

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(4.3)：電離層掩星資料反演前瞻技術發展報告 (III)

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：電

離層掩星資料反演前瞻技術發展

執行期間： 2012/2/18~2013/2/17

分項工作管理人：朱延祥

參與人員：

中 華 民 國 1 0 2 年 1 月

一、 摘要

低軌道人造衛星(如福爾摩沙衛星三號)接收 GPS 衛星訊號，利用電波掩星法(Radio Occultation)反演電離層電子密度剖面等相關參數，經由研究電離層特性，可探究對高頻通訊、衛星通訊的影響，與分析太空天氣環境的變遷。為達此重要的科學研究與應用目的，電波掩星法反演過程所導致的電離層參數的系統誤差，必須被徹底的分析與研究。一般而言，電波掩星反演法有兩種，一為偏折角(Bending angle)法，係由超額相位(Excess phase)和衛星的位置和速度的資料，可算出偏折角，再利用 Abel transform 積分法算出電離層折射指數(Index of Refractivity)，進而算出電離層之電子密度剖面。另一個方法是直接由超額相位算出電離層全電子量(Total Electron Density, TEC)，再利用 Abel 轉換反演出電子密度。本計畫將探討此兩種反演方法在演算過程中使用的不同邊界條件與積分方式，對反演結果產生的影響與誤差。將反演結果與地面電離層觀測儀的實測電離層資料進行比對分析，將可分析出不同掩星反演法之準確性。

二、 前言

福爾摩沙衛星三號(FORMOSAT3/COSMIC)由六顆微衛星所組成，分佈於地球表面 700~800 公里高之不同軌道中，分別圍繞著地球運

轉，組成涵蓋全球的低軌道微衛星星系來接收美國全球定位衛星(GPS)所發出的訊號。經由電波掩星法(Radio occultation)可反演出電離層電子密度剖面，其中包括電離層 E 域、F 域與散塊 E 層(Sporadic E Layer, Es)的高度與最大電子密度。這些資料除了可做為大氣與太空環境的監測之用外，若經過同化(Assimilation)程序，並與適當的數值預報模式結合，則可以作為氣象以及太空天氣預報之用。另外，透過進一步數據分析與處理過程，福衛三號所測得的最大電離層電子密度與高度的觀測資料，亦可應用在高頻(High Frequency)電波傳播通道以及最佳通信頻率的預報上，對於提升我國高頻電波在救災，廣播，遠距通信，與資訊傳遞等國計民生與國防安全的應用上，已有重要的貢獻。至於福衛三號電離層資料中的電離層電子密度不規則體訊息，則對人造衛星通訊品質影響至鉅。電離層電子密度不規則體會對人造衛星訊號產生所謂的閃爍(Scintillation)現象，使得人造衛星通訊品質因而劣化(Degradation)，嚴重時甚至造成人造衛星通訊的失聯。若能結合地面雷達對於電離層電子密度不規則體的觀測與定位，福衛三號的電離層不規則體資料將可以提升人造衛星的通訊品質。至於在科學學術研究上，則更需要準確的觀測數據，透過資料分析處理與理論研究，才可了解並探究大自然的奧秘，並發現新的現象，使人類的知識庫增加新的成份與元素，以滿足人類的求知慾，並為日後進一步的應用奠

定基礎。為了使前述的目的得以落實，就必須了解電波掩星法(Radio Occultation, RO)反演之電離層觀測資料的誤差特性，進而研究出可行的誤差移除方案，以確保福衛三號觀測資料的正確性。

電波掩星反演法有兩種，一為偏折角(Bending angle)法，係由超額相位(Excess phase)和衛星的位置和速度的資料，可算出偏折角，再利用 Abel transform 積分法算出電離層折射指數(Index of Refractivity)，進而算出電離層之電子密度剖面。另一個方法是直接由超額相位算出電離層全電子量(Total Electron Density, TEC)，再利用 Abel 轉換反演出電子密度。此兩種電波掩星反演法將因使用不同的積分方式、不同的起始條件與不同的邊界條件等，造成不同的反演結果，形成演算過程產生的誤差。這些於演算過程產生的誤差，是必須要被釐清的，如此才可更進一步發展更精準的演算過程與方法。本計畫將探討此兩種反演方法在演算過程中使用的不同起始條件、邊界條件與積分方式，對反演結果產生的影響與誤差進行分析。同時，將反演結果與地面電離層觀測儀的實測電離層資料進行比對分析，將可分析出不同掩星反演法之準確性。並在本計畫中針對邊界條件與積分方法試著進行修正，嘗試找出新的演算過程，減少演算過程產生的誤差，增進掩星反演法演算結果的精度。

三、 成果報告

3.1 電波掩星反演法中積分方法的探討

掩星觀測法所測量到的GPS電波訊號的超額相位(Excess phase)，可以換算成電波訊號之偏折角，經由Abel Transform把偏折角轉換成折射指數，如(1)式。另外，福衛三號接收GPS衛星所獲得的全電子含量，亦可經由Abel Transform反轉換，得到校正(calibrated)的電子濃度，如(2)式。使用Abel transform的積分方法會遇到奇異點的問題如前面所提到的

$$n(P) = e^{\frac{1}{\pi} \int_{r_0}^{\infty} \frac{\alpha(P)}{\sqrt{P^2 - r_0^2}} dr} \quad (1)$$

與

$$N(P) = -\frac{1}{\pi} \int_P^{r_L} \frac{dT(r)/dr}{\sqrt{r^2 - P^2}} dr \quad (2)$$

當積分遇到下邊界時會產生奇異點，由於每次的積分區間會不停的改變，如下圖。因此不同積分方法，將可能產生不同的誤差影響，故本計畫針對不同的掩星反演方法進行推導，了解其中的積分方法。

$$\ln(n(p)) = \frac{1}{\pi} \int_p^{p_{1\infty}} \frac{\alpha(p')}{\sqrt{p'^2 - p^2}} dp' = \frac{1}{\pi} \begin{bmatrix} c(p_1, p_{i-1}, p = p_{i-1}) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ c(p_1, p_{i-1}) & c(p_{i-1}, p_{i-2}, p = p_{i-2}) & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c(p_1, p_{i-1}) & c(p_{i-1}, p_{i-2}) & \dots & c(p_3, p_2, p = p_2) & 0 \\ c(p_1, p_{i-1}) & c(p_{i-1}, p_{i-2}) & \dots & c(p_3, p_2) & c(p_2, p_1, p = p_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha(p') \\ \alpha(p') \\ \vdots \\ \alpha(p') \\ \alpha(p') \end{bmatrix}$$

3.1.1 偏折角的積分

在偏折角的積分中，推導過程如下。使用[George,1998]中所提供的方法，將(1)式做分佈積分：

$$\begin{aligned}
 \ln(n(P)) &= \frac{1}{\pi} \int_P^{P_{LEO}} \frac{\alpha(P)}{\sqrt{P^2 - P_0^2}} dP \\
 &= \frac{1}{\pi} \left[\int_P^{P_{i+1}} \frac{\alpha(P)}{\sqrt{P^2 - P_0^2}} dP + \int_{P_{i+1}}^{P_{LEO}} \frac{\alpha(P)}{\sqrt{P^2 - P_0^2}} dP \right] \\
 &= \frac{1}{\pi} \left[\alpha(P) \ln(P + \sqrt{P^2 - P_0^2}) - \alpha(P_0) \ln(P_0) + \int_{P_0}^{P_1} \alpha(P_0) \ln(P + \sqrt{P^2 - P_0^2}) \frac{d\alpha(P)}{dP} dP \right] \\
 &\quad + \frac{1}{\pi} \int_{P_{i+1}}^{P_{LEO}} \frac{\alpha(P)}{\sqrt{P^2 - P_0^2}} dP \tag{3}
 \end{aligned}$$

透過偏折角先反演出折射指數再透過折射指數反演出電子濃度，這裡會需要使用Abel transform積分式來演算，最後再跟福爾摩沙衛星三號的電子濃度做比對。以下先進行分佈積分的Abel transform積分，公式如(3)式

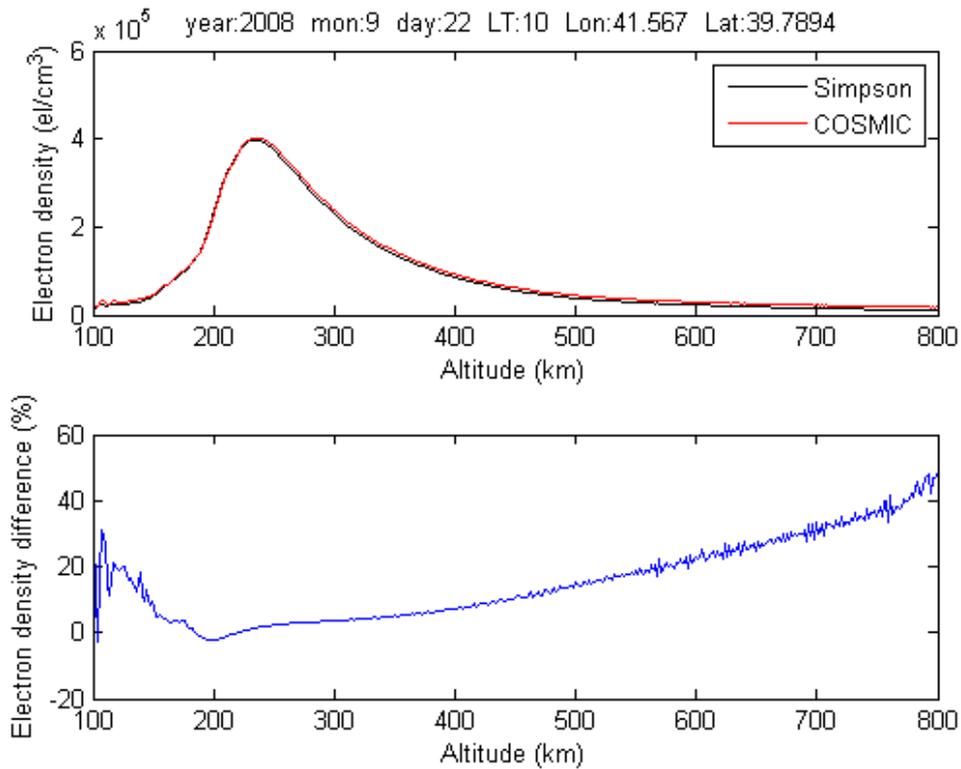


圖1、COSMIC與分佈積分比較圖。上圖黑線為(3)式所得到的電子濃度，紅線為COSMIC所公布的電子濃度。下圖為兩方法之差值。

(3)式的後半段積分使用的是辛普森(Simpson)法，透過辛普森法可以獲得比梯形法更精確的數值。由圖1可以看得出兩條曲線是十分貼合的，F層的誤差大多都在10%以內，以2008/09/22這個例子來看，150km~450km都在10%以內，尤其是在電子濃度最大值的位置，誤差約為1%。

3.1.2 全電子含量的積分

全電子含量的積分中，由(Jiu hou Lei,2007)中所提供的方法，首先將(4)式改寫成(5)式：

$$T(P) = 2 \int_P^{r_L} \frac{rN(r)}{\sqrt{r^2 - P^2}} dr \quad (4)$$

$$T(P_i) = 2 \sum_{k=1}^m \int_{P_{i+k-1}}^{P_{i+k}} \frac{rN(r)}{\sqrt{r^2 - P^2}} dr \quad (5)$$

然後假設在每一小塊的積分區間裡面電子濃度為線性變化，其解析解可改寫成：

$$\begin{aligned} T(P_i) = & \frac{P_{i+1}}{\Delta P_i} \left[\sqrt{P_{i+1}^2 - P_i^2} - \frac{P_i^2}{P_{i+1}} \ln \left(\frac{P_{i+1} + \sqrt{P_{i+1}^2 - P_i^2}}{P_i} \right) \right] N(P_i) \\ & + \sum_{k=1}^{m-1} \left\{ \frac{P_{i+k+1}}{\Delta P_{i+k}} \left[\sqrt{P_{i+k+1}^2 - P_i^2} - \sqrt{P_{i+k}^2 - P_i^2} - \frac{P_i^2}{P_{i+k+1}} \ln \left(\frac{P_{i+k+1} + \sqrt{P_{i+k+1}^2 - P_i^2}}{P_{i+k} + \sqrt{P_{i+k}^2 - P_i^2}} \right) \right] \right. \\ & \left. - \frac{P_{i+k-1}}{\Delta P_{i+k-1}} \left[\sqrt{P_{i+k}^2 - P_i^2} - \sqrt{P_{i+k-1}^2 - P_i^2} - \frac{P_i^2}{P_{i+k-1}} \ln \left(\frac{P_{i+k} + \sqrt{P_{i+k}^2 - P_i^2}}{P_{i+k-1} + \sqrt{P_{i+k-1}^2 - P_i^2}} \right) \right] \right\} N(P_{i+k}) \\ & - \frac{P_{i+m-1}}{\Delta P_{i+m-1}} \left[\left(2 - \frac{P_{i+m}}{P_{i+m-1}} \right) \sqrt{P_{i+m}^2 - P_i^2} - \sqrt{P_{i+m-1}^2 - P_i^2} - \frac{P_i^2}{P_{i+m-1}} \ln \left(\frac{P_{i+m} + \sqrt{P_{i+m}^2 - P_i^2}}{P_{i+m-1} + \sqrt{P_{i+m-1}^2 - P_i^2}} \right) \right] N(P_{i+m}) \end{aligned} \quad (6)$$

其中為 $\Delta P_i = P_{i+1} - P_i$ ，透過化簡可把(6)式改寫成：

$$T(P_i) = P_i (c_{i,0} N(P_i) + \sum_{k=1}^{m-1} c_{i,k} N(P_{i+k}) + c_{i,m} N(P_{i+m})) \quad (7)$$

其中 $c_{i,0}$ 、 $c_{i,k}$ 與 $c_{i,m}$ 分別為：

$$c_{i,0} = \varepsilon_1^{-1} \left[(1 + \varepsilon_1) \sqrt{\varepsilon_1(2 + \varepsilon_1)} - \ln(1 + \varepsilon_1 + \sqrt{\varepsilon_1(2 + \varepsilon_1)}) \right]$$

$$c_{i,k} = (\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k)^{-1} \left[(1 + \varepsilon_{k+1}) (\sqrt{\varepsilon_{k+1}(2 + \varepsilon_{k+1})} - \sqrt{\varepsilon_k(2 + \varepsilon_k)}) - \ln \left(\frac{1 + \varepsilon_{k+1} + \sqrt{\varepsilon_{k+1}(2 + \varepsilon_{k+1})}}{1 + \varepsilon_k + \sqrt{\varepsilon_k(2 + \varepsilon_k)}} \right) \right]$$

$$-(\varepsilon_k - \varepsilon_{k-1})^{-1}[(1 + \varepsilon_{k-1})(\sqrt{\varepsilon_k(2 + \varepsilon_k)} - \sqrt{\varepsilon_{k-1}(2 + \varepsilon_{k-1})}) - \ln\left(\frac{1 + \varepsilon_k + \sqrt{\varepsilon_k(2 + \varepsilon_k)}}{1 + \varepsilon_{k-1} + \sqrt{\varepsilon_{k-1}(2 + \varepsilon_{k-1})}}\right)]$$

$$c_{i,m} = (\varepsilon_m - \varepsilon_{m-1})^{-1}[(1 + \varepsilon_m + 2\varepsilon_{m-1})(\sqrt{\varepsilon_m(2 + \varepsilon_m)} - (1 + \varepsilon_{m-1})\sqrt{\varepsilon_{m-1}(2 + \varepsilon_{m-1})}) - \ln\left(\frac{1 + \varepsilon_m + \sqrt{\varepsilon_m(2 + \varepsilon_m)}}{1 + \varepsilon_{m-1} + \sqrt{\varepsilon_{m-1}(2 + \varepsilon_{m-1})}}\right)] \quad (8)$$

(8)式中 $\varepsilon_k = \frac{P_{i+k} - P_i}{P_i}$ ，需注意分子的第二項為 P_i 。接下來將(7)式改寫

成：

$$N(P_i) = c_{i,0}^{-1} \left[\left(\frac{T(P_i)}{P_i} \right) - \sum_{k=1}^m c_{i,k} N(P_{i+k}) \right] \quad (9)$$

因此透過分段的方式避開奇異點。

(9)式與COSMIC公布的方法應該為同一個積分方法，差別在於COSMIC所公布的高層之全電子含量是透過經驗式得到。而(9)式之最上面之全電子含量是透過外推法得到，當外推法所得到的數值為負值時，使用0為其邊界值，所使用的全電子含量為校正全電子含量(Calbrated TEC)。

由圖 2 可以看得出兩條曲線是十分貼合的，原因是因為積分方式相同，以 2008/09/22 這個例子來看，整個電子濃度剖面圖都在 10% 之內，150km ~ 550km 的誤差約在 1% 左右，擾動的來源推測是在為

了進行兩個方法比較時將兩個曲線的電子濃度內差到同一個高度時產生的數值誤差。

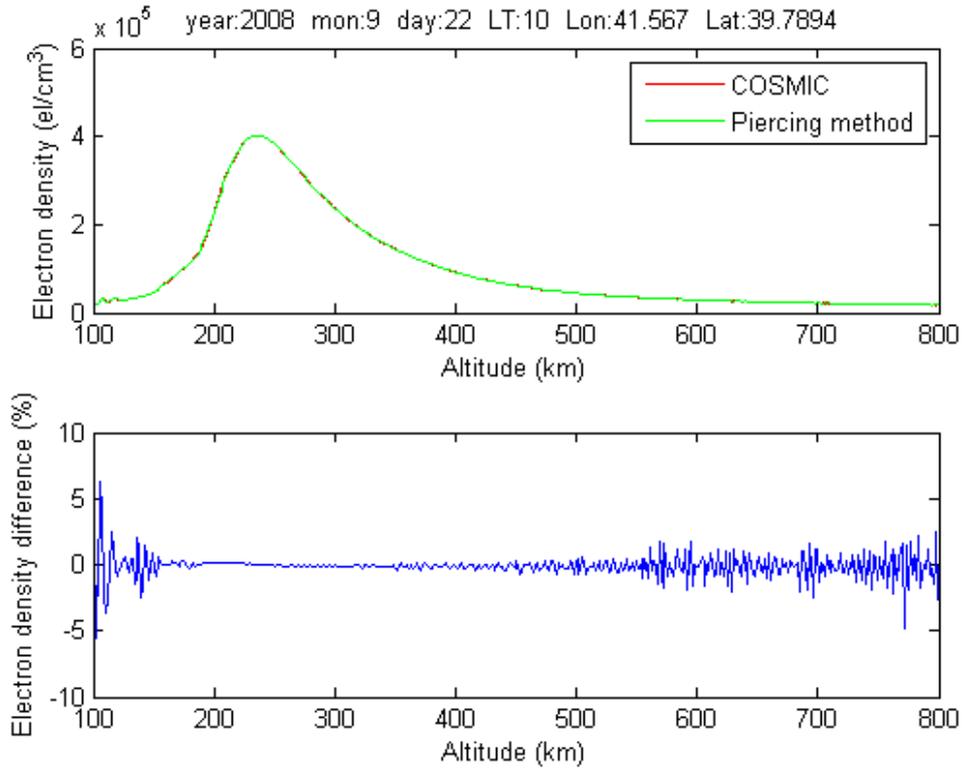


圖 2 COSMIC 與 Piercing method 比較圖。上圖綠線為(9)式所得到的電子濃度，紅線為 COSMIC 所公布的電子濃度。下圖為兩方法之差值。

3.2 新積分方法修正電波掩星反演法

經由 Abel Transform 把偏折角轉換成折射指數

$$n(P) = e^{-\frac{1}{\pi} \int_{r_0}^{\infty} \frac{\alpha(P)}{\sqrt{P^2 - P_0^2}} dP} \quad (1)$$

將折射指數經(2)式轉換為電子密度

$$n = 1 - \frac{40.3n_e}{f^2} \quad (2)$$

本研究中提出新的積分方法如(3)式

$$\begin{aligned} \ln(n(P)) = & [\ln(p_1 + \sqrt{p_1^2 - p_0^2}) - \ln(p_0) - \frac{\sqrt{p_1^2 - p_0^2}}{p_1}] \alpha(p_0) \\ & + \sum_{k=1}^{k=m} \{ [\ln(p_{k+1} + \sqrt{p_{k+1}^2 - p_0^2}) - \ln(p_k + \sqrt{p_k^2 - p_0^2}) - \frac{\sqrt{p_{k+1}^2 - p_0^2}}{p_{k+1}}] \\ & - [\ln(p_k + \sqrt{p_k^2 - p_0^2}) - \ln(p_{k-1} + \sqrt{p_{k-1}^2 - p_0^2}) - \frac{\sqrt{p_k^2 - p_0^2}}{p_k}] \} \alpha(p_k) \end{aligned} \quad (3)$$

帶入掩星反演法中，利用計算出折射指數(1)式與電子密度。圖3資料時間2008/09/22，為本研究計畫提出的積分方法，應用於偏折角計算，獲得折射指數，再轉換為電子密度，上圖為新的積分方法獲得的結果與COSMIC公布的電子密度，下圖為兩者之間差百分比。由圖中可以看出在高度上有些許差異，但是電子濃度最大值兩個方法是十分貼合的，F層(170km~420km)的誤差大多都在10%以內。

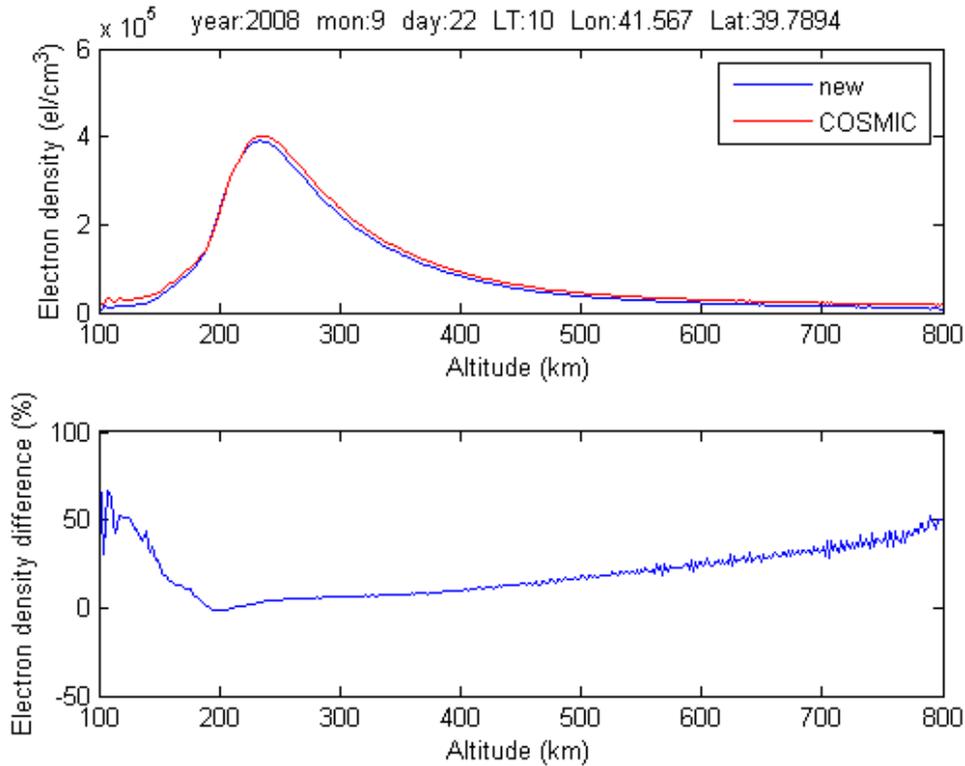


圖3、COSMIC與新方法比較圖。上圖藍線為(3)式所得到的電子濃度，紅線為COSMIC所公布的電子濃度。下圖為兩方法之差值。

接著將四個方法放在一起進行比較，同時計算其誤差，此處是以COSMIC 減去其他的方法，在除上 COSMIC 的電子濃度，如圖 4，資料時間為 2008/09/22。上圖中藍線為新方法所得到的電子濃度，黑線為分布積分所得到的電子濃度，紅線為 COSMIC 所公布的電子濃度，綠線為 Piercing method 所得到之電子濃度。下圖藍線為新方法與COSMIC 的差異，黑線為分布積分與COSMIC 的差異，綠線為 Piercing method 與 COSMIC 的差異，上圖可看出大致上四個方法的電子密度都差不多。下圖使用全電子含量與偏折角進行反演，在高層與低層的在趨勢上有所差異，在 F 層的結果誤差幾乎在 10% 之內，由此可以知道偏折角與全電子含量在電離層的上層與下層反演出來的電子濃度

有著部份的差異性，但是在 F 層的結果大致上是貼合的。以 COSMIC 公布資料為基準討論，顯然 COSMIC 公布資料是以 TEC 反演得到的。由於 COSMIC 所公布的資料是透過全電子含量進行反演，而全電子含量與偏折角又有著趨勢上的差異。表 1 為本研究所討論的三種積分方法，與 COSMIC 公布資料列表。為進一步討論，將與實際量測資料進行比對分析，後文將針對春、夏、秋、冬四季分別進行討論，探討以實際資料(電離層探測儀觀測)為基準下，各個方法的偏差量與優缺點。

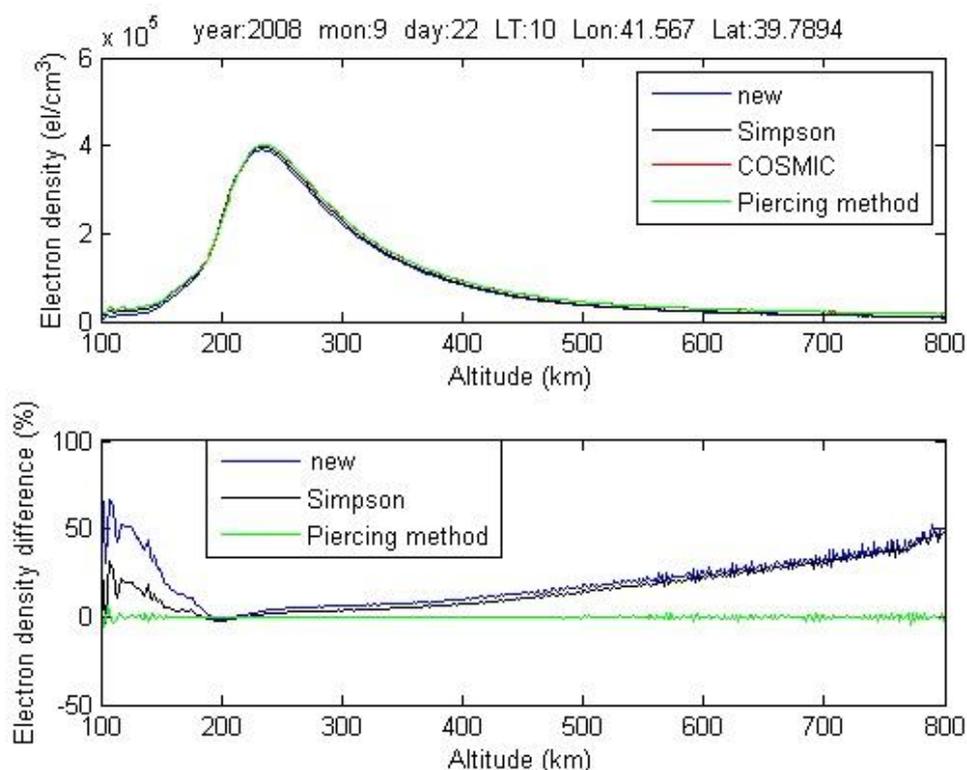


圖4、COSMIC與各方法比較圖。上圖藍線為新方法所得到的電子濃度，黑線為分布積分所得到的電子濃度，紅線為COSMIC所公布的電子濃度，綠線為Piercing method所得到之電子濃度。下圖藍線為新方法與COSMIC的差異，黑線為分布積分與COSMIC的差異，綠線為Piercing method與COSMIC的差異。

表1、無線電波掩星反演法積分表

方法	積分式
Simpson	$\ln(n(P)) = \frac{1}{\pi} [\alpha(P) \ln(P + \sqrt{P^2 - P_0^2}) - \alpha(P_0) \ln(P_0)]$ $+ \int_{P_{i+1}}^{P_{LEO}} \alpha(P_0) \ln(P + \sqrt{P^2 - P_0^2}) \frac{d\alpha(P)}{dP} dP + \frac{1}{\pi} \int_{P_{i+1}}^{P_{LEO}} \frac{\alpha(P)}{\sqrt{P^2 - P_0^2}} dP$
Piercing method	$N(P_i) = c_{i,0}^{-1} \left[\frac{T(P_i)}{P_i} - \sum_{k=1}^m c_{i,k} N(P_{i+k}) \right]$
COSMIC	同Piercing method，但700~800km電子濃度透過經驗式疊代
new	$\ln(n(P)) = \left[\ln(p_1 + \sqrt{p_1^2 - p_0^2}) - \ln(p_0) - \frac{\sqrt{p_1^2 - p_0^2}}{p_1} \alpha(p_0) \right]$ $+ \sum_{k=1}^{k=m} \left\{ \left[\ln(p_{k+1} + \sqrt{p_{k+1}^2 - p_0^2}) - \ln(p_k + \sqrt{p_k^2 - p_0^2}) - \frac{\sqrt{p_{k+1}^2 - p_0^2}}{p_{k+1}} \right] \right.$ $\left. - \left[\ln(p_k + \sqrt{p_k^2 - p_0^2}) - \ln(p_{k-1} + \sqrt{p_{k-1}^2 - p_0^2}) - \frac{\sqrt{p_k^2 - p_0^2}}{p_k} \right] \right\} \alpha(p_k)$

3.3 積分方法應用於電波掩星反演法結果分析

電子濃度最大值的擷取參考[柯孝聰,2005]，事件的對應標準為電離層探測儀取樣點的前後7.5分鐘且在經緯度2.5度內之電子濃度最大值，圖中的相關係數(Correlation)代號為R、平均偏差量 M_0 與均方根差(Root Mean Square Error, RMSE)分別如(4)式、(5)式與(6)式：

$$R = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{N \sum x^2 - (\sum x)^2} \sqrt{N \sum y^2 - (\sum y)^2}} \quad (4)$$

$$M_0 = \left[\sum \frac{(y-x)}{y} \right] \frac{1}{N} \times 100\% \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y-x)^2}{N}} \quad (6)$$

其中x代表各反演法反演出來的事件數值，y代表電離層探測儀探測出來的事件數值，N代表發生事件的總數， $\sum x$ 代表各反演法反演出來的事件之加總， $\sum y$ 代表電離層探測儀觀測的事件之加總， $\sum x^2$ 代表各反演法反演出來的事件先平方再加總， $\sum y^2$ 代表電離層太空儀探測出來的事件先平方再加總， $\sum xy$ 代表電離層太空儀探測出來的事件與對應之反演法之數值相乘後再加總。

3.2.1 日間電波掩星法反演結果比較

圖5為秋季日間資料比對，此處日間定為LT的9點到17點。由圖5可以看出秋季日間的部分使用偏折角反演出來的結果，比使用全電子含量來的好，本研究計畫所提出了反演法，其準確度與電離層探測儀的結果吻合性最好。另外，值得注意的是使用Piercing Method所得到的結果，雖然在準確度不如COSMIC所公佈的資料，但其與電離層探測儀的資料之精確度(RMES值)為四個方法之中最高的，四個方法在秋季的部分與電離層探測儀的相關性都超過0.8，可以說是擁有很高的相關性。

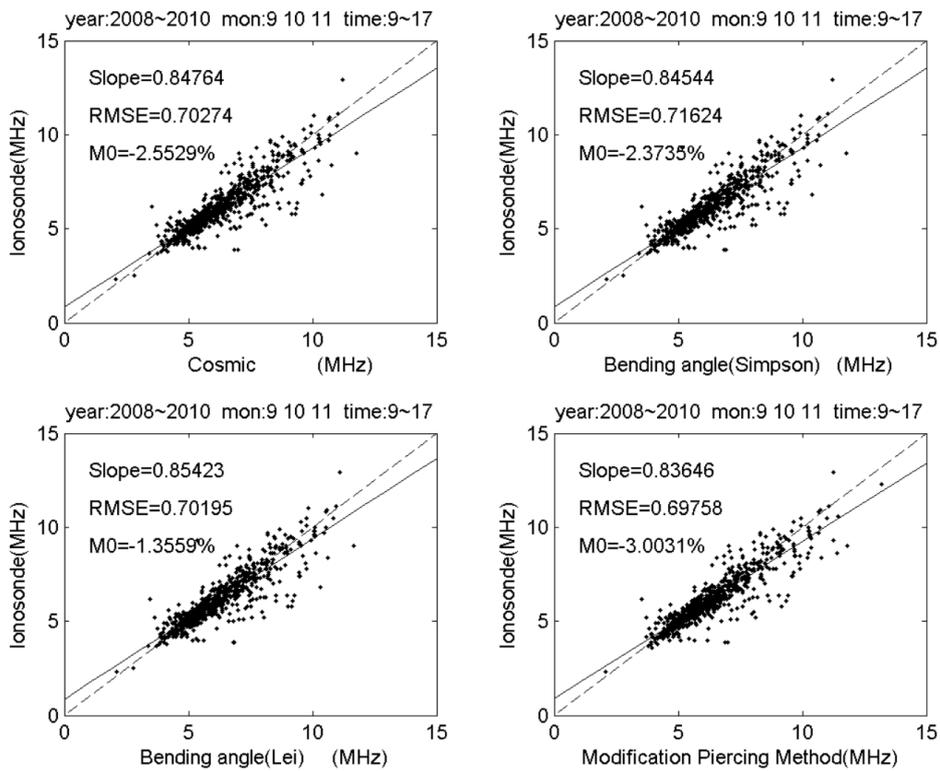


圖5、2008~2010年秋季日間散布圖。左上方為電離層探測儀與COSMIC公佈之資料的散布圖，右上方為電離層探測儀與分布積分法之散布圖，左下方為電離層探測儀與新方法的散布圖，右下方為電離層探測儀與Piercing method之散布圖。

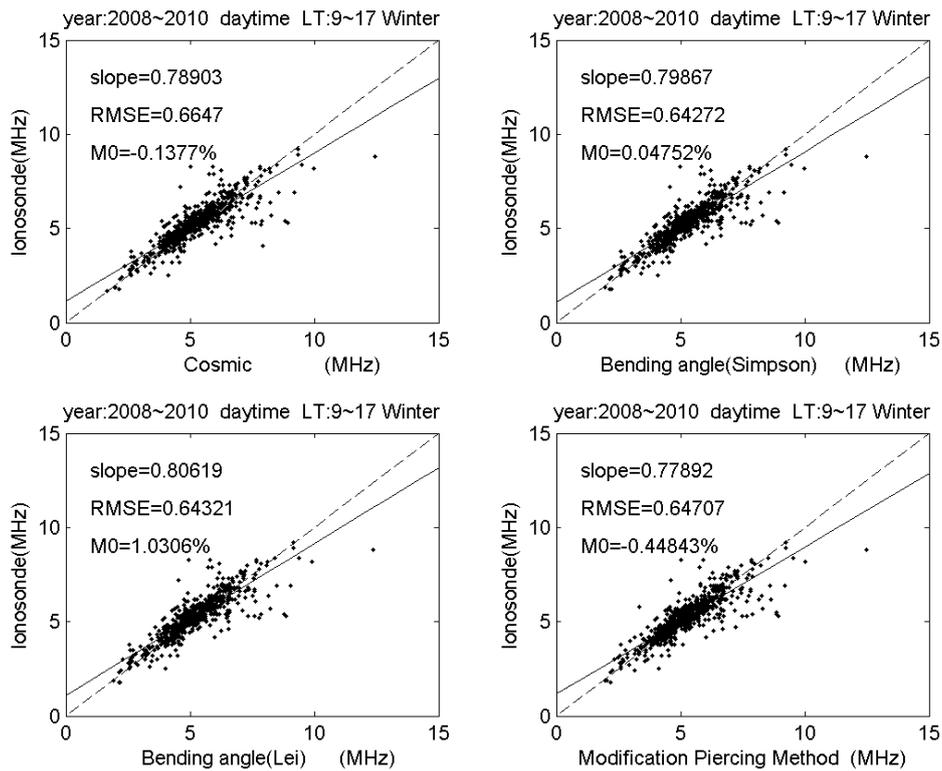


圖6、2008~2010年冬季日間散布圖。左上方為電離層探測儀與COSMIC公佈之資料的散布圖，右上方為電離層探測儀與分布積分法之散布圖，左下方為電離層探測儀與本計畫方法的散布圖，右下方為電離層探測儀與Piercing method之散布圖。

圖6為2008~2010年冬季日間散布圖，可以看出冬季日間的部分使用偏折角反演出來的結果比使用全電子含量來的好，新的積分反演法與電離層探測儀的結果仍然是吻合性最好，使用Piercing Method所得到的結果，雖然在準確度不如COSMIC所公佈的資料，但其與電離層探測儀的資料之精確度(RMES)仍然為四個方法之中最高的，四個方法在冬季的部分與電離層探測儀的相關性都超過0.8，可以說是擁有很高的相關性。

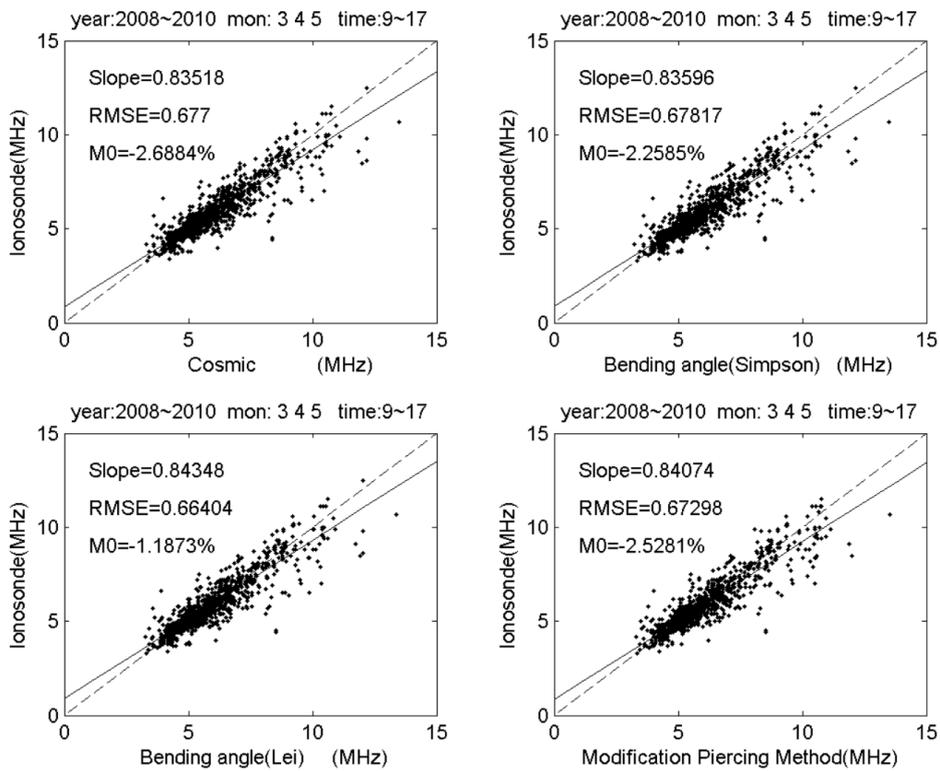


圖7、2008~2010年春季日間散布圖。左上方為電離層探測儀與COSMIC公佈之資料的散布圖，右上方為電離層探測儀與分布積分法之散布圖，左下方為電離層探測儀與本計畫方法的散布圖，右下方為電離層探測儀與Piercing method之散布圖。

由圖7為2008~2010年春季日間散布圖，可以看出春季日間的部分使用偏折角反演出來的結果比使用全電子含量來的好，新反演法與電離層探測儀的結果仍然是吻合性最好，春季的精確度的部分也是由新的方法較好，但四個方法的精確度差異並不大，四個方法在春季的部分與電離層探測儀的相關性都超過0.9，這個數值為兩者有極高的相關性。

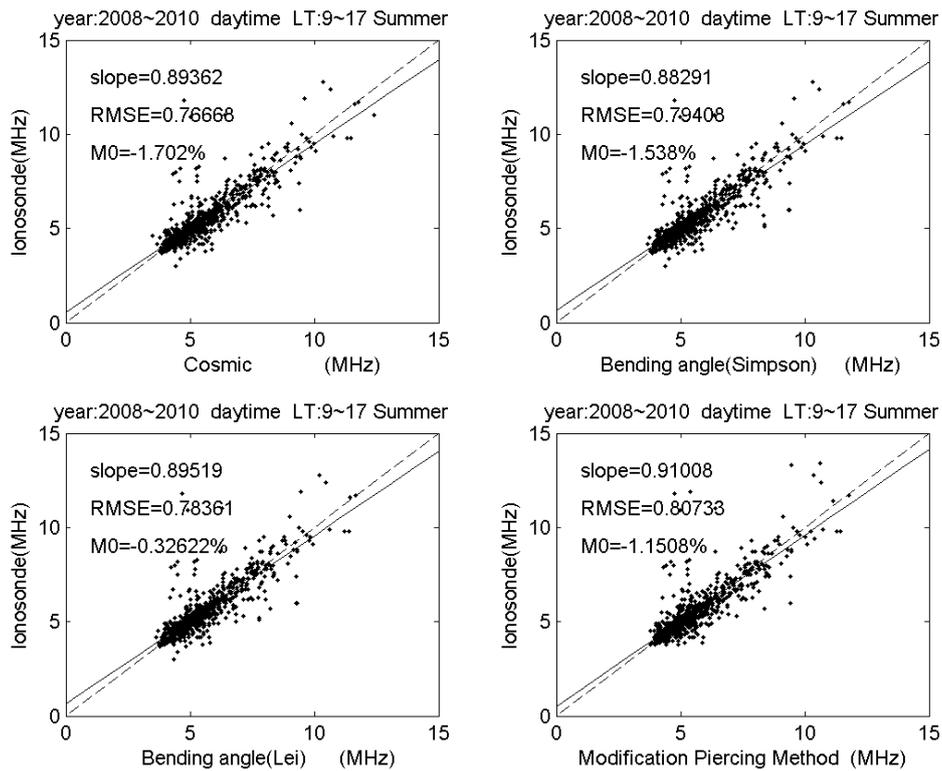


圖8、2008~2010年夏季日間散布圖。左上方為電離層探測儀與COSMIC公佈之資料的散布圖，右上方為電離層探測儀與分布積分法之散布圖，左下方為電離層探測儀與本計畫方法的散布圖，右下方為電離層探測儀與Piercing method之散布圖。

由圖8為2008~2010年夏季日間散布圖，夏季日間的部分使用偏折角反演出來的結果比使用全電子含量來的差，準確度的方面為Piercing Method所使用反演法與電離層探測儀的結果是吻合性最好，夏季的準確度的部分則是由COSMIC所提出的方法較為優秀，四個方法在夏季的部分與電離層探測儀的相關性都小於0.8。就相關性論，各反演法，在夏季所得到的反演結果是較差的。

3.2.2 夜間電波掩星法反演結果比較

FORMOSAT/COSMIC夜間資料比對，對夜間的設定為LT20點到凌晨4點。首先依然先看秋季的資料，如圖9，可以看的出與日間相反，全電子含量所反演出來的結果比偏折角反演出來的結果好。在夜間，秋季資料其相關性極高，在準確性的部分與白天相反，本計畫提出的方法精確性最低，Modification Piercing Method所反演出來的方法最高。

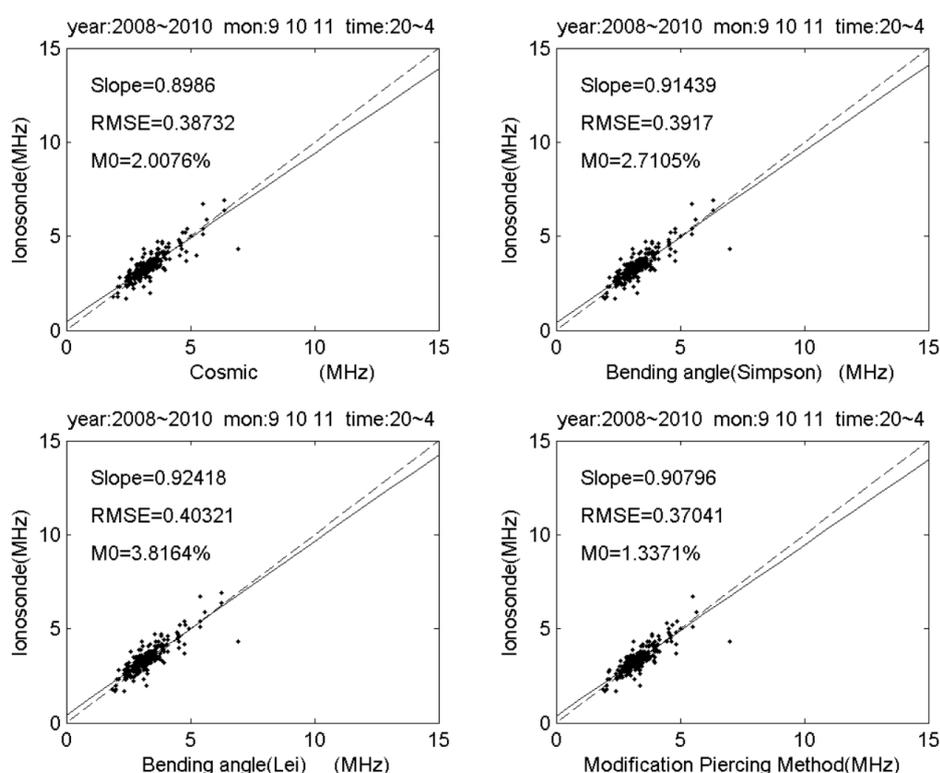


圖9、2008~2010年秋季夜間散佈圖。左上方為電離層探測儀與COSMIC公佈之資料的散佈圖，右上方為電離層探測儀與分佈積分法之散佈圖，左下方為電離層探測儀與本計畫方法的散佈圖，右下方為電離層探測儀與Modification Piercing method之散佈圖。

圖10亦表現出與日間相反，全電子含量所反演出來的結果比偏折角反演出來的結果優秀。夜間的冬季資料其相關性較低，約在0.75左

右，在準確性的部分與白天相反，本計畫所提出的方法精確性最低，Modification Piercing Method所反演出來的方法最高，四個方法差異並不大。

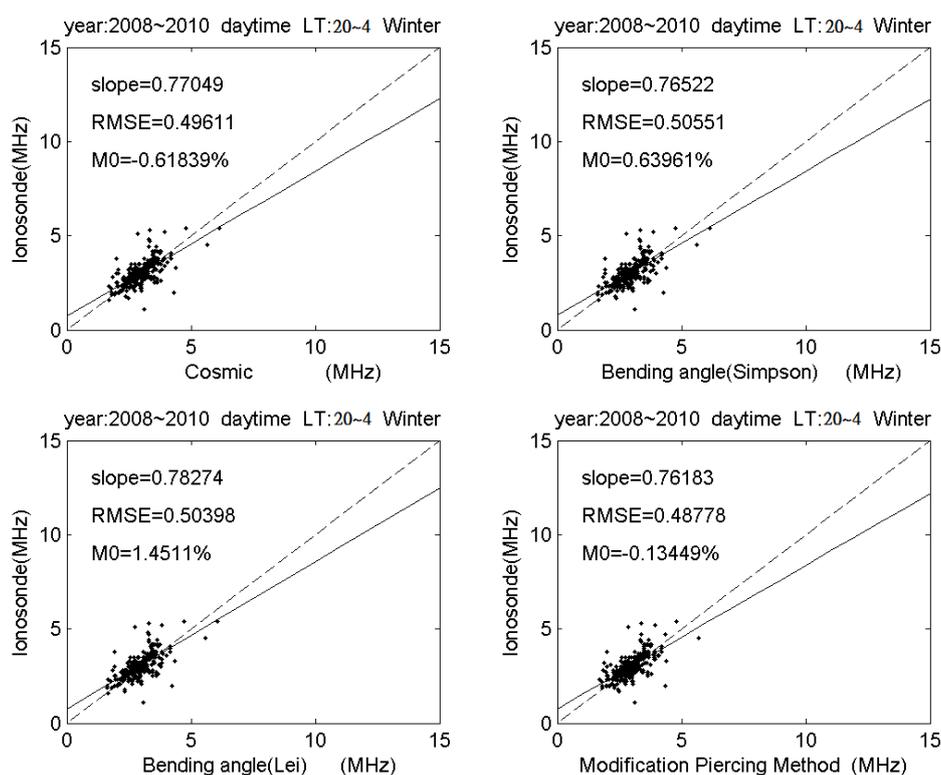


圖10、2008~2010年冬季夜間散佈圖。左上方為電離層探測儀與COSMIC公佈之資料的散佈圖，右上方為電離層探測儀與分佈積分法之散佈圖，左下方為電離層探測儀與本計畫所提方法的散佈圖，右下方為電離層探測儀與Modification Piercing method之散佈圖。

圖11同圖10一致，顯示出與日間相反，全電子含量所反演出來的結果比偏折角反演出來的結果優秀。夜間的春季資料其相關性依然極高，約在0.9左右，在準確性的部分與白天相反，本計畫所提出的方法準確性最低，Modification Piercing Method所反演出來的方法最高，

精確度部分則由COSMIC最高，四個方法一樣差異並不大。

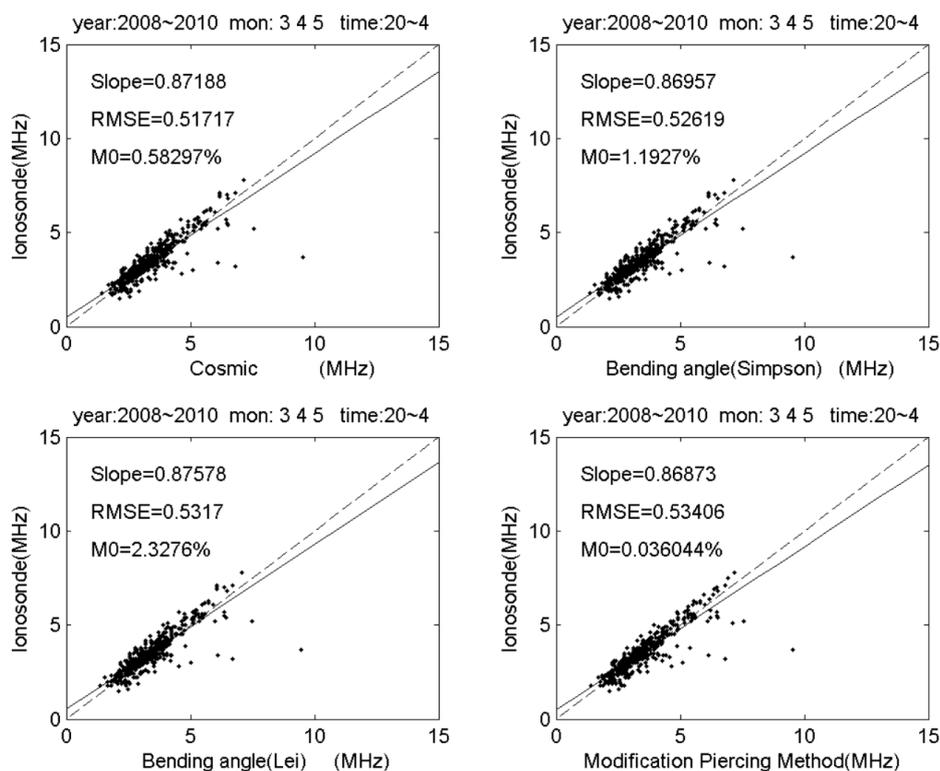


圖11、2008~2010年春季夜間散佈圖。左上方為電離層探測儀與COSMIC公佈之資料的散佈圖，右上方為電離層探測儀與分佈積分法之散佈圖，左下方為電離層探測儀與本計畫提出方法的散佈圖，右下方為電離層探測儀與Modification Piercing method之散佈圖。

圖12則顯現不出哪一個反演法比較優秀，夜間的夏季資料其相關性依然極高，都在0.9以上。在準確性部分COSMIC所提供的最好，精確度部分四個方法一樣差異一樣並不大。

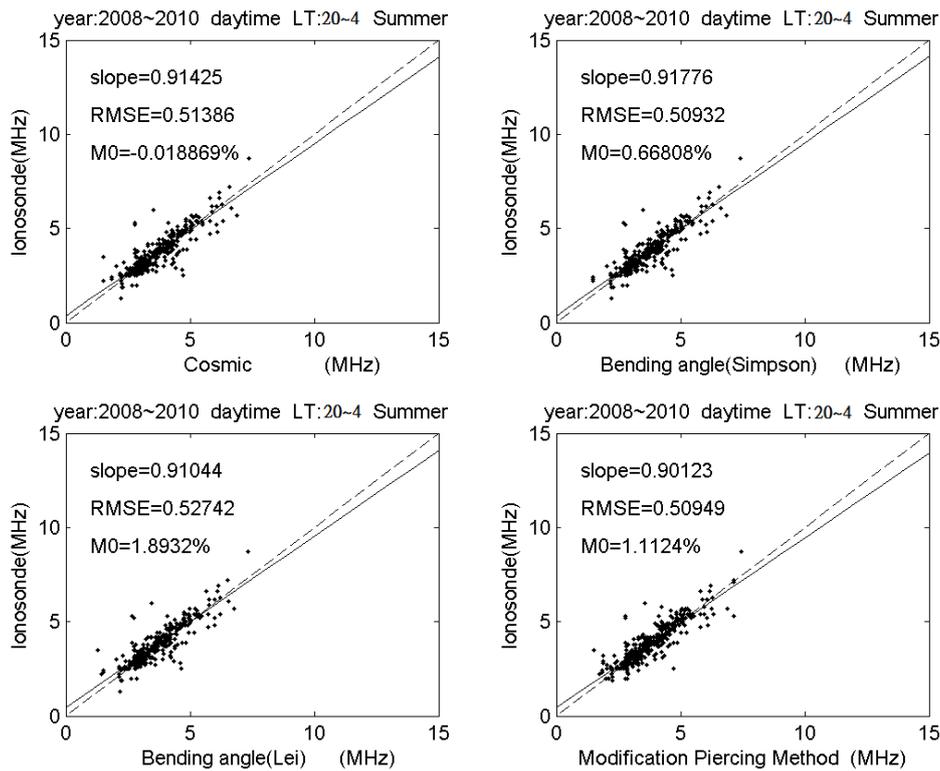


圖 12、2008~2010 年夏季夜間散佈圖。左上方為電離層探測儀與 COSMIC 公佈之資料的散佈圖，右上方為電離層探測儀與分佈積分法之散佈圖，左下方為電離層探測儀與本計畫所提方法的散佈圖，右下方為電離層探測儀與 Modification Piercing method 之散佈圖。

圖 13~圖 15 為 2008~2010 年每個月之 M_0 、相關性與 RMSE 圖，本研究計畫所提出的積分方式，在北半球的結果幾乎都比其他方法的準確度高。南半球冬天結果較差，基本上應與電離層探測儀數量與位置，在南半球較少有關。可以看出在 RMSE 各個方法的差異並不大，但在夏季都有變差的趨勢，代表精確度上個方法差異性並不大。相關性上，則三年的各月平均，基本上差異不大。

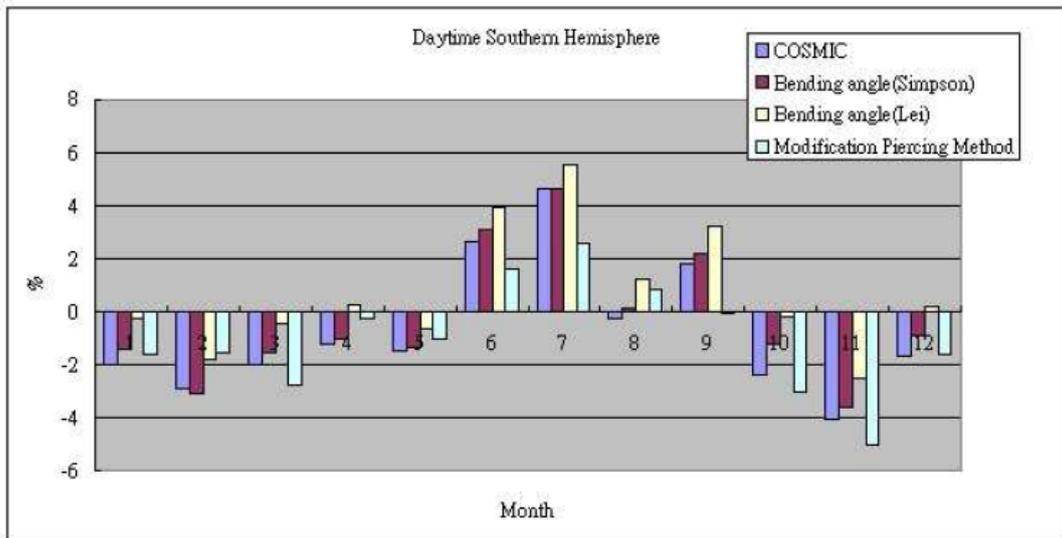
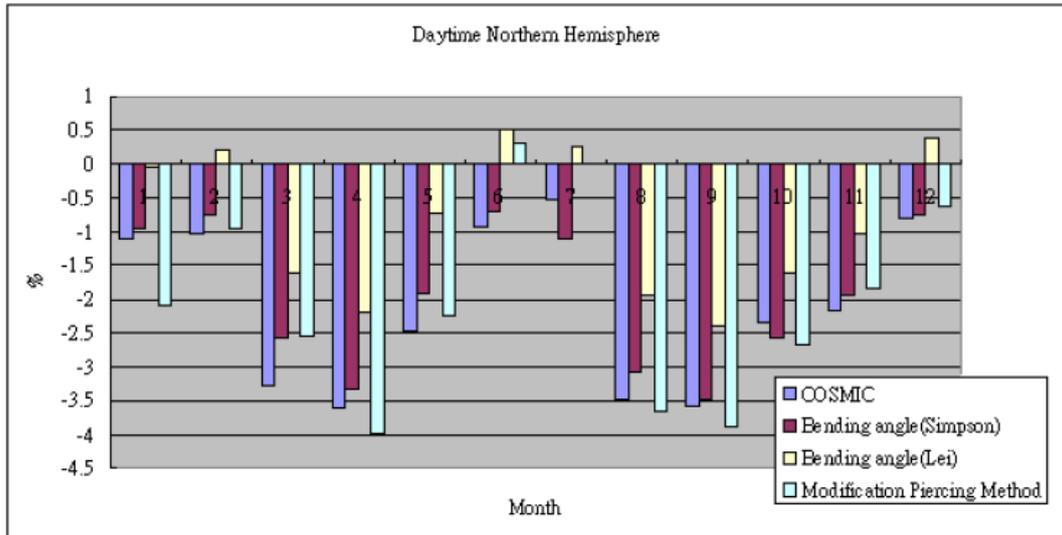


圖 13、2008~2010 年日間各月平均 M_0 統計圖，上圖為北半球，下圖為南半球。

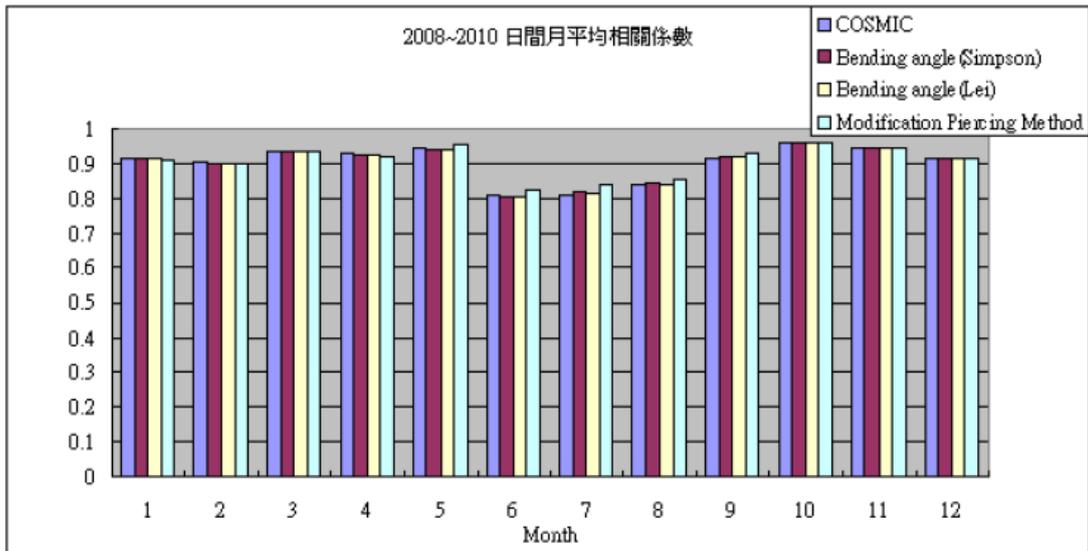


圖 14、 2008~2010 年日間各月平均日間各月相關係數統計圖。

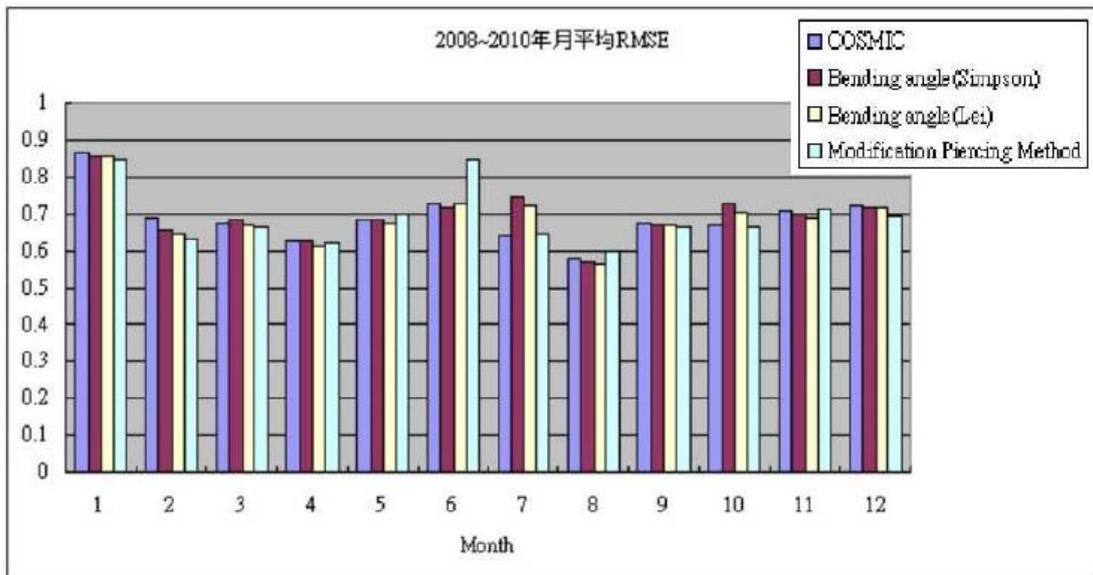


圖 15、 2008~2010 年日間各月平均日間各月 RMSE 統計圖。

四、 結論

透過反演方法的蒐集，建立新的積分法，帶入反演方法中，獲得結果，確認積分法修正的可行性。

掩星資料經由各個不同反演法，獲得類似的結果。與實際地面電離層探測儀觀測資料進行比對，發現使用全電子含量與偏折角兩種不同的物理量進行反演在電離層的高層和低層有比較大的誤差，但是在F層的兩者的數值是貼近的。

日間F層多數情況下偏折角反演出來的準確度較高，夜間則全電子含量的準確度較高。在精確度上，日間與夜間兩個時段，差異並不大。

五、 自評表

原規劃目標	完成與否	說明
蒐集與推導由偏折角演算過程中所應用的積分方法	100 %	已完成
蒐集與推導由全電子含量演算過程中所應用的積分方法	100 %	已完成
於電波掩星反演法中，修正或建立新的積分方式	100 %	已完成
利用實際地面觀測資料，分析與比較各演算過程中的誤差	100 %	已完成
報告撰寫	100%	