

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(5.1): 電離層掩星資料反演軟體及軟體使用手冊(第二版)、

測試報告

期末報告計畫名稱：掩星資料處理技術建置：掩星資料處理系統與

電離層自主反演技術發展

執行期間： 2012/02/18~2013/02/17

分項工作管理人：蔡和芳

參與人員：吳靜美、黃成勇

中 華 民 國 1 0 2 年 2 月

一、 摘要

自主發展之電離層反演模組包含一次差電離層超量相位估算程序及電離層反演程序。前者由 GPS 掩星觀測量估算電離層的超量相位 (excess phase)；後者以幾何光學法估算電離層偏折角 (bending angle)，最後以 Abel 反演積分法求得電離層電子密度剖線。現階段以 CDAAC 最新版軟體 (4.00 版) 為藍本，配合其自動化流程控制介面設計，將已發展之電離層反演模組整合到 CDAAC 4.00 中。測試結果顯示目前已可自行反演出福衛三號電離層電子密度剖線。

二、 前言

本計畫為應用福衛三號 GPS 掩星電離層觀測量於太空天氣之監測與預報，規畫自主發展 GPS 掩星電離層反演程序，並與美國 UCAR 所發展之 CDAAC 軟體整合，以利提供更精準且更密集的電子密度等電離層觀測參數，改善電離層模式之初始條件，使國內監測或預測太空天氣劇烈變化之能力大為提升。這些科研成果直接應用於國防民生及氣象之防災預警，實質彰顯 FORMOSAT-3/COSMIC 掩星觀測的科學應用面價值。

在研發電離層反演程序的過程中，發現了自主發展福衛三號電離層反演所面臨的挑戰。首先發現 CDAAC 所估算之電離層超量相位 (excess phase) 有許多非物理性的奇異點 (singular point)。再比較交大團隊和 CDAAC 所估算的 GPS、LEO 時錶偏差值，對電離層都卜勒頻移 (Doppler shift) 的影響，結果顯示：CDAAC 以零次差估算之電離層超量相位，可能有周波脫落未加以補償，因此無法直接用來進行單頻偏折角反演。其中，交大和 CDAAC 所估算的 GPS 時錶偏差相當一致，因此懷疑奇異點也和福三 LEO 時錶偏差有關。

為了判斷何者較為可信，故再取國際公認 LEO 時錶品質較佳的 GRACE 資料，進行分析。結果顯示：反演後的電離層電子密度剖線和 CDAAC 一致，因此初步證明了自主電離層反演的可行性。

儘管 CDAAC 以零次差分別估算 L1 和 L2 雙頻之電離層超量相位，但在電離層反演程序中，假設雙頻訊號沿直線傳播，而對超量相位做雙頻差分，估算電波路徑上的電離層總電子含量 (TEC)，再以 TEC 反演出電離層電子密度剖線。而 LEO 時錶偏差項在雙頻差分時，就互相抵消了，因此可以說，其 TEC 反演法與 LEO 時錶偏差無關。

反觀本文所採用的單頻偏折角反演，需讀入無 LEO 時錶偏差之電離層超量相位，而上述之分析比較結果，都顯示福三 LEO 時錶偏差之精度很可能直接影響電離層超量相位之精度，而反演出不良的電離層電子密度剖線，所以必須改用空中一次差以去除 LEO 時錶偏差，這使得原本規畫只發展電離層反演程序，還須另外發展一次差電離層超量相位估算程序，才能反演福衛三號電離層剖線。因

此本次進度所提之電離層反演程序中，已包含了一次差電離層超量相位估算。

三、 成果報告

自主發展之電離層反演模組包含一次差電離層超量相位估算程序及電離層反演程序兩部分。與 CDAAC 4.00 軟體整合後的資料流程如圖 1 至圖 5 所示。圖 1 中的 ioninv.pl 讀入 GPS 掩星觀測量 (podCrx)、絕對 TEC 觀測量 (podTec)、GPS 時錶校正值 (comClr) 等輸入資料，產出電子密度剖線 (ednPrf)。輸出入資料說明見表 1 和表 2。演算說明分述如下。

一次差電離層超量相位估算程序以空中一次差估算電離層超量相位。得以進行一次差的條件是，單一低軌衛星同時接收來自一顆掩蔽中的 GPS 衛星的訊號和另一顆非掩蔽中的參考 GPS 衛星的訊號。前者之 GPS-LEO 連線稱之為掩星連線 (occultation link)；後者稱之為參考連線 (reference link)。為進行空中一次差估算，本程序需讀入參考連線上的絕對 TEC 值 (podTec)，以求解掩星連線上的電離層超量相位與都卜勒頻移 (Doppler shift)。

圖 2 中的 ion_inv.f 將每份下傳的 GPS 掩星觀測量 (podCrx) 依掩星事件分成很多小檔 (podPhs)，每個小檔只存放一個掩星事件的觀測量。一次差電離層超量相位估算程式 exphaseSD_sh.m 依每個小檔的檔名，在 ionPhs 檔中找到相應之 GPS、LEO 坐標及速度分量，再從絕對 TEC 檔 (podTec) 找到可配對的參考連線，配合 GPS 時錶校正值 (comClr) 估算電離層超量相位。

電離層偏折角程式 benim_sh.m 以幾何光學法估算電離層偏折角及相應之射距離 (impact distance)。最後以電離層反演程式 abel_sh.m，以 Abel 反演積分法求得電子密度剖線 (ednPrf)。其結果樣本如圖 6 所示。

圖中比較自主發展之電離層反演模組所求得之電子密度剖線與 CDAAC 反演之電子密度剖線均有一致的趨勢，顯示反演結果具有定性上的可信度。定量上，圖 6a 顯示自主剖線略低於 CDAAC 剖線。在電離層層峰高度 hmF2 (約 250 公里處)，最大電子密度 NmF2 相差約 $4 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ，低於 CDAAC 約 30%。圖 6b 則反之，自主剖線略高於 CDAAC 剖線，但 hmF2 則較低。圖 6c 顯示兩剖線在 600 公里以上相當吻合，hmF2 也相當接近，惟 NmF2 相差 30% 左右。圖 6d 則顯示兩剖線在 600 公里以下相當接近，但 600 公里以上，CDAAC 剖線皆為無物理意義的負值。圖 6e 類似圖 6c；圖 6f 類似圖 6d，在 600 公里以上，CDAAC 剖線出現不連續的奇異點及無物理意義的負值，而自主反演程序則可排除這些狀況。

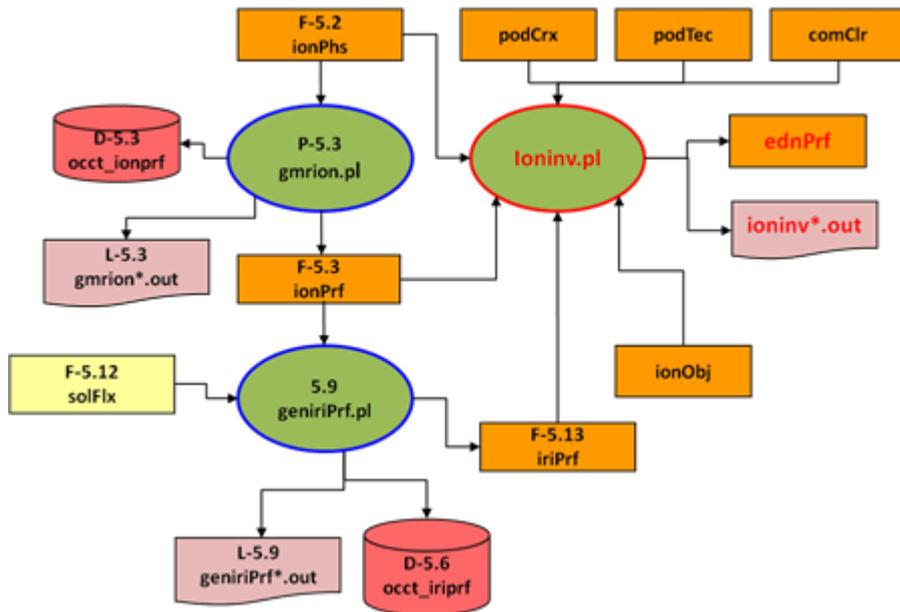


圖 1：自主發展之電離層反演程序（紅字部分）與 CDAAC 軟體之電離層反演程序（黑字部分）整合之資料流程圖第 1 層。產出之 ednPrf 相當於 CDAAC 軟體產出之 ionPrf。

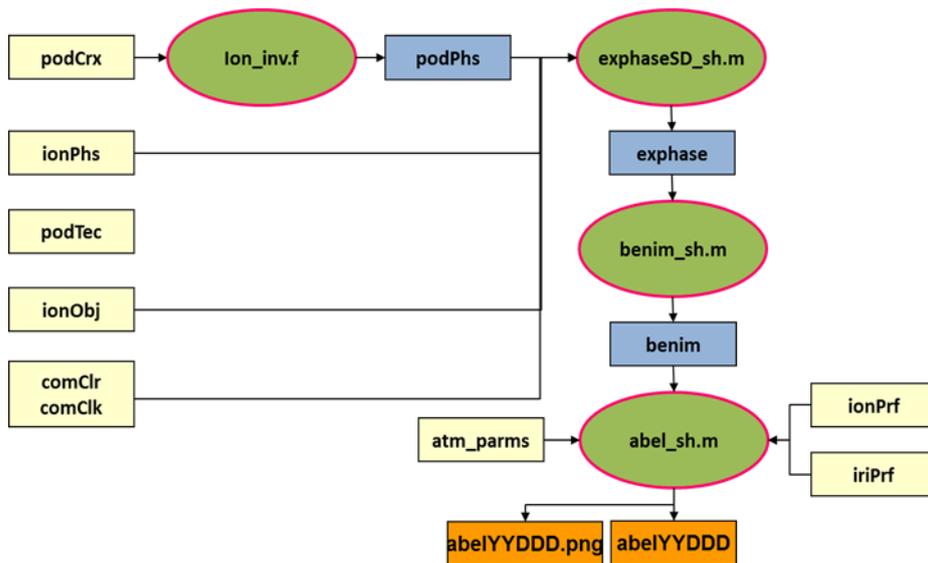


圖 2：自主發展之電離層反演模組第 2 層 (ioninv.pl)。

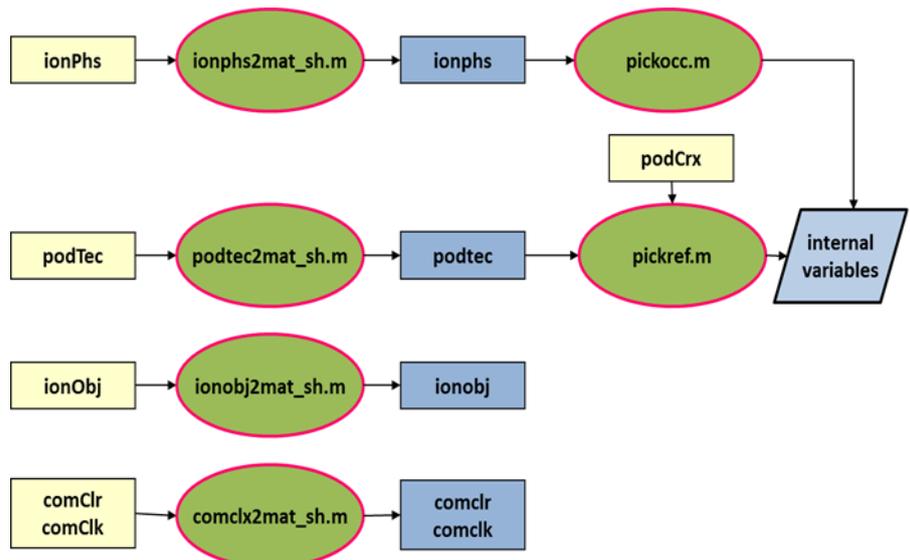


圖 3：自主發展之電離層反演模組第 3 層 (exphaseSD_sh.m)。

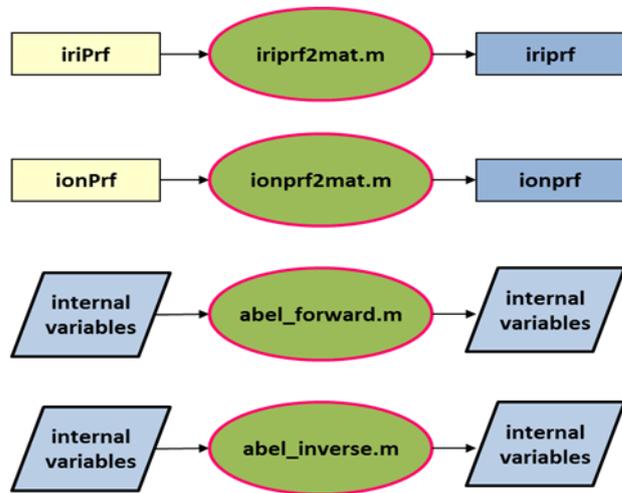


圖 4：自主發展之電離層反演模組第 3 層 (abel_sh.m)。



圖 5：自主發展之電離層反演模組第 4 層 (pickref.m)。

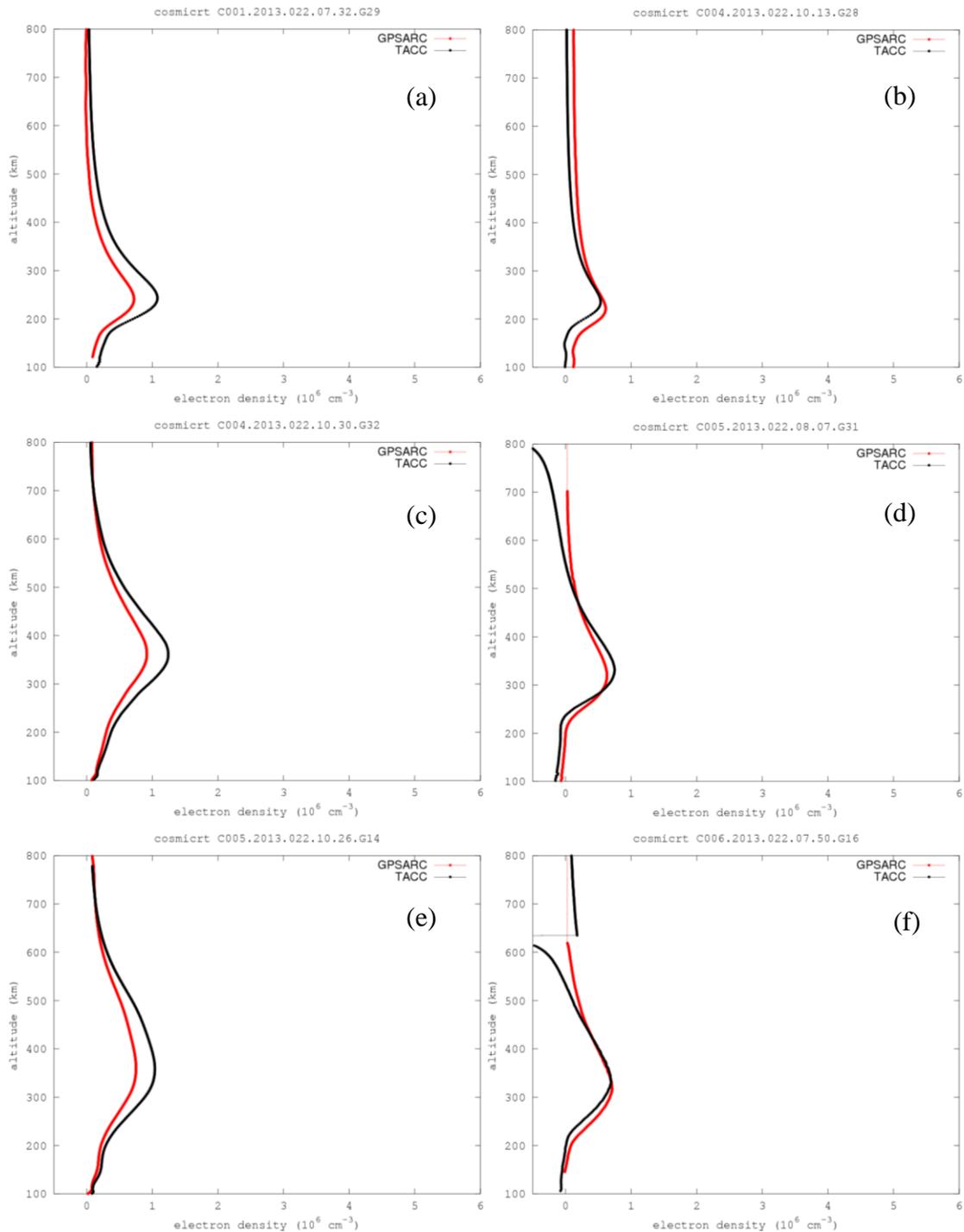


圖 6：自主發展與 CDAAC 電離層反演之電子密度剖線比較。

表 1：自主發展之電離層反演程序需輸入資料檔案命名規則及說明，其中 YYYY 為年份，DDD 為日數，LLL 和 IIII 均為低軌衛星編號，NN 為下傳編號 (dump number)，SSSS 和 VVVV 均為版本代號，TT 為 GPS 接收天線編號，HH 為小時，MM 為分鐘，UUUU 為紀錄時間的長度，GGG 為 GPS 衛星編號。

檔名	說明
comClr_YYYY.DDD.LLL.NN_SSSS.VVVV_clk	GPS 時錶校正值

podCrx_YYYY.DDD.LLL.NN.TT_crx.gz	GPS 原始觀測量，含 L1、L2 載波相位觀測量和 C/A、P2 虛擬距離觀測量（只用 POD 天線接收之資料，1 秒取樣）
podTec_IIII.YYYY.DDD.HH.MM.UUUU.GGG.TT_SSSS.VVVV_nc	絕對 TEC 觀測量（用於參考連線）
ionObj_IIII.YYYY.DDD.HH.MM.GGG_SSSS.VVVV_pl	電離層掩星物件表
ionPhs_IIII.YYYY.DDD.HH.MM.GGG_SSSS.VVVV_nc	電離層超量相位及相應之 GPS、LEO 坐標和速度分量（只用後者，不用前者）
ionPrf_IIII.YYYY.DDD.HH.MM.GGG_SSSS.VVVV_nc	電離層電子密度剖線（只用於反演結果比較）
iriPrf_IIII.YYYY.DDD.HH.MM.GGG_SSSS.VVVV_nc	IRI 電離層電子密度模式值（只用於決定剖線最高點之電子密度值）

表 2：自主發展之電離層反演程序可輸出資料檔案命名規則及說明，其中檔名代號說明見表 1。

檔名	說明
ednPrf_IIII.YYYY.DDD.HH.MM.GGG_SSSS.VVVV.mat	電離層電子密度剖線
ednPrf_IIII.YYYY.DDD.HH.MM.GGG_SSSS.VVVV.png	自主與 CDAAC 產出之電子密度剖線比較圖

四、 結語

原規畫發展之電離層反演模組，因福衛三號 LEO 時錶偏差品質不如預期，因此新增一次差電離層超量相位估算程序，以空中一次差估算福衛三號電離層超量相位，再以幾何光學估算偏折角與射距離，最後以 Abel 反演積分法估算電子密度剖線。

比較自主反演剖線與 CDAAC 剖線顯示，兩者有一致的趨勢，顯示兩者都有很高的可信度。自主剖線之 NmF2 通常低於 CDAAC 值，最大可達 30% 左右。hmF2 則等於或低於 CDAAC 值。在與 CDAAC 4.00 進行整合測試結果顯示，目前已可自行反演出福衛三號電離層電子密度剖線。

五、 自評表

原規劃目標	完成與否	說明
電腦硬體採購與系統安裝測試	100%	
電離層反演	100%	
大氣反演程式整測	100%	

電離層反演程式整測	100%	
結案報告撰寫	100%	