



行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

COSMIC整合研究計畫—(子計畫一)：

GPS折射資料與熱帶環流系統

Data Assimilation of GPS Refraction Measurements and Its Application to Tropical Circulation Systems

計畫編號：NSC 89-2111-M-034-008-

執行期限：89年8月1日至90年7月31日

主持人：張忍成 中國文化大學大氣科學系

一、摘要：

為能在未來順利將中華衛星三號計畫(COSMIC)中的GPS/MET折射角探空資訊植入中央氣象局(CWB)的全球資料同化系統中，我們首先引入Zou *et al.* (1999)按照美國國家環境預報中心(NCEP)全球模式架構(T62/L28)所發展之GPS ray-tracing觀測算子。以1995年10月11日12Z至12日凌晨共12小時間，MicroLab I所觀測而得的62筆探空為例：除在模式低對流層外，在比較實際觀測與應用原始GPS ray-tracing觀測算子於低水平解析之CWB全球模式(T21/L18)分析場所得的偏折角曲線後，可注意到另一存在對流層頂附近之明顯系統性差異，此為NCEP模式所不顯者。這應是原算子在計算格點高度及折射率場的基本假設與模式變數在垂直格點上之安排有所出入所導致。當模式大氣偏暖且具較高垂直解析時(如NCEP者)，此種降低模式對流層頂之系統性偏差效應或可忽略。當利用修正之GPS ray-tracing觀測算子，CWB模式分析相較於觀測偏折角之均方根偏差與NCEP所得者約略相當；然兩者在約5公里以下之低層大氣所顯現之均方根偏差，則甚至比實際觀測因緯度、地表特性、天氣系統等差異所造成的分散度特徵還大。若進而以高低緯乾濕系統區分，可發現模式分析場中低對流層在副高系統中輒呈過濕傾向(即模擬偏折角較觀測為大)。其確切原因為何？尚待進一步查證。

關鍵詞：中華衛星三號計畫，GPS/MET折射觀測，資料同化

Abstract：

The GPS ray-tracing observation operator developed by Zou *et al.* (1999) was modified and applied to the CWB's global analysis (T79/L18) with a reduced horizontal resolution (T21). The resulting simulated bending-angle profiles were then used to compare with the true GPS/MET data to provide an alternative assessment on the performance of CWB's global analysis system. As the first attempt, differences between the 62 GPS/MET soundings obtained by Micro-Lab I within 12-24 UTC of October 11, 1995, and the GPS ray-tracing results based on the analysis at 12Z of the same day were examined. It is noted that the overall root-mean-square differences (RMSD) between modeled and observed bending-angle profiles are comparable with those resulted from using the NCEP counterpart. However, both analyses did not seem to do a good job for model grids below 8 km where the RMSD are about the same as or even greater than the spreads of GPS observations (in terms of their standard deviation) due to different geographical locations and weather conditions. The CWB's analysis showed a noticeably positive bias in bending-angle profiles below 5 km, indicating the model atmosphere is probably a little too wet in general. As expected, further breakdowns suggested that worse results came from those low-latitude oceanic areas where there is virtually no conventional data.

Key words : COSMIC, GPS/MET refraction measurements, data assimilation.

二、緒言

GPS/MET掩星折射探空資料為中華衛星三號計畫(COSMIC)的主要觀測之一,其工作原理在利用載於繞地球低軌衛星(LEO)上之GPS接收器所接收GPS訊號的時間延遲現象,來監測無線電波訊號傳播在橫穿過地球大氣層所產生的折射情形,並可進一步利用模式反演推算出無線電波訊號所經路徑上之電子密度和溫度、壓力、及水汽含量等資料,是一種不受天候影響之主動大氣邊緣無線電波折射探測技術(如Melbourne *et al.*, 1994)。

根據COSMIC現有規劃架構,預計未來每天將可提供約3000個點之穿透大氣層之掩星折射事件資料,均勻分佈於全球,涵蓋傳統量測方法所不易取得的海面上資訊,對全球及區域性之數值天氣預報可說相當重要。尤其,挾其高垂直解析(200 m ~ 1 km)之優勢,且不受雲及降水影響之特質,極有潛力成為數值天氣預報系統絕佳的輔助分析資料來源。

然GPS/MET觀測的最大缺失則在:無法單獨反演出低層大氣溫度與水汽之垂直分布,限制了其在一般傳統資料同化系統(即如「最佳」內插客觀分析法)上之應用價值。因而欲最佳使用該觀測所隱含的珍貴大氣資訊,便非得仰賴目前最先進以變分原理建構而成的資料同化系統不可。

原則上,除可同化GPS/MET掩星折射事件點上反演而出的 T 和 q 外,尚可直接同化:(一)掩星觀測點上反演而得之折射率(N)場;或(二)更原始的偏折角 α 。二者均非模式分析變數,故必建構一所謂的觀測算子及其伴隨算子,方能順利被植入變分同化系統中。前者建構簡單直接,同化所需電腦資源尚稱廉價;而後者則相當繁複,電腦需求相對提高。但前者假設多,可靠性低,且資料影響範圍僅在局部區域,不若後者在無線電波訊號所經路徑上附近格點,皆可受到影響。考慮在COSMIC現有架構下,其掩星觀測點水平解析在數百公里以上,即使在全球模式分析之應用

都似乎要以同化(二)者為佳,遑論著重在中小尺度現象的區域數值模式分析了。

因此,本研究的第一步,首在引進Zou *et al.* (1999)為同化GPS/MET原始偏折角資料以NCEP模式架構(T62/L28)所發展出的二維GPS ray-tracing觀測算子,轉而將之建置在氣象局全球模式的架構上,作初步應用測試之結果討論。透過使用該觀測算子,與實際觀測資料比較,可約略窺知原模式分析場相對於GPS折射觀測的偏差情形,尤其是否存在系統性偏差?同時並可初步了解加入GPS折射觀測後,原分析場將可能改變之情形。

三、GPS ray-tracing觀測算子

(一)原理

根據光學幾何原理,只要模式大氣已知,並給定(一)GPS出射線之位置及方向,或(二)射線軌跡近地點位置,或(三)GPS與LEO的位置,均可藉以求得相對於觀測射線在模式大氣中之模擬軌跡,進而得出模擬偏折角剖線,此即為GPS/MET偏折角觀測算子的基本建構原理。其中,若假設局地球面對稱,則前二者為等價的ray-tracing問題;而末者為所謂ray-shooting問題。因其較前者複雜且耗費資源,故為減輕負擔,模式作業設計往往採行前者(如Zou *et al.*, 1999)。

由於大氣之垂直分層分布,當GPS發射出之無線電波訊號橫穿透大氣層時將產生偏折。而由GPS/MET接收器的位置和GPS定位信號的正確位置,可以量出定位信號在穿透大氣時的偏折角(α),其為「影響參數」(impact parameter, a),即訊號所經路徑近地點(perigee point)高度之函數。由於該偏折角的大小取決於行經路徑之折射率(refractivity)場分布,即:

$$N = (n-1) \times 10^6,$$

其中, n 為大氣折射指數(index of refraction)。而 N 為氣壓(p)、溫度(T)、水汽含量(q)等之函數,即:

$$N = 77.6 \frac{p}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{pq}{T^2(0.622 + 0.378q)}$$

。所以偏折角之度量,實際上就相當於是

對此三者之綜合度量。

(二) 原始設計

根據上述原理，Zou *et al.* (1999) 原始 GPS ray-tracing 觀測算子之建構可大致分成三大部分：1. 模式大氣格點折射率場之建置；2. ray-tracing 射線軌跡追蹤積分；3. 對應實際掩星折射事件點上之偏折角內插計算。欲利用該算子，原則上需提供模式三維格點所在位置之幾何高度、 p 、 T 、 q 。其中，後三者乃供計算模式大氣折射場及其梯度使用；格點位置與幾何高度乃供 ray-tracing 積分追蹤射線軌跡位置取得內插之折射場與梯度，並檢驗 ray-tracing 積分軌跡位置是否已穿入地面，以決定繼續積分與否。然實作上，則僅需提供模式地形、地表氣壓、 σ -座標，以及三維溫度、水汽。其中，三維格點氣壓乃由地表氣壓和 σ -座標求得，即：

$$\sigma = \frac{p - p_{top}}{p_{sfc} - p_{top}}。$$

(在 CWB 模式中， p_{top} 為 0.1 hPa，而 NCEP 者則為 0 hPa)。至於 σ -面上氣壓之所在高度，可透過結合靜力平衡近似與狀態方程並利用模式地形來逐步求得，即：

$$\frac{RT}{g} d \ln p = dz。$$

(三) 修正之考慮

由上可知，原始 GPS ray-tracing 觀測算子基本上乃假設輸入之三維模式溫度、水汽與由地表氣壓結合 σ -座標而得的氣壓是在相同的垂直格點上。然考慮一般模式在垂直架構採行交錯網格的事實，則上述之設計或為一不可輕忽的嚴重假設：因其對格點變數之認定，與模式垂直結構的安排並不一致，可造成下列影響：1. 低/高估對流層頂下/上溫度；2. 低估水汽；3. 低估格點幾何高度；4. 低估低對流層及對流層頂附近以上之折射場，但高估高對流層處之折射效應。這在模式具有較高垂直解析時（如 NCEP 為 L28），影響或不明顯；但若應用在較低垂直解析之模式中（如 CWB 為 L18），結果如何，實有待釐清。

因此，在不同模式架構下之建置，除遷就原始算子所需輸入變數的必要轉換

外，恐尚須考慮 GPS ray-tracing 觀測算子第（一）部份之原始設計，並作必要之修正，尤其在與模式垂直網格設計之一致性上。原則上，修正算子主要變動考慮有二：1. 採模式大多數變數定義所在之 σ -層為折射率場之計算格點；2. 採最低 σ -層之模式溫度，直接計算緊鄰地表之第二 σ -面的高度，再依線性內插方式，先行求得模式最底層垂直格點之應有高度（即非地表者），餘者再依原始設計循序求之。如此，將使原始設計之必要變動減至最少。

基於第一項考量，我們必須利用 Philip (1974) 的公式，即：

$$P_k = \frac{1}{(\kappa - 1)} \left(\frac{P_{k+1/2} P_{k+1/2} - P_{k-1/2} P_{k-1/2}}{P_{k+1/2} - P_{k-1/2}} \right)。$$

先由模式 σ -面上（下標 $k-1/2$ 者，為由地表起數者）之 p 推算出在 σ -層（下標 k 者）中之 p 值，以供計算折射率場。其中， P 表 Exner 函數，即：

$$P_k \equiv \left(\frac{p_k}{p_0} \right)^\kappa，及 P_{k-1/2} \equiv \left(\frac{p_{k-1/2}}{p_0} \right)^\kappa，$$

且 p_0 表 1000 hPa，而 $\kappa = R/C_p$ ，為氣體常數及定壓熱容量常數之比值。

在採行上述修正變動前，我們曾先將原算子中計算格點高度所用平均溫假設去除，意即依模式垂直交錯網格之安排來計算 σ -面之所在高度，但仍假設模式 σ -層的 T 、 q 即為緊鄰之下 σ -面所有。在此設置下，與原始設計之比較發現：在低層模擬偏折角間之差距，雖無原算子模擬與 GPS/MET 觀測間的差異來得大（約其 10 %），恐不容等閒視之！由於其與原始設計的差異，只在模式格點之所在高度之計算，因此，在 CWB 全球模式架構下，減低格點高度計算誤差，似有其必要性。

五、結果討論

(一) 原始算子

在未考慮原算子之可能缺失前，我們（張等，2000）曾比較 CWB 模式分析透過原始 GPS ray-tracing 觀測算子而得之模式大氣偏折角探空曲線與實際觀測結果之偏差情形。由均方根偏差（RMSD）分布，得知 CWB 相對於 NCEP 的結果（張，1999）

在中對流層 (~5 公里) 以上呈明顯較大差距, 尤以熱帶對流層頂附近為甚! 另一明顯不同處, 則在約 30 公里附近之模式層頂: 其偏差特徵呈上大小之型態, 非預期之指數向上遞減。當時, 我們直覺上以為此乃凸顯 CWB 分析場並未使用大量衛星資料及低模式垂直解析之必然結果 (前者), 以及模式頂層連接高層氣候場 (CIRA) 因內插問題所致。

在進一步比較下, 我們注意到除中低對流層 (5 公里以下) 之顯著系統性正偏差外, 對流層頂附近, 似乎亦呈現出一特殊之明顯系統性偏差: 即在其上, 模式模擬偏折角偏小; 反之, 其下則呈偏大情形 (張, 2001; 其圖 2)。上述情形, 尤以低緯區為甚 (其數值可超過觀測分散度之一半以上)! 換言之, 若非模式分析確有造成模式對流層頂偏低趨勢的問題, 則前節指出: 因原觀測算子與模式垂直架構潛藏的不一致所可能導致之缺失, 將脫不了關係。因為: 原始算子將模式原在 σ -層之溫度、水汽視為臨近下 σ -面所有之假設, 將把原應在較高處之資訊下移, 而對流層區低估之溫度, 則進一步拉低垂直格點之應有高度。由於格點高度為累進計算, 模式對流層頂高度透過原始 GPS ray-tracing 觀測算子後, 將最明顯被拉低, 如此, 極有可能出現如上之系統性偏差現象, 即: 低估對流層頂之偏折角, 而高估其下方之偏折角。

(二) 修正算子

為了解前述現象是模式分析本身的缺失所造成? 抑或是觀測算子與模式垂直架構假設不一致所造成? 我們乃修改原觀測算子之設計, 並作進一步測試 (張, 2001)。實驗結果透露: 原 CWB 模式分析相對於 GPS/MET 資料在對流層頂上下反映出之顯著系統性偏差, 應主要來自觀測算子原始設計與模式垂直架構間之不一致所造成! 由修正前後系統性垂直偏差分布 (見張, 2001; 其圖 2), 可知原在 5-20 公里處之明顯偏差, 均已明顯去除。至於 5 公里以下之系統性正偏差, 則絲毫未見改善, 僅見其稍向上位移。雖然如此, 這多少印

證前一節中原算子可能低估低對流層偏折角之推論。同時, 此種偏差顯然應屬模式原分析之缺失、或為 GPS/MET 資料本身之偏差特徵居多。但無論如何, 這應意味著 GPS 折射資料之有無, 在現況下, 對氣象局全球分析場可以有相當程度之影響。但, 是否原始觀測算子中尚有其他系統性缺失? 如 Liu *et al.* (2000) 所指出的影響參數誤差修正, 值得進一步之探討。

由 RMSD 垂直分布指出: 修正算子較原始者相對於觀測自 6 公里以上開始出現明顯改善, 尤以 15 至 25 公里處之改善最為顯著! 細思之, 除熱帶地區外, 10 公里以上之 CWB 模式 σ -層應所剩無多, 故大致為垂直內插後之比較, 可見模式架構的正確資訊提供, 實為必需。另一方面, 除邊界層外, 5 公里以下之 RMSD 顯示原始算子比修正算子稍佳, 但統計上可能不顯著: 這除反映模式格點高度升高的結果外, 由於原算子一般將低估分析水汽, 而低層折射率之計算對水汽變化則相當敏感 (如 Ware *et al.*, 1996), 是以該現象同樣暗示著模式低層或存在水汽過濕的系統性偏差! 再者, 雖然修正後之觀測算子已將 5 至 25 公里處之系統性偏差大幅去除, 而熱帶對流層頂附近, 依然存有微幅之上負下正型態的系統性偏差。顯然 CWB 模式在熱帶區域之分析, 確有其極限! 至於 20 至 40 所凸顯之正偏差, 概指出模式高層分析溫度有偏冷的傾向。總體而言, 模式在對流層頂之分析相對於 GPS/MET 觀測有較明顯之差異, 可能與模式的相對低垂直解析有關。

為進一步了解氣象局模式分析場相對於 GPS/MET 觀測在不同特性下之表現, 我們特以海陸、緯度、乾濕系統等差異作細部比較。原則上, 應用修正觀測算子與原始算子之結果 (張等, 2000), 除前所提及之差異外, 在中低對流層並無明顯不同, 即: 1. 陸上分析較海上好, 且除了 2—3 公里處外, 低層系統性正偏差大都來自洋面上之分析 (張, 2001; 其圖 4); 2. 北半球分析較南半球佳; 3. 除各自對應的對流層頂處外, 三十公里以下之分析以高緯區

(大於 60°) 較好, 中緯 ($30-60^\circ$) 次之, 低緯 ($30S-30N$) 最差; 4. 考慮不同天氣系統 (由 SLP、850/500 hPa 高度場等綜合主觀判斷), 在中、低對流層以下, 副高區之分析表現明顯劣於鋒面區。5. 以 OLR 作乾濕系統區分, 亦發現自 5 公里以下, 乾區之分析表現較濕區及整體為差。

基於模式分析結果可能與 OLR 觀測之區分相左, 使模式分析缺失特性不見得能完成被反映出, 即: 可能只見大的 RMSD, 但系統性偏差則被模糊化。故針對上述 4. 和 5. 兩點, 我們另加上模式分析相符於 OLR 區分之限制條件, 作進一步的結果確認。例如, 由模式 500 hPa 分析與 OLR 相符者來檢視模式分析之表現: 在 1995 年 10 月 11 日 12Z 至 24Z 之 62 筆 GPS/MET 探空資料中, 屬乾系統者共有 16 筆, 而濕系統則僅有 6 筆。後者之結果顯然不具統計意義。原則上, 在乾系統下 (如副高及脊前槽後), 模式低層 (7 公里以下) 分析硬是比含括所有資料之結果呈更偏大 (濕) 之情況! 故氣象局全球模式在廣大洋面上乾副高下沈區之分析相去 GPS/MET 觀測較大, 呈偏濕傾向之結論, 應毋庸置疑。

六、結語

資料同化或客觀分析中的統計估算原理基本上假設各個估算子相對於真實值均無系統性偏差, 是以, 我們討論應用 Zou *et al.* (1999) 原始 GPS ray-tracing 觀測算子至 CWB 模式架構上, 可能產生的人為系統性偏差問題, 並進行適當修正, 以去除之。

然模式中、低對流層呈現之折射角偏大 (相當於水汽含量偏高) 傾向, 尤其在海洋副高區者, 真假如何? 目前尚難論斷。唯一確定的是: 這是不同模式分析所共同存在之現象 (EC 分析在 CWB 的模式架構下亦然)! 其偏差程度大小, 因模式而異。Liu *et al.* (2000) 曾有修正原算子所產生的影響參數之舉, 且似乎有效地解決了此一問題。然根據原算子中 ray-tracing 積分程序初始位置給定之假設 (即由近地點射線方向反推而得), 似乎又與其修正之論斷存在矛盾; 再者, 以 CWB 模式分析為例, 此等正系統性偏差者幾乎都來自洋面, 故

極有可能是原分析因缺乏傳統觀測訂正使然。因此, 真假若何? 尚須進一步的確認。

七、參考文獻

- 張忍成, 1999: NCEP 客觀分析場與 GPS/MET 探空觀測之初步比較。 中華衛星三號 COSMIC 研討會論文彙編, 49-51。
- 張忍成、曾建翰、劉慧琳, 2000: GPS Ray-tracing 觀測算子在氣象局全球分析場的初步應用。 八十九年度 COSMIC 學術研討會論文彙編, 中壢, 台灣。
- 張忍成, 2001: 模式導出偏折角剖線與 GPS/MET 觀測之比較。 第七屆全國大氣科學學術研討會論文彙編, 277-281。
- Liu, H., X. Zou, R. A. Anthes, J. C. Chang, J.-H. Tseng, and B. Wang, 2001: The Impact of 837 GPS/MET bending angle profiles on assimilation and forecasts for the period June 20-30, 1995, *J. Geoph. Res., Atmospheres*, (accepted)
- Melbourne, W. G., E. S. Davis, C. B. Duncan, G. A. Hajj, K. R. Hardy, E. R. Kursinski, T. K. Meehan, L. E. Young, and T. P. Yumck, 1994: *The application of spaceborne GPS to atmospheric limb sounding and global change monitoring*. JPL Publication 94-18, 147pp.
- Philips, N. A., 1974: Nati. Meteor. Cent. Off.: Note 104. Natl. Weather Services, Washington, D. C.
- Ware, R., et al., 1996: GPS sounding of the atmosphere from low earth orbit: Preliminary results. *Bull., Am. Meteorol. Soc.*, 77, 19-40.
- Zou., X, F. Vandenberghe, B. Wang, M. E. Gorbunov, Y.-H. Kuo, S. Sokolovskiy, J.-C. Chang, J. G. Sela, and R. Anthes, 1999: A ray-tracing operator and its adjoint for the use of GPS/MET refraction angle measurements. *J.G.R.*, 104, 22301-22318.