

區域性電離層資料同化模式發展

Development of regional ionospheric data assimilation system

陳延昇¹(Chen, Y. S.) 陳佳宏¹(Chen, C. H.)

¹國立成功大學地球科學系

¹Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University

摘 要

全球衛星定位導航系統 GPS(Global Positioning System)能為地球大多數地區提供精準且即時的定位，為人類帶來方便的生活，如衛星導航、無人機駕駛以及自駕車等。但是 GPS 衛星訊號在通過電離層時，會受到干擾而影響 GPS 定位準確度，而這也是 GPS 定位誤差的主要來源。目前最常使用電離層模式(例如 Klobuchar Model，全球電離圖等)進行修正，但由於這些模式皆是全球尺度的模式，對於區域性的定位修正上來說網格的格子點太大了，因此需要更精確的區域性電離層預報模式來改善這個問題。

本研究利用卡爾曼濾波法(Kalman filter)結合國際參考電離層(International Reference Ionosphere, IRI)模式以及電離層電漿濃度資料，建立台灣上空的高空間解析度電離層圖。西元 2020 年 6 月 21 日台灣時間下午四點左右有日全蝕發生，電離層明顯受到影響，因此我們挑選該時段做為測試。我們設定以每 1°經緯度作為一個模式的網格點，將網格建立在台灣周圍上空(110°E~130°E, 15°N~30°N)，再加入福衛七號與地面 GPS 接收網在格林威治時間八點(0800 UT)所測得的電離層全電子含量(TEC)資料，以卡爾曼濾波法修正 IRI 模式資料形成電離層圖。目前已經成功讓衛星資料修正其垂直位置的模式網格點，並加入局地化(Localization)，使資料點的影響範圍能擴散至周遭區域，讓電離層圖更加合理。

關鍵字：全球衛星定位導航系統、卡爾曼濾波法、國際參考電離層、福爾摩沙衛星七號

一、前言

(一)電離層與GPS定位誤差

電離層位於地表上空85至1000公里，由於比起其他大氣層更靠近太陽，電離層中的氣體分子接收到更多的能量，因而產生電離的現象，稱為「光化游離」。光化游離的作用雖然能保護地球減少太陽能量的影響，但游離產生的電子與離子卻會干擾GPS電波的傳遞，造成延遲和誤差(Chou, 2017)，這也是GPS定位誤差最主要的來源。因此，若是能了解電離層的狀態甚至預測電離層的變

化，對GPS衛星定位的修正就能有很大的幫助。

(二)GPS的電離層誤差校正

目前最常在GPS定位誤差校正所使用的電離層數值來源取自於電離層物理模式，只要給定初始條件，模式會自動生成具有完整空間及時間分布的電離層數值分布圖，在定位校正上有很好的效果(Bilitza, 2001)。但電離層物理模式有兩個缺點，首先，目前所使用的電離層物理模式幾乎都是屬於全球尺度的物理模式，在像是台灣上空這樣的小範

圍區域沒有良好的解析度，而且利用初始條件及物理參數計算出來的電離層物理模式會受到邊界條件影響，沒辦法表現出真實的電離層狀態，在定位校正的效果上會大打折扣。

另一種得到電離層數值的方法為利用人造衛星直接觀測電離層並取得衛星資料，衛星資料的電離層數值雖然接近真實的電離層數值，但有一個明顯的問題。衛星資料只會得到人造衛星與地面接收站之間在某高度的投影點的電離層數值，也就是說無法像電離層物理模式一樣有完整的空間分布，無法修正沒有資料的區域。

研究目結合上述電離層模式與觀測的優點，建構出區域性台灣上空的高解析度電離層數值分布圖。

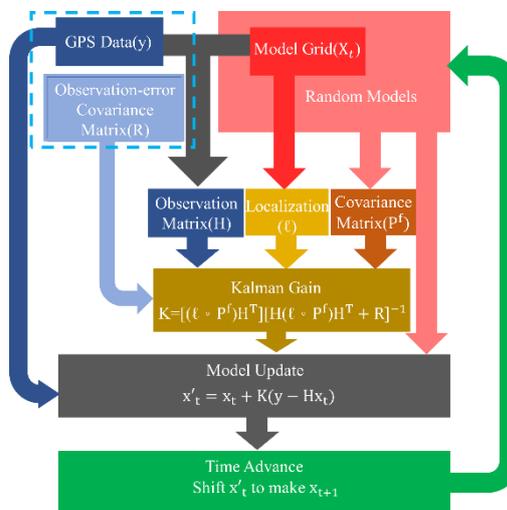
二、 研究方法

研究所使用的方法為「資料同化法」(data assimilation)，這項方法最常應用在天氣預報以及洋流預測，現在則是應用在太空天氣，也就是電離層的方面。在不同的資料同化法中，我們選擇了「系集卡爾曼濾波法」(ensemble Kalman filter, enKF) (Houtekamer & Mitchell, 2001)，因為這個方法比起其他同化方法有程式運行時間短、占用電腦資源較小等優點。

系集卡爾曼濾波法做法如下圖一所示。首先，我們給予物理模式不同的初始條件，產生40組不同的電離層狀態，其中包含測試日的電離層狀態，接著輸入測試當日的電離層衛星資料並取得進行同化所需要的計算參數。誤差斜方差矩陣(Covariance Matrix(P^f))定義為物理模式各個網格間誤差的關聯性，觀測矩陣(Observation Matrix(H))則是將模式的網格點數值內插進衛星資料所在的座標的轉換矩陣，局地化(Localization(ℓ))控制衛星資料對物理模式的修正在空間上的範圍，觀測誤

差斜方差矩陣(Observation-error Covariance Matrix(R))則是每筆衛星資料間誤差的關聯性，通常會設為常數。以上四種計算參數會組合成決定修正量的「卡爾曼權重」(Kalman Gain)，決定衛星資料對物理模式的修正量要比較靠近模式或者是衛星資料。

進到同化的過程，我們先將物理模式的網格點數值內插到衛星資料所在的座標並取得差值，將差值乘上卡爾曼權重得到同化後的變化量，而後帶入原本的模式即為一次同化後的電離層分布數值。卡爾曼濾波法有一個最大的優點，就是可以隨著時間更新進行多次同化，意即一次同化修正後的電離層圖可以作為下個時間的電離層模式初始值，再輸入新的衛星資料進行第二次同化，第二次同化後的模式又能再帶到下個時間進行第三次同化，如此進行多次隨時間更新的資料同化，原本的物理模式就能更加接近真實的電離層狀態。



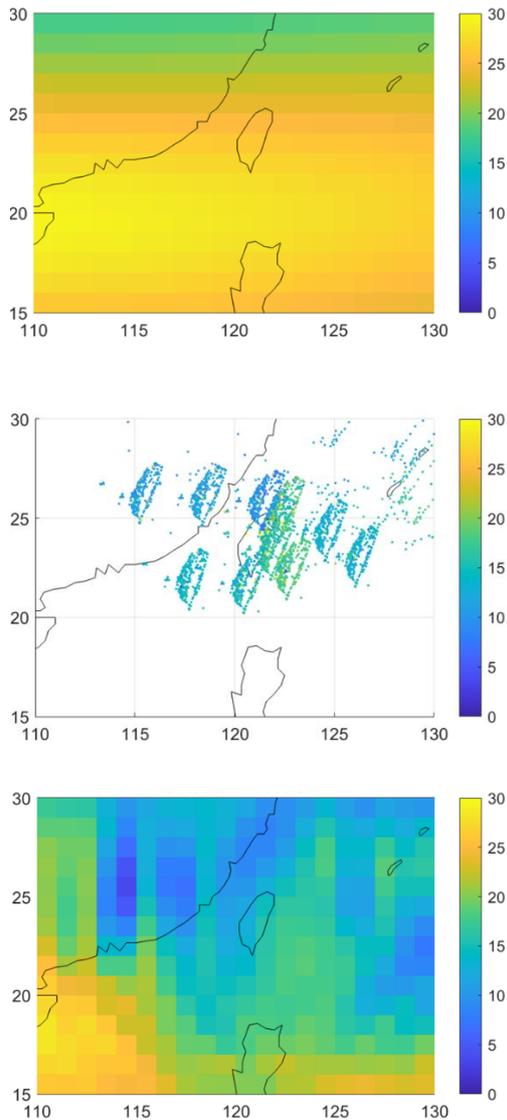
圖一、系集卡爾曼濾波法進行資料同化流程示意圖。

三、 成果

(一) 衛星資料對電離層物理模型的修正

成果圖(圖二)中的同化前物理模式的數值分布大多落在26-30個TECU，相較於衛星

資料(16-20個TECU)來說數值明顯偏高，在經過一次同化後，物理模式的數值在大多數衛星資料有覆蓋的地區有明顯下降，並且貼近衛星資料的數值，在台灣東部海域的區域效果最好。

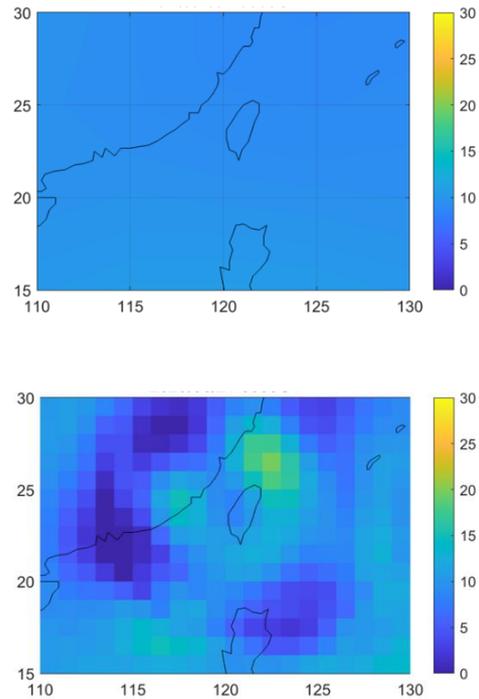


圖二、資料同化前後比較圖。

(二) 資料同化電離層圖與GIM的比較

GIM是目前最常在GPS定位修正中所使用到電離層的數值來源，也是一種全球尺度的電離層圖(Schaer, 1996)，其電離層數值的網格是以五度的經緯度作為間距。換句話說，整個台灣在GIM的網格中只佔了一至二格的空間，對於小

範圍的電離層結構以及變化呈現效果有限，更不用說高解析度的修正了。而我們的資料同化電離層圖可以自行調整模式的網格大小，目前所使用的是以一度經緯度做為網格間距的電離層圖。相較之下，我們的電離層圖更能反映出細部的電離層結構以及變化，在GPS定位誤差的修正上也能有更好的成效。

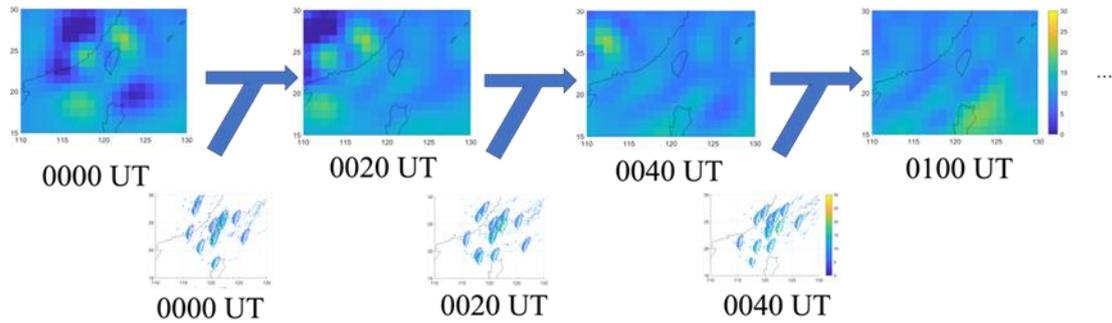


圖三、資料同化電離層圖與GIM的比較。

(三) 資料同化電離層圖隨時間的更新

在進行第一次同化的時候，有時會因為衛星資料分布不均，在某些缺乏資料的地區，模式的會產生修正上的偏差，如左圖中的深色區域。為了解決這個問題，我們把一次同化的電離層圖作為下個時間段(20分鐘後)的電離層模式初始值，輸入該時段的衛星資料進行第二次修正，第二次修正後，深色區域明顯減少，代表偏差的區域有被修正。而我們再將該電離層圖帶入下個時間段進行第三以及第四次同化，多次同化後幾

乎沒有偏差的區域，電離層圖更加接近真實的電離層狀態。



圖四、電離層圖隨時間多次同化流程圖。

四、 結論與未來工作

(一) 結論：

比起其他全球尺度的電離層模型，我們的電離層數值分布圖在台灣上空有更好的解析度以及準確度，並且能隨著時間更新進行多次修正，逐步提升準確度並接近真實的電離層狀態。

(二) 未來工作：

我們將嘗試繼續縮小目前所使用的電離層模式數值網格間距至0.25度經緯度甚至是0.1度來實現更高解析度的電離層圖以達到公分級的GPS定位校正，並且將目前所使用的測試模型替換成具有預報能力的電離層模型，以嘗試三至六小時內的電離層預報。期盼我們的研究能在衛星導航以及自駕車等應用上能夠有所貢獻。

五、 參考資料

Min-Yang Chou, 2017, Observations and Simulations of Atmosphere-Ionosphere Wave Coupling (Doctoral thesis, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan).

Dieter Bilitza, 2001, International Reference Ionosphere, Radio Science, Volume 36, Issue 2, 261-275.

P. L. Houtekamer¹ and Herschel L. Mitchell¹, 2001, A Sequential Ensemble Kalman Filter for Atmospheric Data Assimilation, Monthly Weather Review, Volume 129, Issue 1, 123-137.

Schaer, S., Beutler, G., Rothacher, M., and Springer, T. A., 1996, Daily Global Ionosphere Maps Based on GPS Carrier Phase Data Routinely Produced by the CODE Analysis Center, Proc. IGS Analysis Center Workgroup, Maryland, USA, pp. 181-192.