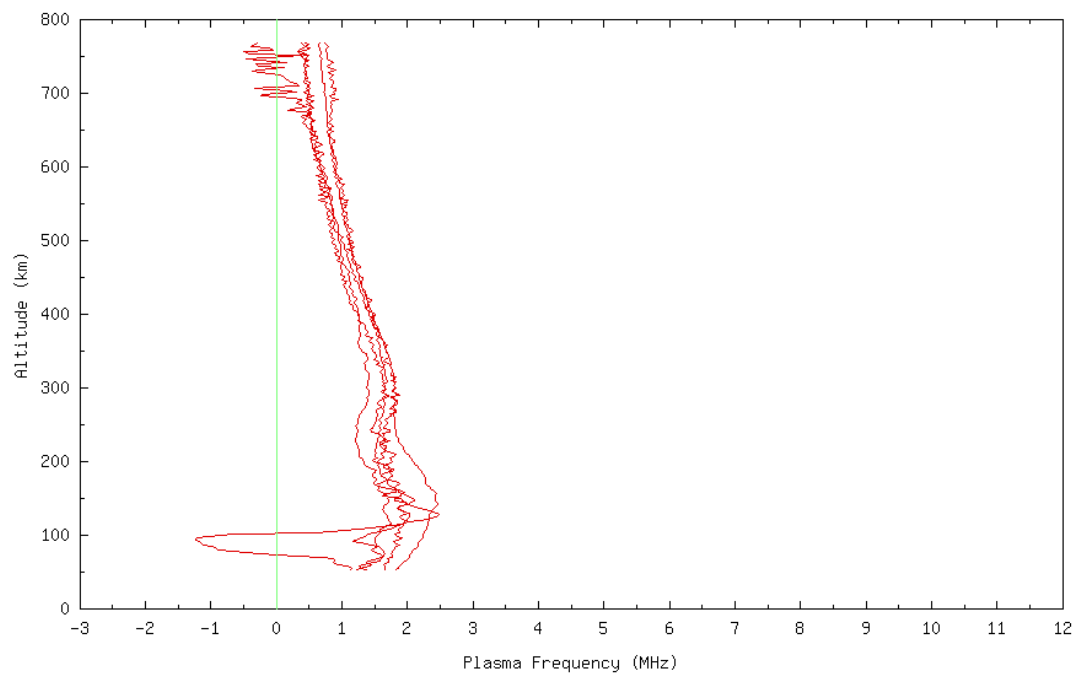


圖 3.9. 不正常強 E 層垂直電子密度分佈

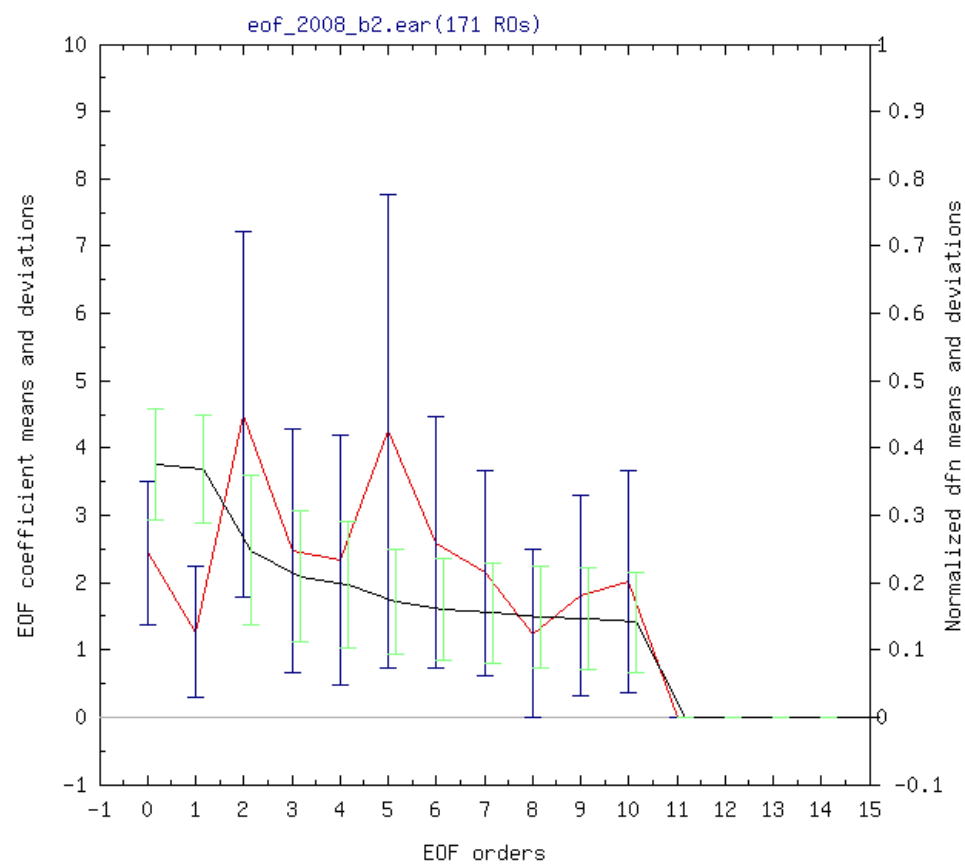


圖 3.10. 不正常強 E 層垂直電子密度分佈其經驗正交函數(EOF)分析

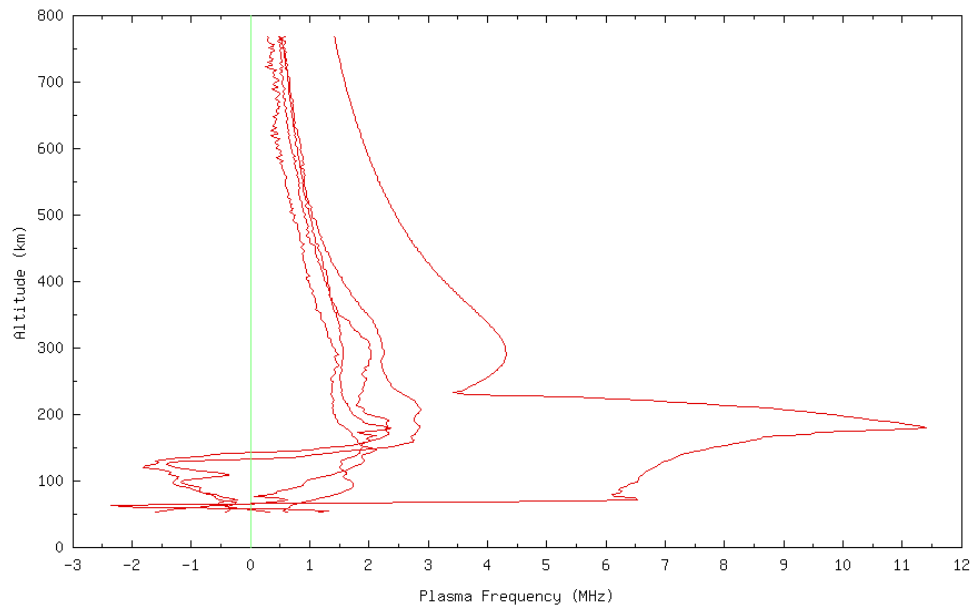


圖 3.11. 不正常強 F1 層垂直電子密度分佈

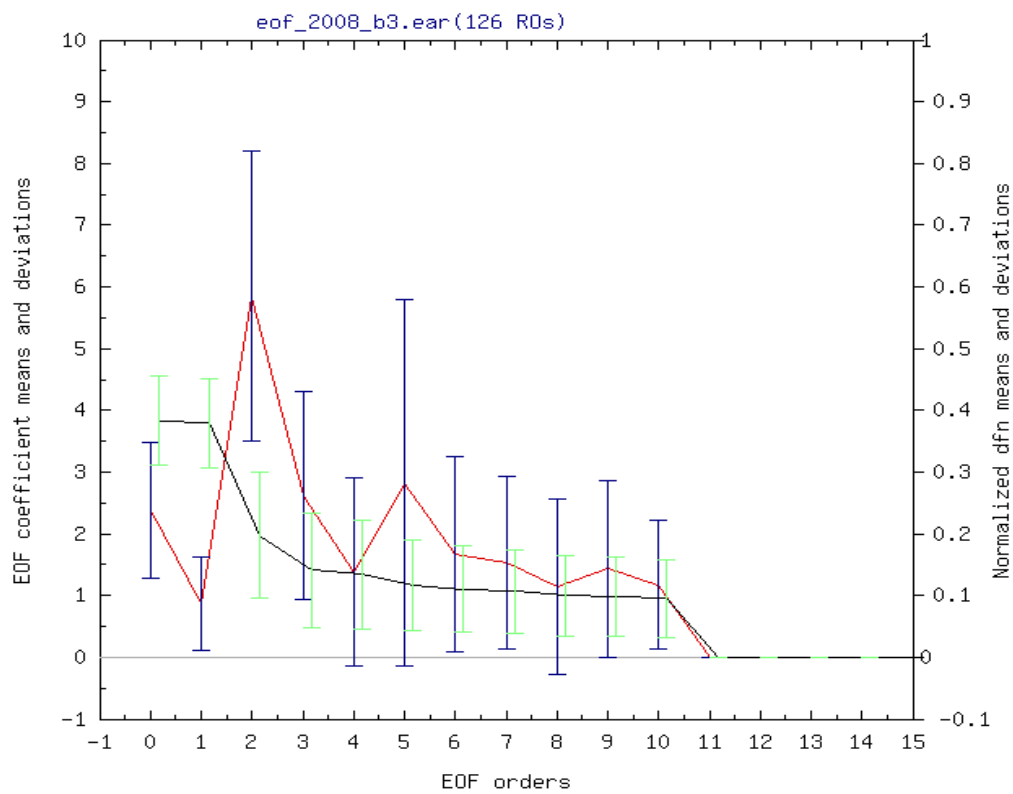


圖 3.12. 不正常強 F1 層垂直電子密度分佈其經驗正交函數(EOF)分析

3.2 經驗正交函數處理後 TWIM 可信度分析

為了了解經驗正交函數處理後 TWIM 可信度，比較原 TWIM，同樣由利用經驗正交函數 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 分析於福衛三號掩星所得電離層垂直電子密度資料凝合，用以挑選正常垂直電子密度資料進行全球三維模式數值分析，得到另一全球電離層 TWIM 模式系統。我們首先將 TWIM 中所得到的資料與單站電離層觀測儀 (ionosonde) 的觀測結果做比較，做為比較對象是取用在印尼 Kwajalein island (9°N, 167°E) 的電離層觀測儀。比對時間是由 2006 年七月至 2008 年十月。但由於從電離圖 (ionograms) 中無法直接且明確的定義 D 層、F1 層以及 E 層和 F2 層的峰值高度，所以只對 *foE* 與 *foF2* 做比對，其結果如圖 3.13。圖中橫軸為電離層觀測儀所得電漿頻率，縱軸則是 TWIM 的對應值，其中黑色斜線為 1:1 的基準線。圖中藍色交叉點與黑色點分別為 *foE* 與 *foF2* 的 TWIM 跟電離層觀測儀比對結果。可以發現 *foE* 與 *foF2* 皆是隨著基準線分佈，表示 TWIM 與電離層觀測儀結果有相當的一致性。為了定義兩者之間的誤差值，這裡利用了兩種誤差估計的方式，第一種為均方根誤差 (RMS error) 另一種則是平均相對誤差 (mean relative error)。均方根誤差可以了解各頻率平均的誤差大小值單位為兆赫 (MHz)；而平均相對誤差則是表示各頻率的誤差程度單位為百分比 (%)。其兩者表示式如下：

$$\text{RMS error} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{dfc})_i^2}{n}}$$

$$\text{Mean relative error} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(\text{dfc})_i}{\text{fc}_i}}{n}$$

其中 n 是總共的比較數， fc 是電離層觀測儀所觀測到的峰值頻率， dfc 則是 TWIM 的峰值頻率與電離層觀測儀觀測值的差值，從圖 3.13 結果中我們得知 TWIM 與印尼 Kwajalein island 電離層觀測儀 *foF2* 與 *foE* 的均方根誤差 (黑色與藍色曲線) 皆在 1MHz 以下；而 *foF2* 與 *foE* 的平均相對誤差 (紅色與綠色曲線) 在 4MHz 以下較大約是在 -20% 至 50% 之間，但在 4MHz 以上誤差皆小於正負 10% 以內，表示 TWIM 在電漿濃度較高之白天時有相當好的可信度。

在單一地區上 TWIM 對不同電漿濃度觀測的可信度分析後，我們接著以 TWIM 中所得到的

資料與全球近 60 站電離層觀測儀的觀測結果做比較，以全球近 60 站電離層觀測儀的 foF2 與 foE 觀測結果為基準，對 TWIM 的 foF2 與 foE 進行平均誤差與均方根誤差平均計算。無與有利用經驗正交函數(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析於挑選正常垂直電子密度資料進行全球三維模式數值分析結果分別為圖 3.13 與圖 3.14，圖中黑色點為 TWIM 對電離層觀測儀觀測值的 foF2 平均誤差；藍色十字點則為 foE 的平均誤差，其中 foF2 平均誤差在各緯度皆分佈在正負 0.5MHz 內，表示無與有利用經驗正交函數(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析 TWIM 之 foF2 在全球觀測結果擁有良好的可信度。而無利用經驗正交函數(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析 foE 平均誤差較大，低緯度地區約為-0.5MHz，中高緯度地區約為-0.5~-1.0 MHz，表示 TWIM foE 在全球觀測結果低估約 0.5MHz 至 1MHz 之間，而有利用經驗正交函數(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析所得 TWIM 的 foE 則大幅改進。

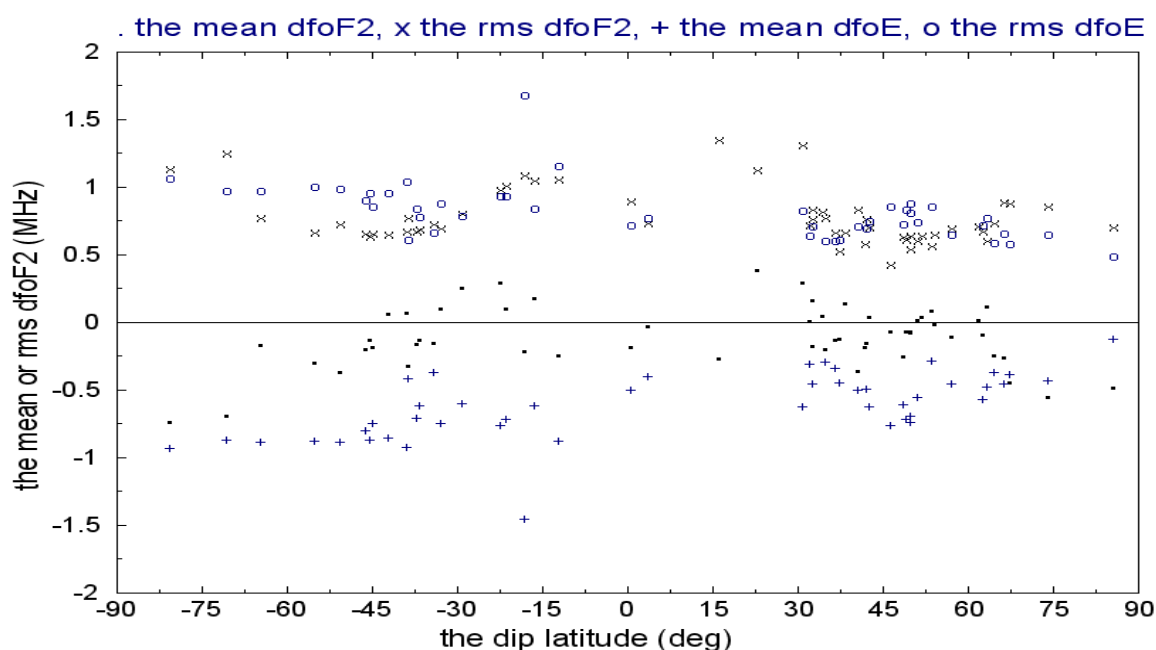


圖 3.13. 無利用經驗正交函數分析，全球不同緯度上 TWIM 與電離層觀測儀(ionosonde)之 foF2 與 foE 的平均誤差與均方根誤差結果圖。

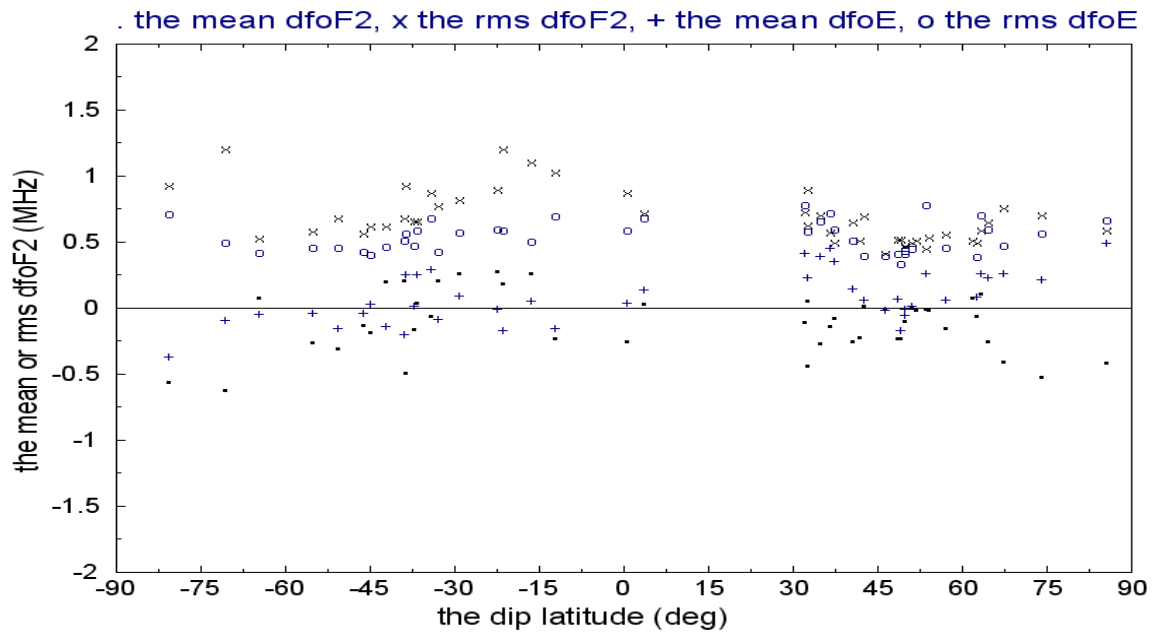


圖 3.14. 有利用經驗正交函數分析，全球不同緯度上 TWIM 與電離層觀測儀(ionosonde)之 foF2 與 foE 的平均誤差與均方根誤差結果圖。

3.3 加入全球電離層觀測資料，用以改進臺灣自主電離層數值模式(TWIM)

臺灣自主電離層監測模式(the TaiWan Ionospheric Mode 1, TWIM)是由計畫主持人於 2009 年所開發制作，利用我國福衛三號 FormoSat-3/COSMIC 中 GPS 掩星觀測所提供的垂直電漿剖面資料所製作出的監測模式 (numerical model)，為純粹採用實際觀測資料所製成的經驗模式 (empirical model)，可提供從 2007 年至今全球電離層 D、E、F1、F2 層的相關資料。TWIM 可以隨使用者的需求，提供不同時間及空間的電離層各層峰值 (peak) 之電漿頻率、峰值高度、以及其標尺高等數值，以作為實際三維電離層電子密度環境的參考；經簡化的計算量能快速且方便使用於其他應用上，如波傳播預測、電離層斷層掃描…等電離層基礎研究資料。

TWIM 方法：適時性二維球面諧波 + 垂直雀普曼(Chapman)函數模式

我們可由福衛三號 GPS 掩星觀測反演的電離層垂直電子密度資料，利用雀普曼函數做配

適，其中雀普曼函數是單純表示電離層光化學離化結果的表示式，先以雀普曼函數對濃度最大高度進行配適，由其配適的結果與原反演的電離層垂直電子密度資料相扣，若掩星觀測對配適結果在某高度有明顯的高於時，則再對此高度進行再次配適，並以高度區間來定義此次配適結果為何層。相關雀普曼函數對垂直電子密度配適公式如下：

$$N_e(\theta, \lambda, h, t) = \sum_{i=1}^n N_{e\max}(\theta, \lambda, t) \times e^{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{h-h_m(\theta, \lambda, t)}{H(\theta, \lambda, t)} - e^{-\frac{h-h_m(\theta, \lambda, t)}{H(\theta, \lambda, t)}} \right)}$$

透過數值分析計算，我們可以得到電離層電子密度隨高度的分佈，至少分為四個層次：F2層、F1層、E層、D層。其中上公式 $n=4$ 分別代表電離層 F2, F1, E 層和 D 層，而 $N_{e\max}()$, $h_m()$, 和 $H()$ 分別代表電離層各層次中臨界電子密度, 高度, 與電離層尺度高度函數。因此我們可由福衛三號 GPS 掩星觀測反演電離層垂直電子密度資料，經過雀普曼函數配適分析，可得到該觀測 12 個電離層參數($foF2$, $hmF2$, $HF2$, $foF1$, $hmF1$, $HF1$, foE , hmE , HE , foD , hmD , and HD) 資料。

在垂直電子密度雀普曼函數配適分析後，以 TWIM 中所得到的資料，再加入全球近 60 站電離層觀測儀的觀測結果，對 TWIM 與全球近 60 站電離層觀測儀的 $foF2$ 與 foE ，我們進行相關電離層參數(如 $foF2$, $hmF2$, $HF2$, $foF1$, $hmF1$, $HF1$, foE , hmE , HE , foD , hmD , and HD) 二維全球分佈分析，我們可透過相關數值映射(numerical mapping)分析，使用變數分離與 Gram-Schmidt 正交化過程得到的 Laplace 方程式解為 spherical harmonics 方程式：

$$U_{nm}(\theta, \lambda) = \sqrt{\frac{2n+1}{2\pi} \frac{(n-m)!}{(n+m)!}} P_n^m(\cos \theta) \cos m\lambda, \text{ and}$$

$$V_{nm}(\theta, \lambda) = \sqrt{\frac{2n+1}{2\pi} \frac{(n-m)!}{(n+m)!}} P_n^m(\cos \theta) \sin m\lambda$$

$$(n = 0, 1, 2, \dots; m = 0, 1, 2, \dots),$$

上式中， m 為級數 (order); n 為次數 (degree)。各層參數在二維經緯度上的變化可用 $U_{nm}(\theta, \lambda)$ 與 $V_{nm}(\theta, \lambda)$ 來表示，而其中 P_n^m 即為 Legendre 正交序列多項式。在本計畫中，我們使用 $\cos \lambda$ 形式之多項式配適(fitting)能將資料均勻地從赤道拉到極區之效用，而資料以 $\cos \lambda$ (非 λ) 的形式將能更均勻地分佈。此外，在 λ 高次時有較大的絕對值，因此以 λ 表示

之多項式在極區比在赤道來的不穩定；相比之下，以 $\cos \lambda$ 表示的多項式可減少最大誤差，而且在靠近極區與赤道時，有著相同的穩定度，因此我們在做多項式配適時採用 $\cos \lambda$ 函數而非 λ 函數。多次利用 FORMOSAT-3 /COSMIC 資料分析，我們得到級數為 3 以及次數為 40 之最小平方近似多項式配適經驗值。此經過垂直雀普曼函數式配模分析與電離層各層參數適時性二維球面諧波數值映射分析後，TWIM 即可以提供全球三維電離層電子密度分佈模式。

事實上電離層電子密度與電漿頻率可表示為：

$$f_p^2 = \frac{N_e e^2}{4\pi^2 m \epsilon_0}$$

其中 N_e 為電子密度， e 為電荷， m 為電子質量(Kg)， ϵ_0 為介電係數(F/m)，將 $e=1.602 \times 10^{-19}$ 庫倫， $m=9.107 \times 10^{-31}$ 公斤， $\epsilon_0=8.854 \times 10^{-12}$ 代入可得

$$f_p^2 = 80.62 N_e$$

在時間類型上 TWIM 主要分為以全球標準時間 (UT) 類型或以全球相同當地時間 (LT) 類型，在此兩種時間類型下，TWIM 皆提供了電離層 D、E、F1 及 F2 各層之峰值電漿頻率 (f_c)、峰值所在高度 (h_m) 及標尺高 (H) 等三項參數。本計畫已完成全球三維 TWIM 使用平台：<http://isl.csr.sr.ncu.edu.tw>(參考圖 3.15)，可以隨使用者的需求，提供不同時間及空間尺度的全球三維電離層電漿頻率分佈、各層峰值 (peak) 之電漿頻率、峰值高度、以及其標尺高等數值，以作為實際電離層環境的參考；經簡化的計算量能快速且方便使用於其他應用上，如波傳播預測、電離層斷層掃描…等，並利用此全球電離層模式決定點對點中高頻無線電通訊最高可用頻率(MUF)與最低可用頻率(LUF)。

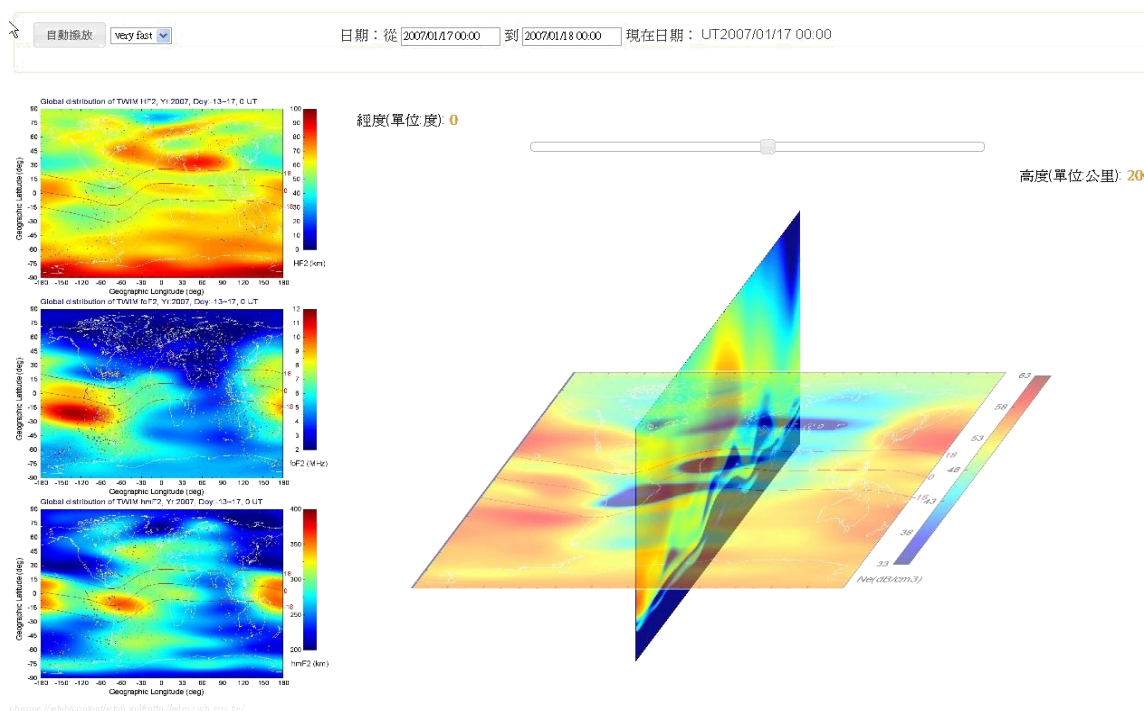


圖 3.15. 全球三維 TWIM 使用平台：<http://isl.csr.sr.ncu.edu.tw>，可以隨使用者的需求，提供不同時間及空間尺度的電離層三維電漿頻率分佈、各層峰值（peak）之電漿頻率、峰值高度、以及其標尺高等數值

3.4 電離層監測模式 TWIM 應用於無線電波傳播途徑分析

電離層監測模式 TWIM 應用於無線電波傳播途徑分析基本理論最主要架構在一地面發射站發射高頻電波至電離層後，經電離層反射至地面，而被中大電離層動態式接收儀所接受的電波而討論。這也就是一次回波機制的地面發射站定位測量。若有多次回波的情形，可依照一次回波定位的理論再加以重複推演得到，然而二次或者多次回波定位，它的地面發射站定位誤差會隨著回波機制的次數而增加。本研究計畫將於已知國際高頻信號標無線電波發射站位置、無線電波頻率、電波發射方位角與仰角、與電波極化(正常極化波或異常極化波)，分析得到不同電波傳播途徑，同時也可經無線電波測量波臨角(Angle of Arrival, AOA)反推無線電波發射站位置。如圖 3.16 所示，頻率 6.5 兆赫無線電波於不同仰角與不同極化波(白色為正常極化波傳播途徑，黑色為異常極化波傳播途徑)，所得不同電波傳播三維途徑。無線電波傳播途徑分析若配合定頻都卜勒探測系統做為參考發射站位置，途徑分析將更為準確。另一實例分析~20 MHz 特定頻率環境電波觀測所得電波方位角分析資料，電波發射方位角

(300°)與仰角(15°)，於已知時間(2011 年 4 月 23 日 4:30 UT)與當時 TWIM 全球電離層監測模式，經過無線電波傳播路徑分析，所得無線電波傳播路徑俯視圖(圖 3.17)、無線電波傳播路徑緯度側視圖(圖 3.18)、與無線電波傳播路徑緯度側視圖(圖 3.19)。

無線電波發射站的定位研究常使用的另一項技術是兩站法，所謂的兩站法是利用不同觀測系統分別觀測同一地面發射站之水平方位角，利用在空間分佈上兩個不同點的回歸線(水平方位角觀測)交叉至一目標位置，用來找到無線電波發射站的位置。利用兩站法來測量發射站位置的系統，功能上需要有無線電波方位角測量的功能，在超高頻率以上範圍可以有特殊天線來測量方位角，然而在高頻或中頻率範圍上因波長過長，則需要陣列天線以及多接收機的系統功能。同時方位角測量的精確度決取於系統的精密度及信號處理的解析度，比如說方位角的解析度誤差越大，定位的誤差也就越大。一般傳統類比式的電離層觀測儀並無陣列天線及多接收機的功能，所以也沒有電波測相的功能，而數位電離層探測儀，當它信號數位處理解析度不夠，比如說以 8bit 為例，方位角測量的誤差常達到 20 個 degree 的範圍，以尋求一個 1000 公里傳播距離的地面發射站來說，它的誤差達到 $1000 \text{ 公里} \times 0.35$ ，也就是 350 公里的誤差，此時它的定位效果不切實際。所以我們特別提到兩站法的定位觀測，常尋求於幾個要素，第一必須有多天線多接收機，另外一方面必須有系統的高精密度以及信號處理的高解析度功能才能提供很好的定位效果。在進一步方面，本研究計劃找出中高頻通訊中地面通訊源(發射站)定位方法與相關確切程序，地面通訊源定位研究中將以定頻都卜勒探測系統做為參考發射站位置，該系統包含三個發射站分別為台北、苗栗、及花蓮，同時使用兩個頻率組(頻率分別為 ~ 5.2 及 ~ 7.8 兆赫)，該系統可藉由不同發射站的空間關係，提供地面通訊源(發射站)定位研究的已知發射站參考位置。

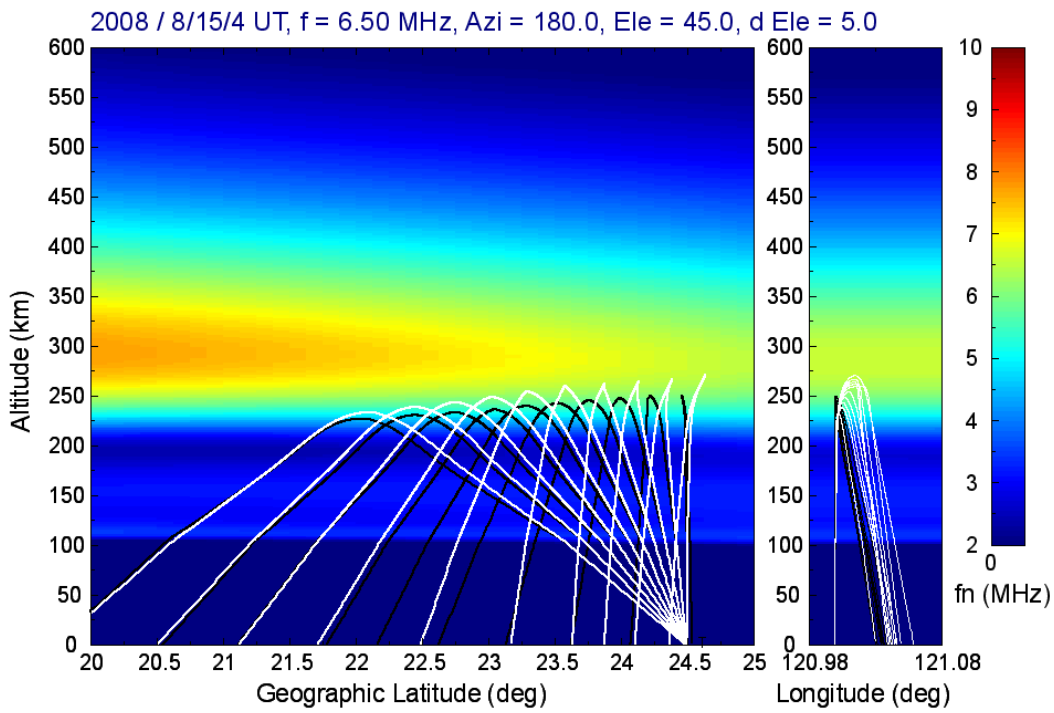


圖 3.16. 頻率 6.5 兆赫無線電波於不同仰角與不同極化波(白色為正常極化波傳播途徑，黑色為異常極化波傳播途徑)，所得不同電波傳播三維途徑

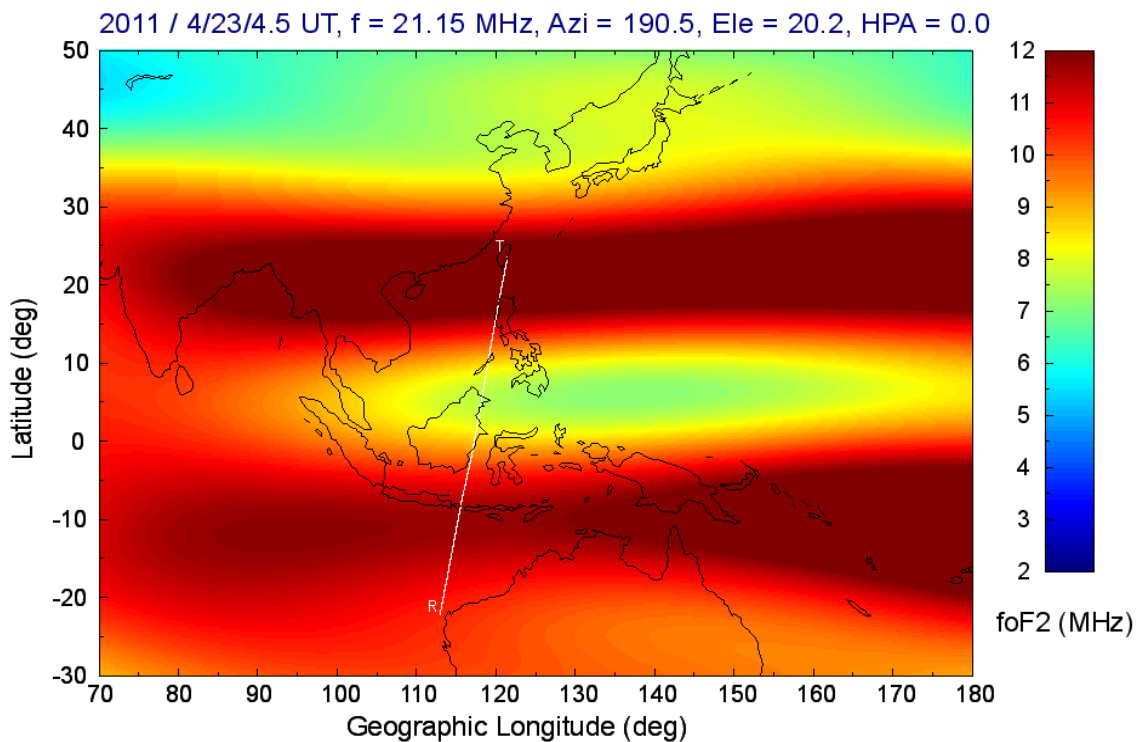


圖 3.17. 21.15 MHz 無線電波發射站定位分析實例：無線電波傳播路徑分析俯視圖，背景顏色表示電離層 F 層臨界頻率值。

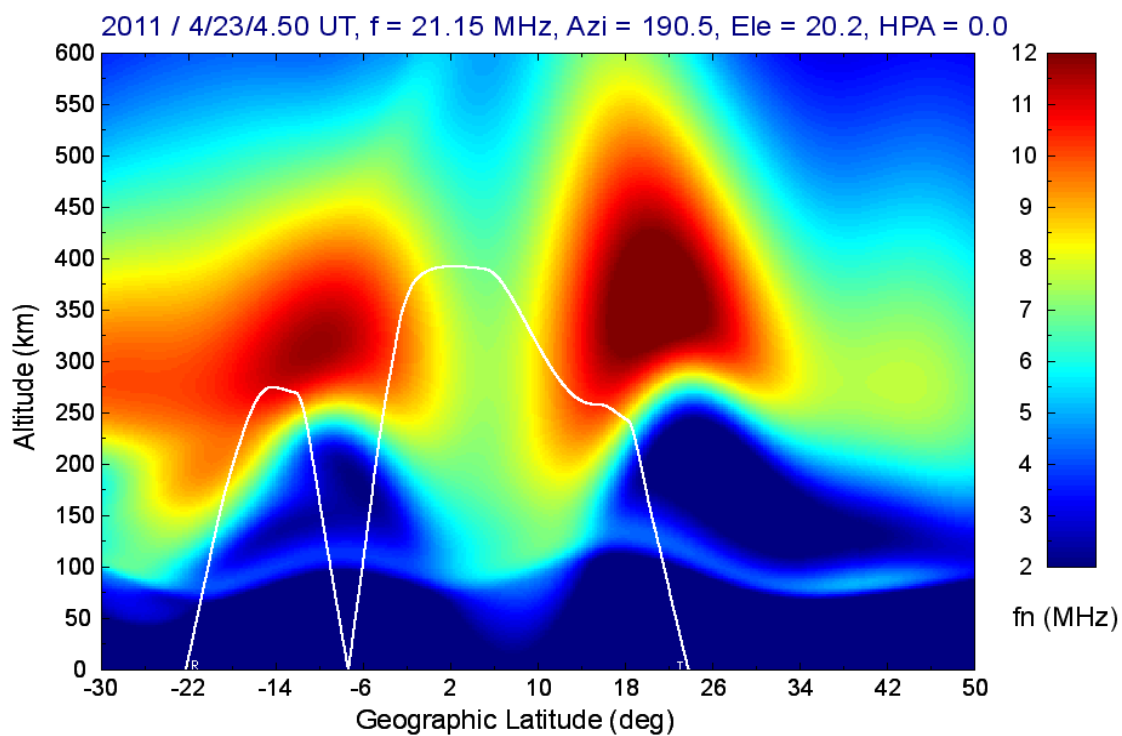


圖 3.18. 21.15 MHz 無線電波發射站定位分析實例：無線電波傳播路徑分析緯度側視圖，背景顏色表示電離層電漿頻率值。

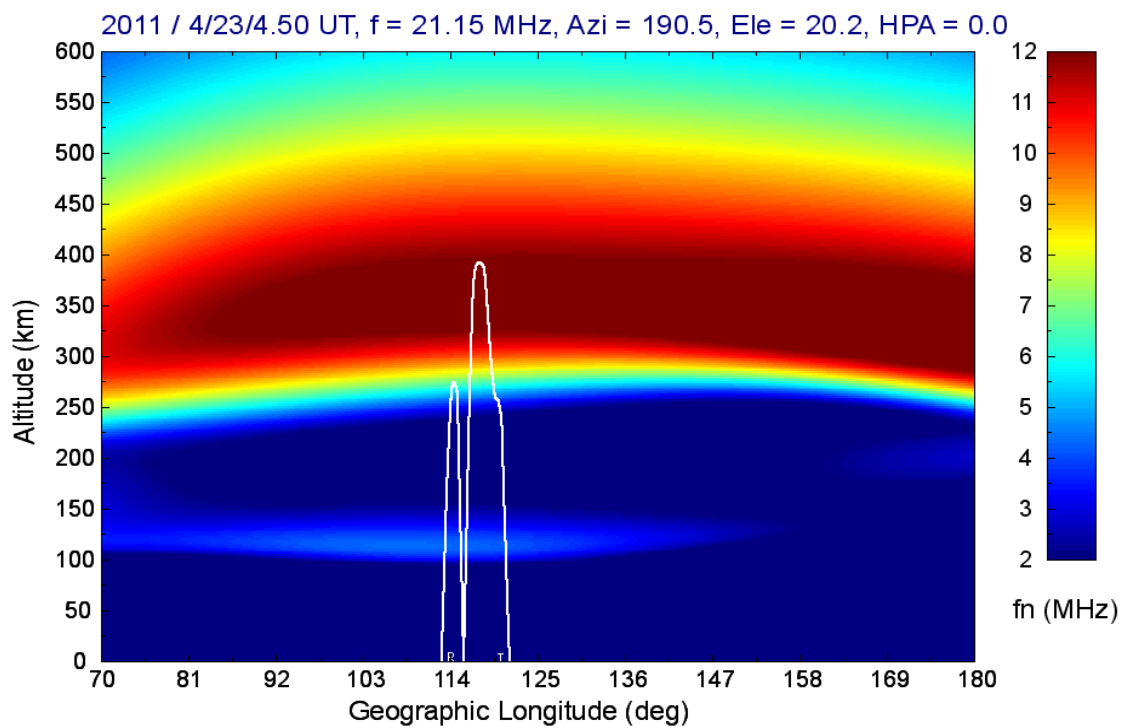


圖 3.19. 21.15 MHz 無線電波發射站定位分析實例：無線電波傳播路徑分析經度側視圖，背景顏色表示電離層電漿頻率值。

References:

- Tsai, L.-C. and W. H. Tsai (2004), Improvement of GPS/MET ionospheric profiling and validation with Chung-Li ionosonde measurements and the IRI, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* (SCI Journal), 15 (4), 589-607.
- Tsai, L.-C., W. H. Tsai, J. Y. Chou, and C.H. Liu (2006), Ionospheric tomography of the reference GPS/MET experiment through the IRI model, *TAO* (SCI Journal), 17(1), 263-276.
- Dmitriev, A.V., L.-C. Tsai, H.-C. Yeh, C.-C. Chang (2008), COSMIC/FORMOSAT-3 tomography of SEP ionization in the polar cap, *Geophysical Research Letters* (SCI Journal), Vol. 35, L22108, doi:10.1029/2008GL036146.
- Tsai, L.-C., C.H. Liu, and T. Y. Hsiao (2009), Profiling of ionospheric electron density based on the FormoSat-3/COSMIC data: results from the intense observation period experiment, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* (SCI Journal), 20, 181-191, doi: 10.3319/TAO.2007.12.19.01(F3C).
- Tsai, L.-C., C.H. Liu, T. Y. Hsiao, and C. C. Chang (2009), Maps of the ionospheric F2-layer characteristics derived from GPS radio occultation observations, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* (SCI Journal), doi:10.3319/TAO.2008.07.07.02(AA).
- Tsai, L.-C., C. H. Liu, T. Y. Hsiao, and J. Y. Huang (2009), A near real-time phenomenological model of ionospheric electron density based on GPS radio occultation data, *Radio Science* (SCI Journal), 44, doi:10.1029/2009RS004154.
- Tsai, L.-C., C. H. Liu, and J. Y. Huang (2010), Three-dimensional and numerical ray tracing on a phenomenological ionospheric model, *Radio Science* (SCI Journal), 45, doi:10.1029/2010RS004359.
- Tsai, L.-C., K. Kevin Chang, and C. H. Liu (2011), GPS radio occultation measurements on ionospheric electron density from low Earth orbit, *Journal of Geodesy* (SCI Journal), doi:10.1007/s0019001104769.
- 陳冠宏, 吳究, 蔡龍治, 陳揚仁 (2011), 改良式模稜函數法應用於台灣地區 GNSS 定位研究, submitted to 地籍測量學會會刊.
- Macalalad, E. P., L.-C. Tsai, J. Wu, C.H.Liu, Application of the TaiWan Ionosphere Model to Single-Frequency Ionospheric Delay Corrections for GPS Static Point Positioning, submitted to GPS solution.

四、結語

1. 模式發展方面：建立與改進台灣第一套全球大尺度電離層數值模式，the TaiWan Ionospheric numerical Model(TWIM)，以即時監測並研究電離層全球的動態變化，對於提供無線電通訊、近太空環境監測與研究、與發展全球高頻電波最大通訊頻率的即時預報，有極大的助益。此計畫研究結果，所得foF2與foD臨界電漿頻率數值映射分析結果，可應用於長距離高頻通訊最高可用頻率(MUF) 與最低可用頻率(LUF)初始估計。
2. 國際合作：本計畫更將運用觀測期電離層參數映射資料進行相關全球數值分析改良國際電離層參考模式 (the International Reference Ionosphere (IRI) Model) 中F2 層臨界頻率 (foF2)，F2 層臨界頻率高度 (hmF2) ，E 層臨界頻率(foE)，與E 層臨界頻率高度 (hmE) 全球數值分佈表。
3. 資料推廣方面：建立福衛三號電離層觀測、及TWIM數值模式資料與應用平台 (<http://isl.csr.sr.ncu.edu.tw/>)，該資料平台亦加入國科會太空資料中心。

五、自評表

原規劃目標	完成與否	說明
經驗正交函數(EOF)分析，挑選正常垂直電子密度資料用以進行全球電離層三維模式分析	完成	持續測試FormoSat-3/ COSMIC 掩星觀測垂直電子密度分佈相關經驗正交函數分析
加入全球電離層觀測資料，用以改進臺灣自主電離層數值模式(TWIM)	完成	以 TWIM 中所得到的資料與全球近 60 站電離層觀測儀的觀測結果做比較，以全球近 60 站電離層觀測儀的 foF2 與 foE 觀測結果為基準，對 TWIM 的 foF2 與 foE 進行平均誤差與均方根誤差平均計算
建立高頻天波傳播途徑評估	完成	完成高頻天波傳播途徑並已上平台，提供使用者線上操作。