

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」

第三次進度報告

工作項目(4.4):以掩星資料進行電離層同化及福七OSSE(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：以掩星資料進行電離層同化及福七

OSSE

執行期間： 2012/02/18~2013/02/17

分項工作管理人：林建宏

參與人員：孫楊軼、林其彥、李奕德、

周中婷、陳佳宏、黎文筠

中 華 民 國 1 0 2 年 2 月

## 一、 摘要

福爾摩沙衛星三號超過5年的電離層觀測資料已經被證明可以讓人類觀測到更多的太空環境參數，利用過去缺乏的海上觀測以及電子密度高度分布資訊，科學家了解低層大氣與太空天氣耦合效應 (Lin et al., 2007a; 2007b)；也發現南極威德海 (Weddell Sea)的夏季電子密度異常在北歐以及北日本與韓國其實都有類似的現象 (Burns et al., 2008; Lin et al., 2009; Lin et al., 2010; Burns et al., 2011)；進一步了解高緯度平流層瞬時暖化 (stratospheric sudden warming, SSW) 如何經由影響大氣潮汐讓低緯度電離層受到影響 (C. H. Lin et al., 2012; J. T. Lin et al., 2012)。這些科學成果都使福衛三號成為知名衛星任務，但是福衛三號觀測仍然存在兩個不足之處，一是雖然福衛三號一天有2,500點觀測，但是電離層隨local time有明顯變化，因此每小時全球約100點的觀測量仍嫌不足，目前的研究成果大都需要累積約20天的觀測資料得到三維電離層全球觀測，此種資料處理方式僅對於研究較長期電離層變動有幫助。另一不足之處是目前的電子密度反演，需要假設大範圍電離層電子密度屬於均勻分布，此一假設使得低緯度地區200公里以下的電子密度會產生嚴重誤差 (Liu et al., 2010)。解決這些不足需要發展電離層資料同化技術，利用資料同化技術將福衛三號與其他電離層觀測同時進行資料同化到電離層模式，以得到每小時電離層全球分布，此外，由於此項工作也利用其他觀測資料 (如地面GPS觀測)，因此在掩星觀測位置得到的電離層電子密度分布將具備福衛三號或七號掩星觀測資料以及其他觀測資料同化至模式，所得到的電離層電子密度分布將可能比目前的反演系統好，並可改善目前200公里高度以下的反演誤差。

## 二、 前言

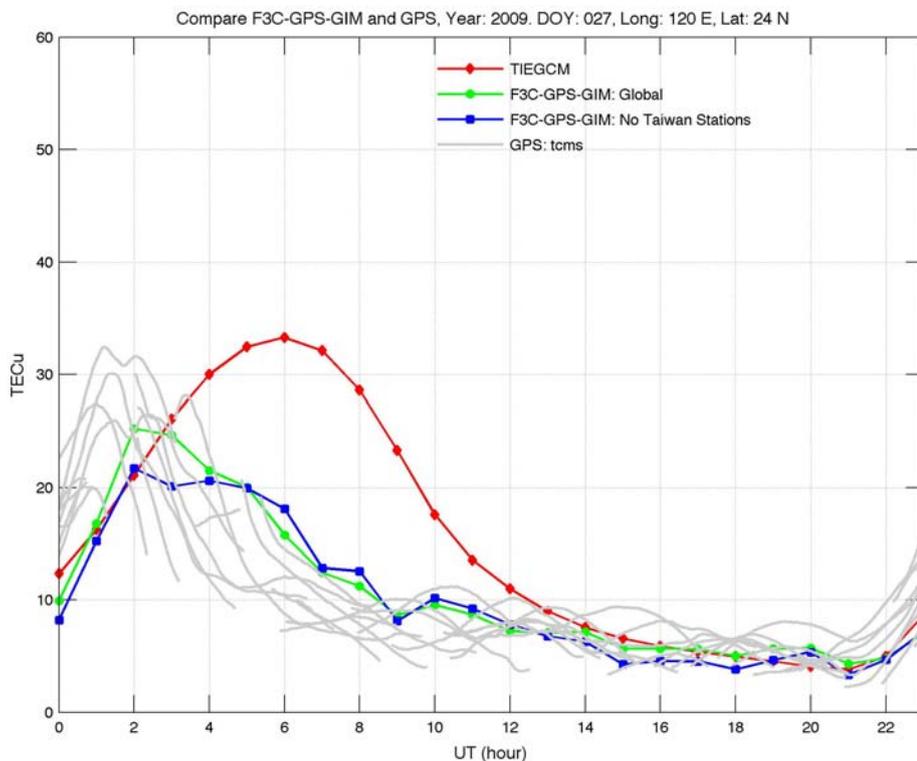
本年度原規劃支工作為繼續發展以Discrete Kalman Filter建立全球電離層全電子含量圖，以及Ensemble Kalman Filter的初步發展。同時希望能夠評估是否這些資料同化模式可以應用於福衛七號電離層反演，並以本計畫發展之資料同化模式進行福衛七號之模擬系統實驗。

## 三、 成果報告

利用福衛三號觀測以及地面 GPS 站觀測資料同時同化到本計畫以 discrete Kalman filter 所建立之資料同化模式，並將地面 GPS-TEC 資料與同化後結果比較，圖一顯示紅線為利用 NCAR-TIEGCM 輸出的背景場於台灣上空( $120^{\circ}\text{E}$ ,  $24^{\circ}\text{N}$ )的全電子含量在 2009 年 1 月 27 日一天內變化情形，可以看到背景場在 0600 UT (1400 LT)達到最大值，而同化後的結果（綠線）顯示全電子含量在 0200 UT (1000 LT)即達到最大值，其結果與該點附近地面 GPS 接收站之全電子含量觀測（灰線）相近，如果我們再次進行資料同化模式的運算，並忽略該地點的地面 GPS 資料，則會得到藍線的結果，此結果雖不如綠線一般與地面觀測站相近，但仍然顯示最大全電子含量出現的時間為 0200 UT (1000 LT)，顯示即便該點附近之地面 GPS 站資料未同化至模式，但附近的地面 GPS 資料仍足以影響其結果，使得同化後的結果與背景場有很大的差異。圖二顯示資料同化模式僅同化福衛三號資料，並嘗試同化一天，事件前後一天（共三天），前後兩天（共五天）的福衛三號電離層掩星資料（同化電離層垂直電子濃度積分後之全電子含量），結果顯示掩星資料產生的結果是較背景場較低的全電子含量，但最大全電子含量與背景場相近。

我們也在多個區域進行類似的比較，圖三顯示於  $130^{\circ}\text{E}$ ， $-24^{\circ}\text{N}$  澳洲中

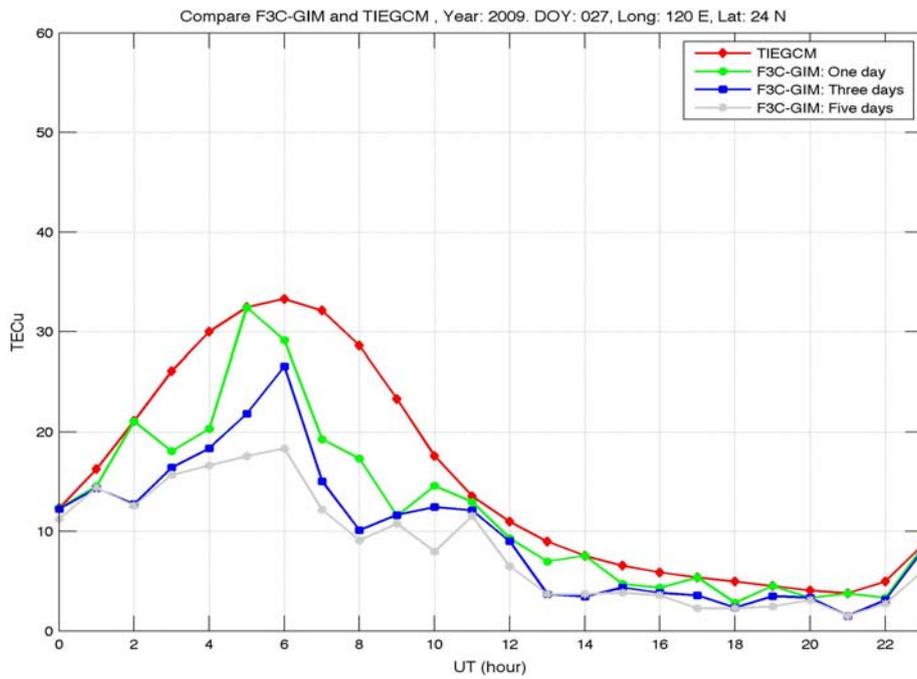
部得到相似於圖一的比較，結果一樣顯示包含地面 GPS 觀測站的同化結果與地面 GPS 站資料較接近，而排除地面 GPS 資料的同化結果則不若圖一所顯示與包含地面 GPS 資料結果如此相近，推測原因是澳洲附近所同化的地面 GPS 站較少，去除掉該點附近的地面站資料會使結果差異變大。圖四則顯示僅同化福衛三號資料之結果，再次顯示僅在特定的時間點，全電子含量比較背景場有明顯下滑趨勢，顯示福衛三號資料僅於幾個時間點在該區域有觀測量，並影響資料同化模式的結果。



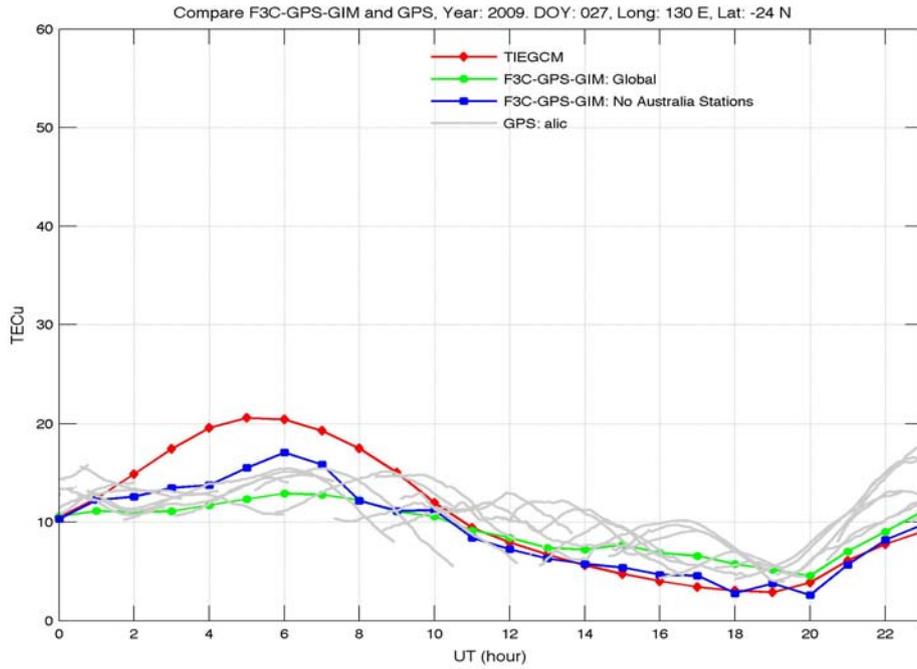
圖一、資料同化模式於 120°E，24°N 之背景場(紅線)、同化後之全電子含量(綠線)、該點附近之地面 GPS 觀測之全電子含量(灰線)、忽略該地點附近地面 GPS 站資料之同化模式結果(藍線)。

本階段工作得到一個重要的啟示，即地面 GPS 觀測站的資料對於福衛三號的資料同化模式有重要的影響，因此下階段工作重點為評估在現有福衛

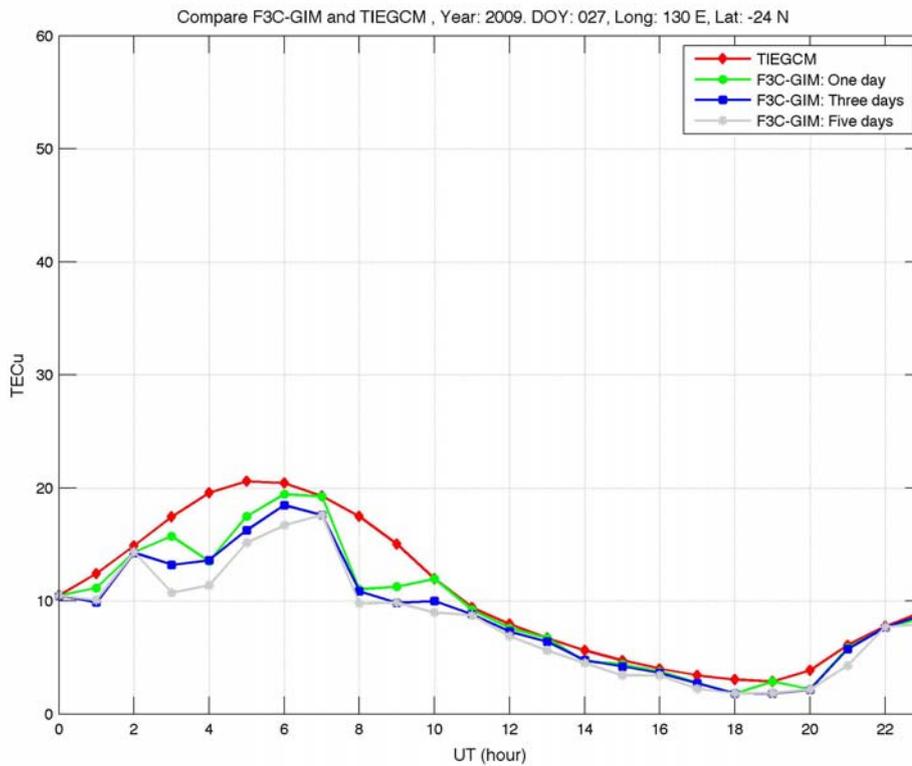
三號的觀測點，以及未來福衛七號可得到的觀測點之下，要選取多少地面 GPS 站資料，使得資料同化模式可以得到改進的結果之下，同時保有運算效率，並且可以得到與地面驗證站的資料較為接近的結果。



圖二、資料同化模式於 120°E，24°N 之背景場(紅線)、同化一天(綠線)、三天(藍線)、五天之福衛三號觀測全電子含量(灰線)同化模式結果。

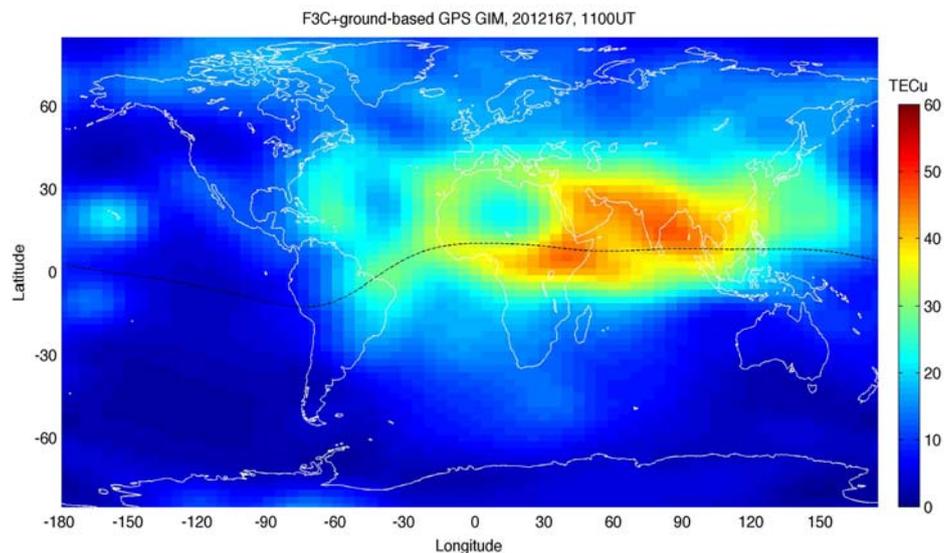


圖三、資料同化模式於  $130^{\circ}\text{E}$ ， $-24^{\circ}\text{N}$  之背景場(紅線)、同化後之全電子含量(綠線)、該點附近之地面 GPS 觀測之全電子含量(灰線)、忽略該地點附近地面 GPS 站資料僅同化福衛三號觀測之結果(藍線)。

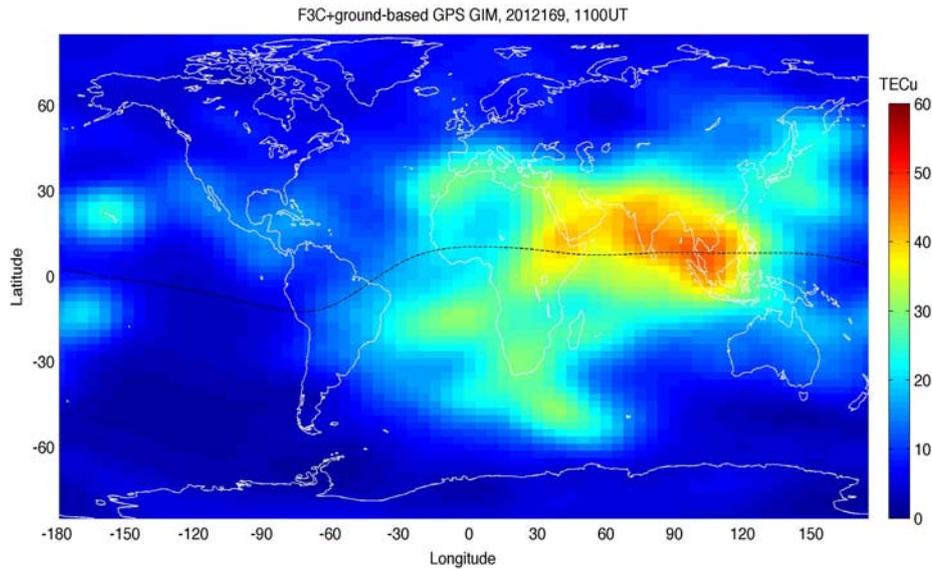


圖四、資料同化模式於  $130^{\circ}\text{E}$ ， $-24^{\circ}\text{N}$  之背景場(紅線)、同化一天(綠線)、三天(藍線)、五天之福衛三號觀測全電子含量(灰線)同化模式結果。

經過上述評估後，我們確認地面 GPS 接收機網對於輔助福衛三號觀測建立電離層資料同化的重要性，並將此技術應用於 2012 年 6 月 17 日的小規模太陽磁暴對地球電離層電子密度的影響觀測。圖五顯示以本計畫所建立的全球電子含量(TEC)分布圖於磁暴前 (2012 年 6 月 15 日) 之結果，圖六則顯示磁暴天的全電子含量變化，可以看到北半球中高緯度的全電子含量在磁暴天減少，並且可以看到在經度 0-30 度南半球呈現磁暴時常出現之 storm enhanced density (SED)現象。



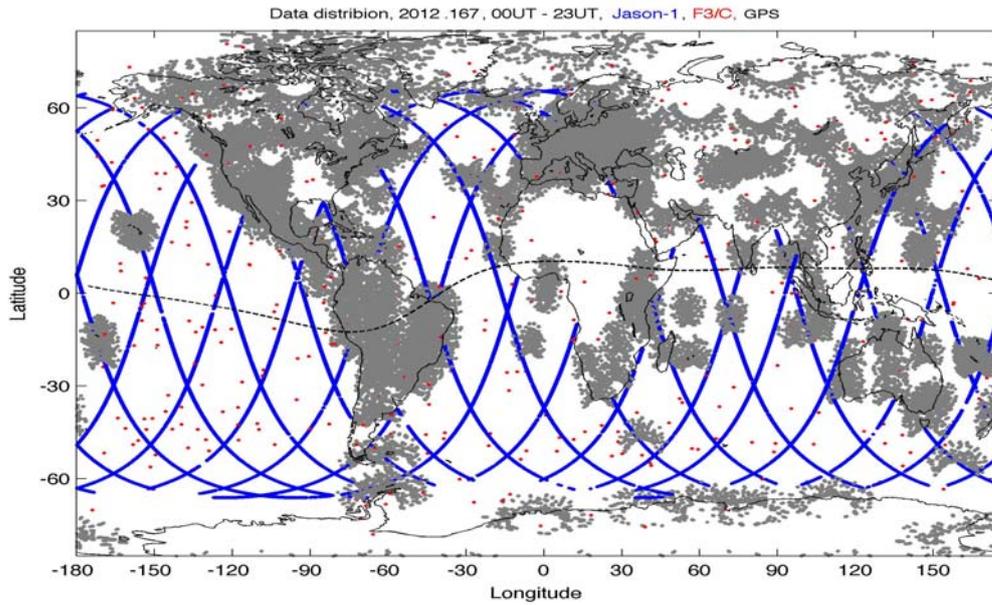
圖五、結合地面 GPS 與福衛三號觀測建立之全球電子含量圖於磁暴前 (2012 年 6 月 15 日)之觀測結果。



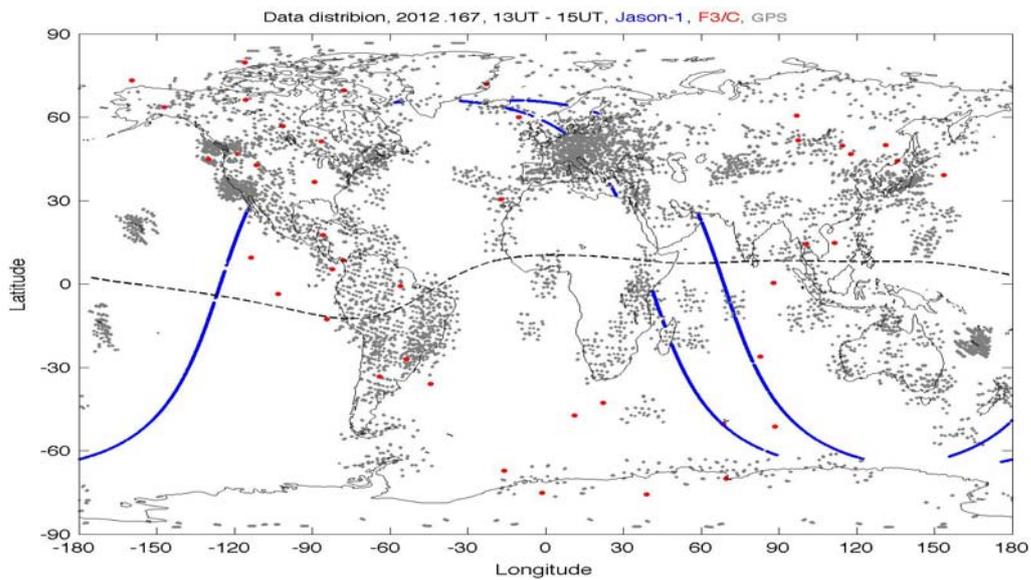
圖六、結合地面 GPS 與福衛三號觀測建立之全球電子含量圖於磁暴天 (2012 年 6 月 17 日)之觀測結果。

### 評估同化 JASON-1 TEC 資料至全球電離層 TEC map

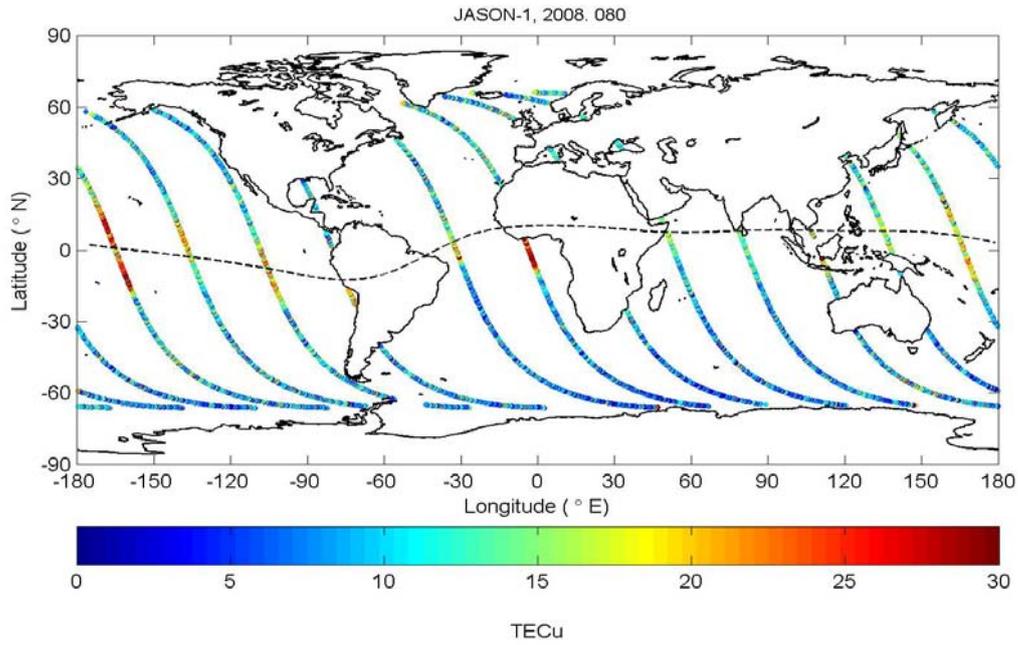
由於福衛三號的觀測點數在海面上仍嫌不足，利用海面測高衛星如 TOPEX 或其後繼之 JASON 衛星可以提供進一步的觀測資訊，因此我們評估比較分析福衛三號，地面 GPS 接收站資料，以及 JASON-1 於一天中 (圖七) 以及 3 個小時 (圖八) 的觀測點分布，圖中可知，JASON-1 的觀測點可補助目前日益減少的福衛三號掩星觀測資料點，圖九則顯示 JASON-1 TEC 可以捕獲低緯度電離層赤道異常(equatorial ionization anomaly, EIA)現象，圖十更進一步累積多天 JASON-1 TEC 資料，除了可以看到 EIA，也可以看到 EIA 因為季節效應產生的南北半球不對稱分布。此外，我們進一步比較傳統 GIM，JASON-1 TEC，以及本計畫建立的電離層 TEC map 模式尚未同化 JASON-1 TEC 時的差異 (圖五)，可以看到 GIM 的結果較為高估，而本計畫建立之電離層 TEC map 則較為低估，因此同化 JASON-1 TEC 對於本計畫發展之 TEC 資料同化模式具有重要性。



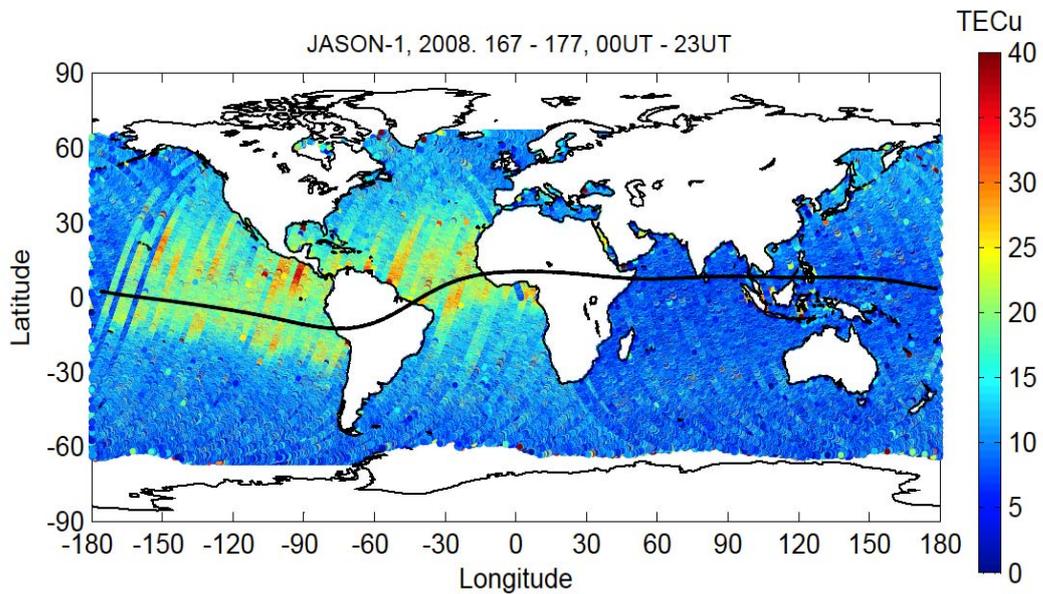
圖七、JASON-1(藍色)、F3/C(紅色)和地面 GPS 觀測站(灰色)於 2012 年 DOY: 167 (00-23UT) 累積資料點數的分佈情形。



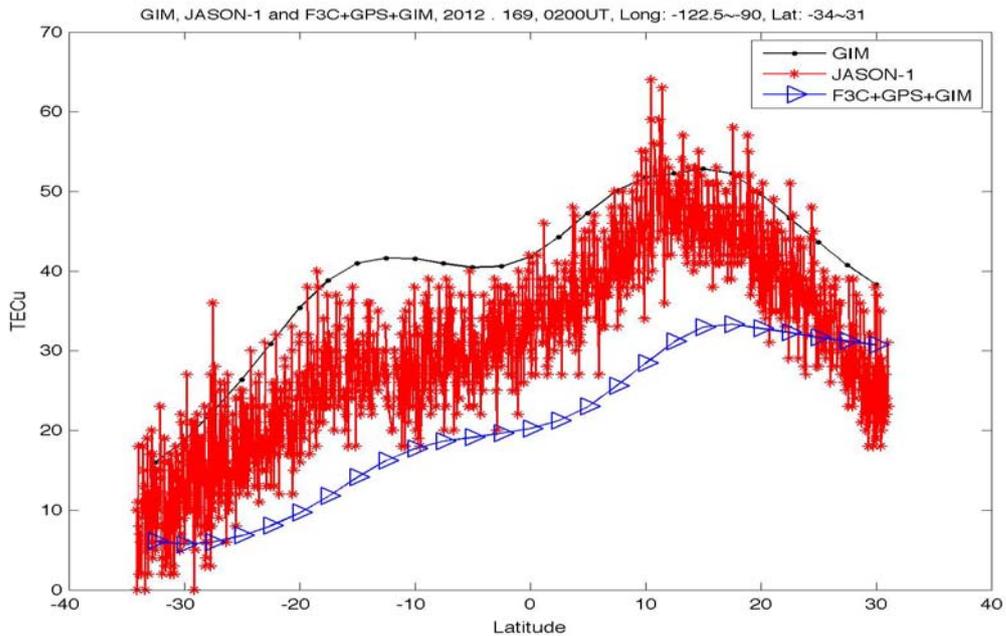
圖八、JASON-1(藍色)、F3/C(紅色)和地面 GPS 觀測站(灰色)於 2012 年 DOY: 167 三小時累積資料點數的分佈情形。



圖九、JASON-1 一天的電離層全電子含量觀測，該衛星可觀測電離層赤道異常現象(equatorial ionization anomaly, EIA)。

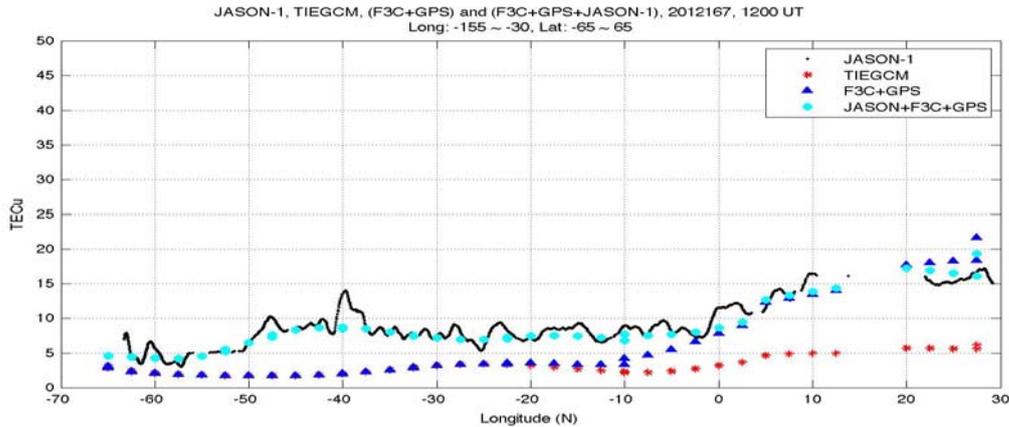


圖十、累積 10 天的 JASON-1 TEC 觀測資料，可以明顯看到南北不對稱的電離層赤道異常峰(asymmetric EIA crests)。



圖十一、比較傳統 global ionospheric map (GIM) (黑線)，JASON-1 (紅線)，以及本計畫以地面 GPS 接收站以及福衛三號觀測建立之電離層模式位於 JASON-1 軌道的 TEC 比較，JASON-1 觀測將有助於提升目前較為低估的 TEC 值。

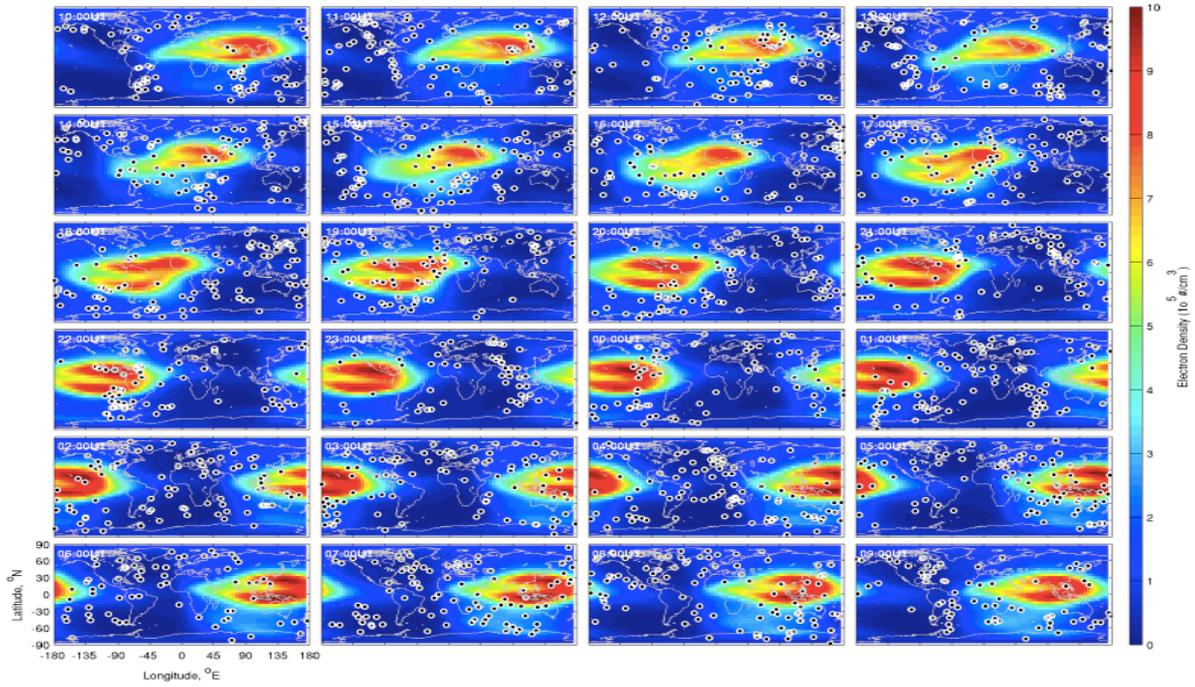
圖十二比較同化 JASON-1 資料後之 TEC 結果與未同化該觀測量之結果比較，並且與背景場以及 JASON-1 自身觀測之比較，可以看到考慮 JASON-1 觀測後之資料同化結果與 JASON-1 的觀測較為接近，因此該衛星資料的觀測在本季的工作中，已經包含在資料同化模式的程式模組中。



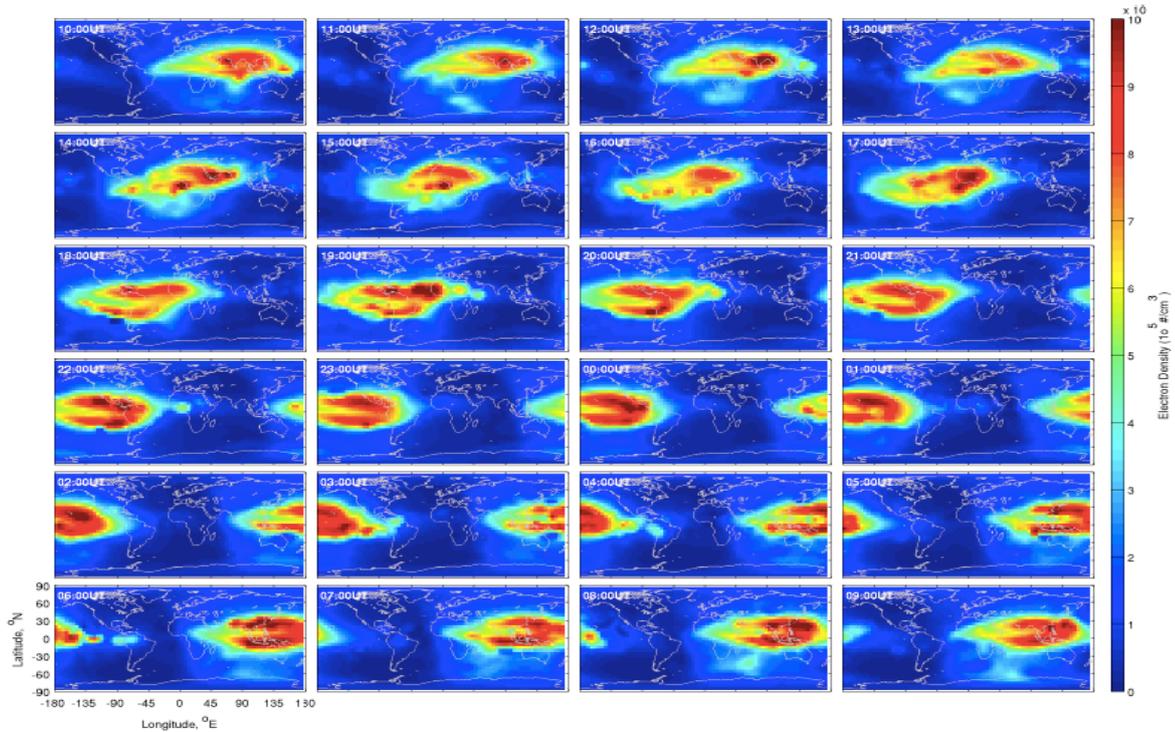
圖十二、比較同化福衛三號與地面 GPS 以及 JASON-1 資料後之 TEC 結果(水蘭圓點)與未同化 JASON-1 之結果(藍三角)，並與背景場(紅圓點)、JASON-1 觀測比較。

### 以 Ensemble Kalman filter 同化福衛三號資料至 NCAR TIEGCM

除了評估 JASON-1 TEC 對於本計畫所建立之電離層 TEC 分布圖的影響之外，本季工作包括利用 ensemble Kalman filter 進行福衛三號資料同化，本計畫所採用之方法為將背景場 NCAR TIEGCM 以調整 f10.7 或是大氣潮汐參數方式得到 90 各 ensemble number，並計算這些 ensemble number 的 error covariance，同時將福衛三號資料在這 90 個 ensemble number 進行 Kalman filter 的計算（圖十三），並進一步更新 error covariance 以及 Kalman gain，在進一步的經由 Kalman filter 的步驟更新 model output，以此流程得到圖十四的資料同化結果，可以看到背景場的電子密度在經過同化觀測量之後，觀測點附近的電離層電子密度被修正到較大的值。後續工作將嘗試考慮電子密度以外的其他 state vector，例如電離層電場，高緯度電離層電位等參數。本項工作目前同化的是掩星觀測經過 CDDAC 反演為電子濃度垂直剖面變化。



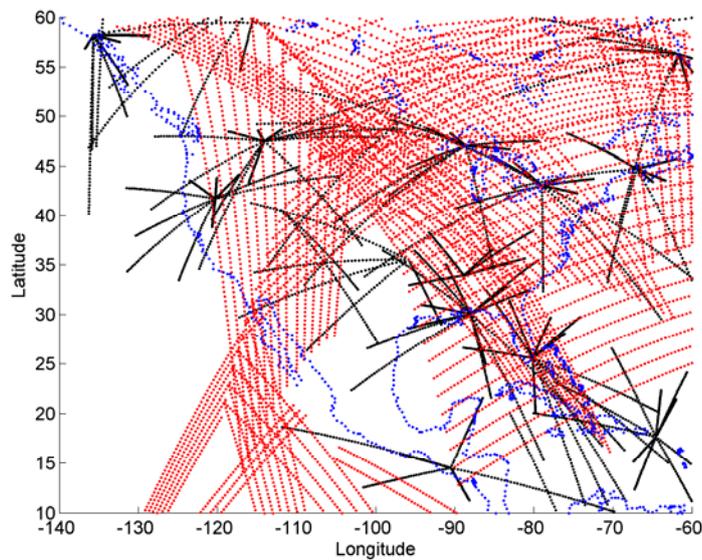
圖十三、NCAR-TIEGCM 背景場於電離層 F 層(約 300 km altitude)以及福衛三號觀測資料點位置(白色空心圓圈)。



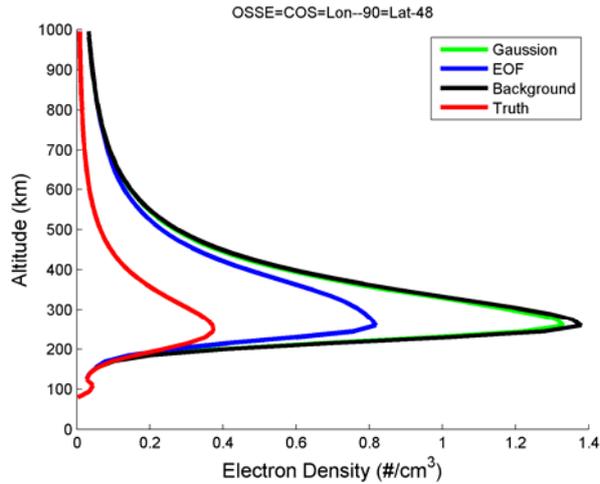
圖十四、以圖十三之背景場模式，以及福衛三號觀測，進行 ensemble Kalman filter data assimilation 所得到之電離層 F 層電子密度分布。

### 評估以資料同化模式反演福衛三、七號掩星觀測：

本計畫同時評估以資料同化模式進行福衛三號掩星觀測反演之可能性。利用 Kalman Filter 並考慮三維 error covariance，圖十五顯示搭配地面 GPS-TEC 射線以及福衛三號水平 TEC 射線所包含的空間分布，以及反演後的結果（圖十六），由圖十六結果可知，利用 EOF 與高斯分布所建立的三維 error covariance 進行的 Kalman Filter 資料同化得到的結果最接近本模擬實驗的真實場。



圖十五、掩星 TEC (紅線)、地面 GPS-TEC (黑線)，共同使用於進行資料同化反演福衛三號資料實驗。



圖十六、以觀測模擬系統模擬以資料同化反演福衛三號觀測的結果，紅線為真實結果，黑線為初始場，綠線為以三維高斯分布作為 error covariance 之結果，藍色為結合 EOF 以及高斯分布所建立的 error covariance 的反演結果。

#### 四、 結語

本分項工作進行了多項資料同化研究工作，包括同化地面 GPS 資料、福衛三號與海洋測高衛星資料建立全球 TEC 圖、ensemble Kalman Filter 先期發展，以及以資料同化技術反演福衛三號或七號的掩星反演可行性評估。所受補助之金額約 70 萬元，遠低於原先規劃工作所需之預算規模，因此許多工作應可以更進一步深入研究，但礙於經費（人力）限制，並無法在本年度完成。即便如此，本年度的預設研究目標皆已達成。

## 五、 自評表

原規劃目標	完成與否	說明
Ensemble Kalman filter 同化資料於理論電離層模式	完成	利用 NCAR DART 與 TIEGCM 同化電離層垂直電子密度於同化系統中，發現可以改進電子密度以及中性大氣溫度變化。
Discrete Kalman filter與3-D error covariance 建立	完成	本報告所使用的資料同化模式即為包含 3D error covariance 的 discrete Kalman filter based 資料同化模式。
評估利用資料同化模式反演福衛七號電離層掩星觀測	完成	以 discrete Kalman filter 以及 IRI 模式或 TIEGCM 模式為背景場，並同化掩星全電子含量。
先期計算分析地面GPS與福衛三號電離層資料	完成	本工作已完成，並新增 JASON-1 觀測資料。
評估利用福衛七號觀測建立即時全球電離層圖	完成	基礎的同化模式已經完成，需要太空中心確認福衛七號軌道以及接收哪些 GNSS 衛星後即可進行相關評估工作。