

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折射資料之同化與應用

Data Assimilation of GPS Refraction Measurements and Its Applications

計畫編號：NSC 90-2111-M-034-005-

執行期限：90年8月1日至91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：

本計畫為去年研究之延續，主要目的在修改Zou *et al.* (1999) 的GPS ray-tracing 觀測及伴隨算子，使符合中央氣象局 (CWB) 全球模式之架構，以從事植入GPS/MET折射角資料之影響研究，同時深入了解該資料及觀測算子的特性，以利未來能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CWB之全球資料同化系統中。

首先，我們在今年度完成伴隨算子之修正暨測試，並進行植入單一GPS/MET折射角探空資料之實驗。同時，更針對去年研究結果所衍生的問題，作進一步的分析探討。

以1995年10月11日12Z至12日凌晨共12小時，MicroLab I所觀測得的62筆探空為例，去年的主要發現之一在：模式中低對流層分析，透過修正後的GPS ray-tracing 觀測算子，依然出現系統性偏大的現象！

以同一時段或其他較長時段（如1995年6月20-30日）之資料分析，或使用特定天氣系統為例，均指出模式低層分析相對於GPS/MET觀測，確實存在顯著偏濕的傾向。另一方面，由給定不同的GPS/MET探空估計位置實驗亦證明：上述系統性偏差現象也可由GPS ray-tracing 觀測算子之原始設計與原始觀測資料處理流程不一致所造成（如：Liu *et al.* , 2001）！

關鍵詞：中華衛星三號計畫，GPS/MET折射觀測，資料同化

Abstract：

The main purpose of this continuing report from last year is to modify the GPS ray-tracing observation operator developed by Zou *et al.* (1999) (originally based on Gorbunov *et al.*, 1996) to be applied to the CWB's global analysis (T79/L18) with a reduced horizontal resolution (T21). Both the characteristics of the GPS/MET refraction data and the 2-D ray-tracing operator were further explored.

In order to assimilate the GPS/MET refraction measurements from the COSMIC project using the revised ray-tracing forward operator, its associated adjoint operator should be also revised accordingly. That is a top priority task in this year, but which is by no means an easy one. It has been done, and the follow-up experiment is currently under-going. Other efforts have been put on exploring the remaining issues from previous findings, especially the large bias between model-generated and observed bending angle profiles in the lower troposphere (below 5 km).

By using the 62 GPS/MET soundings obtained by Micro-Lab I within 12-24 UTC of October 11, 1995, those obtained in 20-30 June, 1995, or the 29 soundings believed to be associated with the upper-level cold-core low system, respectively, the comparisons with the retrieved GPS/MET water vapor profiles from the help of ECMWF Basic analyses all suggest that model analyses are indeed wetter than GPS/MET-derived in the lower atmosphere (below 700 hPa).

On the other hand, the difference in soundings' location used in the original GPS/MET data processing and the 2-D GPS

ray-tracing operator for calculating the local center of the Earth may also contribute partially to the large systematic bias between model analyses and observations.

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

二、緒言

在上年度的研究中(張, 2001a、b), 我們主將Zou et al.(1999)的GPS ray-tracing 觀測算子及其伴隨算子系統建置到中央氣象局全球模式架構上, 使該模式系統具備直接同化華衛三號GPS/MET折射觀測導出偏折角(bending angle)探空資料之能力。過程中, 我們發現一因原始觀測算子在計算垂直格點高度及折射率場設計上與CWB模式架構不一致所導致在對流層頂處的系統性偏差, 並予作適度修正以去除之。是以今年的部分工作在延續其伴隨算子之修正及測試。

另由比較GPS/MET偏折角資料與模式分析透過修正二維GPS ray-tracing 觀測算子所得之結果, 來窺探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? 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, 依舊存在, 且稍有向上提昇之趨勢, 概因格點位置上提之故。

此一現象在以1995年10月11日12Z至翌日00Z共62筆GPS/MET探空與1995年10月11日12Z氣象局全球模式分析透過GPS ray-tracing 觀測算子所得偏折角之比較差異, 相當明顯, 尤其在海洋副高區。然而, 這並非只是CWB模式分析所獨有之現象。事實上, 不同模式分析在透過此GPS ray-tracing 觀測算子之應用後, 均或多或少呈現出類似的偏差特性(Zou et al., 1999; Chang et al., 2000: 其中, EC分析之比較乃建構在CWB模式架構下所得者)。此一模式中、低對流層呈現之折射角偏大傾向, 尤其在海洋副高區者, 真假如何? 目前尚難論斷。

由於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, 任何因觀測不同而實質在的系統誤差, 或因觀測算子設計不當所產生的人為系統性偏差, 都是非常重要之議題, 必須提出適當的修正, 以去除之。

基於此乃不同模式分析所共有之現象, 因而極可能仍是原始觀測算子設計所衍生出的問題, 如:Liu et al.(2001)即指出模式導出 impact parameter 與實際觀測所得者間在高層偏形可忽略處即存在不一致的地方。其推論雖然合理, 然如此直接作垂直平移修正, 似乎有效地解決了此一問題。但似乎亦稍嫌暴力, 而缺乏直接的證據來支持。

另一方面, 若模式中低層分析確實偏濕, 或者存在冷偏差, 也有可能造成此模式導出偏折角偏大的結果。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。

本文的主要目的之一在嘗試提出證據來證明: 模式導出偏折角呈正偏差之情形, 應至少部分是來自模式低層分析偏濕所致。另一目的則在進一步探索GPS ray-tracing 觀測算子原始設計的其他可能潛在問題。

三、GPS/MET折射觀測水汽反演

(一) 原理

在「局地」球對稱假設下, 可由Abel inversion 自觀測導出偏折角反演得出對應之折射率(N_{gps}), 即:

$$\ln n(r_0) = \frac{1}{\pi a_0} \int_{a_0}^{\infty} \frac{\alpha(a)}{(a_0^2 - a^2)^{1/2}} da, \quad (1)$$

其中 α 為偏折角, a 為 impact parameter, n 為大氣折射指數(index of refraction, 設僅為地球半徑(r)之函數), 而, r_0 為 a_0 在上述假設下之近似。至於大氣折射指數與折射率(N)之關係為: $N = (n-1) \times 10^6$ 。而基本上折射率乃溫度(T)、氣壓(p)及水汽(e)之函數, 即:

$$N = 77.6 \frac{p}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2}. \quad (2)$$

因此，若 N 、 T 、 p 已知，則「掩星」點上之水汽壓可由上式反演而得。

事實上，Ware et al. (1996) 建議可由 GPS/MET 觀測反演而得之 N (權標為 N_{gps}) 利用模式分析溫度來求得相對較直接測量為準確之水汽含量。假設溫度誤差在 $2C$ 以內，則由上式推估之水汽誤差將不超過 0.5 mb 。當然，這並未考慮 N_{gps} 本身的反演誤差。若水平梯度平緩，則此誤差效應或可降至最小。

(二) 模式標準氣壓層 GPS/MET 掩星事件點上導出水汽之計算

由(2)：

$$e = \frac{T^2 N - 77.6 p T}{3.73 \times 10^5}, \quad (3)$$

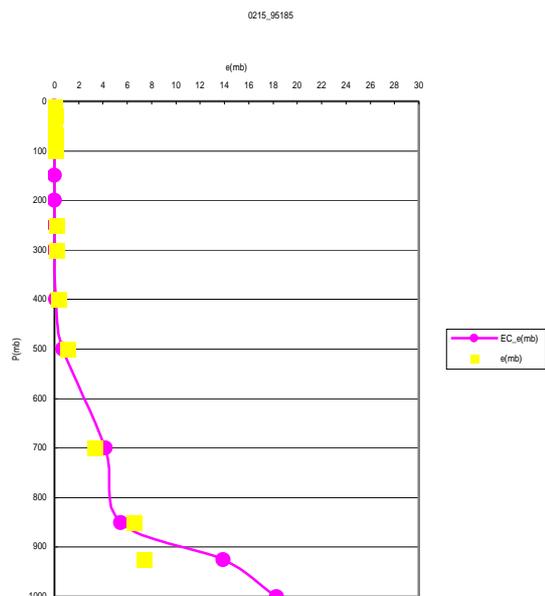
故欲計算 e ，須提供 N 、 T 、 p 。由於是計算標準層者，因而 p 已給定， T 則由模式標準層分析格點溫度水平內插至 GPS/MET 掩星事件點取得，至於 N 則由 GPS/MET 的高垂直解析觀測內插至標準氣壓層而得。

原則上，可由 p 場或高度場進行垂直內插以取得 N_{gps} 。首先，在原始 GPS/MET 資料中，同時提供對應觀測高度之 p 值。因此，只要 GPS/MET 探空之觀測底高 (floor) 可低於任一給定標準層，則該層在掩星位置上之 N 可由取 $\ln p$ 與 $\ln N$ 做線性內插求得。但由於 p 之導出是由忽略水汽效應，再加上狀態方程及靜力平衡所得，故該 p 值實為相對應於乾溫度者，對存在豐沛水汽之低對流層恐不適用。另一方面，基於模式標準層分析同時附有重力位高度場 (Z_{gp})，其在低對流層與實際高度幾無差異，故在此我們採直接利用觀測高度及 $\ln N$ 線性內插至標準層所在之重力位高度來求得標準層上之 N_{gps} 。

為快速取得結果，我們以最近格點之 T 與 Z_{gp} 代替。(惟如此一來，空間差距所造成的可能影響必須同時考慮。) 另外，模式分析時間與 GPS/MET 實際觀測時間是有所差距的，因而在相互比較時，尚須注意到時間差距所可能導致的變異情形。原則上，若 GPS/MET 觀測時間發生在前一日 18 UTC 以後及當日 06 UTC 以前，則相

對應之模式分析時間為當日 00 UTC 者；若觀測時間為同日 06 UTC 至 18 UTC，則使用當日 12 UTC 之分析，以資比對。

圖一所示者，為依據上述考慮之垂直水汽分布比較個例。其中，GPS/MET 探空為 1995 年 7 月 4 日 0752 UTC 所發生者，該日探空編號 215，觀測位置約在 $27.7^\circ N$ ， $141.3^\circ W$ ，即副熱帶東太平洋上，故用以比對者為在 7 月 4 日 12 UTC 之分析，而最近格點位置為 $27.5^\circ N$ ， $142.5^\circ W$ 。圖中實線帶點者為 EC 之原格點分析結果，而方形灰點者則為 GPS/MET 之導出水汽量。此例顯示：700 hPa 以下，GPS/MET 觀測似乎大致要比模式分析來得乾燥，尤其以 925 hPa 者為甚；至於 500 hPa (含) 以上之中、高對流層，則相反地呈偏濕傾向，但可靠性相對不高。



圖一：1995 年 7 月 4 日 0752 UTC，編號 215 之 GPS/MET 探空的導出水汽量 (黃方形者)，觀測位置約在 $27.7^\circ N$ ， $141.3^\circ W$ ，與 7 月 4 日 12 UTC 格點位置為 $27.5^\circ N$ ， $142.5^\circ W$ 之 EC 分析水汽 (紫圓點者)。

四、反演水汽與模式分析比較結果

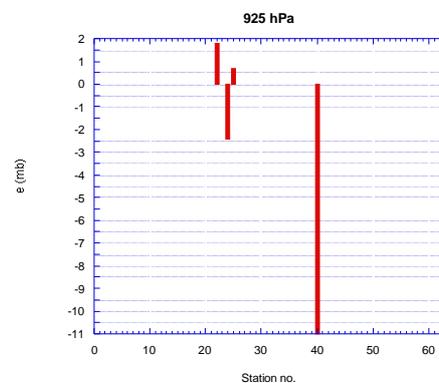
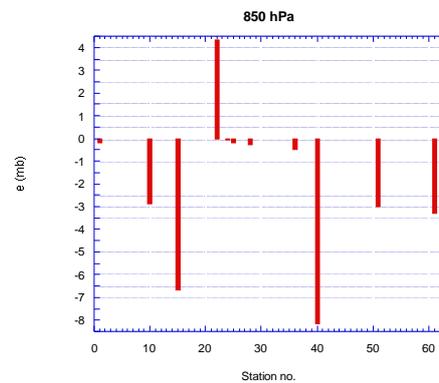
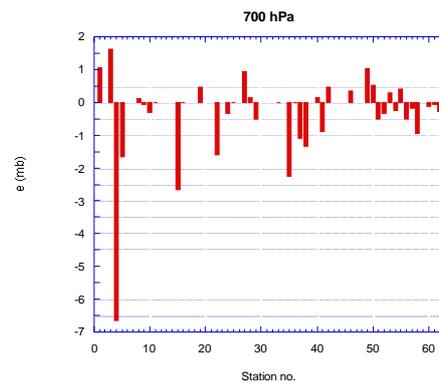
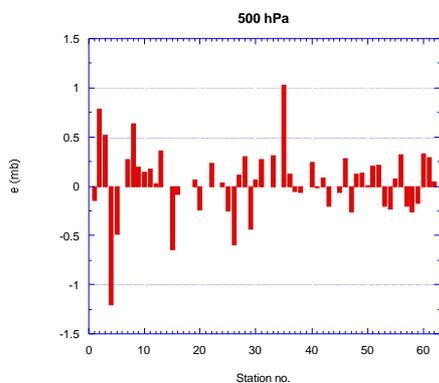
吾人分別就特定時間之分析 (即 1995 年 10 月 11 日 12Z 和 1995 年 10 月 12 日 00Z 之 ECMWF TOGA/Basic 模式格點資料，以及 1995 年 6 月 20-30 日者)，和針對特殊天氣系統之模式分析，做個案比較。

(一) 1995 年 10 月 11 日個案：

我們首先由 95 年 10 月 11 日 12-24 UTC 共 62 筆 GPS/MET 探空作分析比較。其中，最低觀測高度達 500 hPa 者共有 52 筆，700 hPa 者有 39 筆，850 hPa 者則劇降至 11 筆，而可達至 925 hPa 者僅剩四筆。

圖二中，分別示出 GPS/MET 導出水汽壓相對於模式分析在上述四標準層之差異結果。首先，在 700 hPa (含) 以下，存在顯著差異 (即 $|\Delta e| \geq 0.5 mb$) 之探空個數上，偏乾相對於偏濕者之比分別為 12 : 5 (700 hPa)，6 : 1 (850 hPa)，即及 2 : 2 (925 hPa) 而尤有甚者，偏乾者的差異數值更往往遠超過出現偏濕的情形。因此，綜合而言，模式低對流層分析似乎存在較 GPS/MET 觀測呈系統性偏濕之傾向，這與模式分析透過二維 GPS ray-tracing 觀測算子導出偏折角在這段期間出現系統性偏大情形是相一致的。

另一方面，500 hPa 上出現顯著偏差情形者，已不多見 (約佔 15%)，其中乾濕比例約為 5 : 4。這顯然與水汽量到此高度者已然無多有關。但無論如何，整體窺之，則有 GPS/MET 觀測相較模式分析呈現微幅偏濕的傾向。這與低層所發現的情形相左，惟顯著性恐怕不高。有趣的是：在具顯著差異的這前 9 個 GPS/MET 探空中，同時可達 700 hPa 者共有 5 筆，除編號第 35 號探空上下出現反相差異的情形外，餘者則皆為同相偏差，其中，以 GPS/MET 觀測較模式分析皆偏乾者居多。



圖二：95 年 10 月 11 日 12-24 UTC GPS/MET 導出水汽壓相對於模式分析在四標準層之差異結果：(a) 500 hPa，(b) 700 hPa，(c) 850 hPa，(d) 925 hPa。

此外，由 GPS/MET 探空觀測位置分布來看：洋面上探空之低層與模式分析相較出現顯著偏差者往往以偏乾者居多，尤其在 850 hPa 上 (圖略) 皆為偏乾之情形；相反地，陸上探空當出現顯著差異時，則以偏濕為主，惟 700 hPa 上者除外。

(二) 1995 年夏季高層冷渦個案

為釐清上述模式低層分析系統性偏濕暨偏折角偏大現象，是僅為個案？或為

一般通例？或與特殊天氣系統有無關係？我們首先進一步以座落近高層冷心低壓系統之探空來加以比對。

選取該系統之目的，原希望能由 GPS/MET 觀測對之可有更深入的了解。惜 1995 年中可確定與高層冷渦有關之 GPS/MET 探空總共只有 29 筆，幾乎都在北太平洋副熱帶區域，分布時間由 6 月至 11 月止，主要集中在 7 與 10 月。其中，可達前述四標準層者，分別有：23 (500 hPa)，16 (700 hPa)，5 (850 hPa)，2 (925 hPa)。

結果顯示：模式分析在 850 hPa 以下偏濕依舊且情況顯著；而 500 hPa 上，則有顯著偏濕之探空數稍多於偏乾之情形，且整體而言，雖或不顯著，但呈模式分析偏乾之傾向，與前述發現類似。唯一主要有所不同處為：在 700 hPa 上呈現明顯差異之 GPS/MET 探空數乾濕比例相若，甚至有觀測偏濕之勢（圖略）。

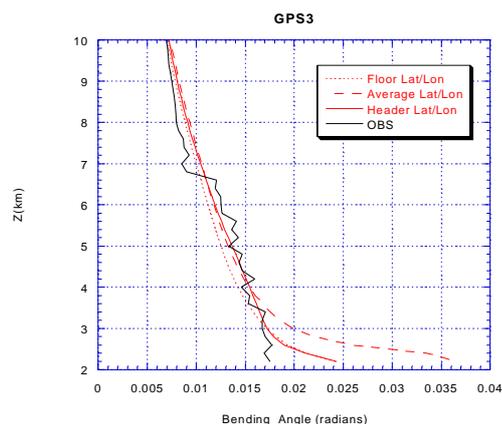
（三）1995 年 6 月 20-30 日：

分析結果與前二者相似，即：氣壓 850 hPa 以下的低層大氣水汽估算少於 EC 模式資料所顯示之水汽量，故在此不予多作討論。

五、GPS ray-tracing 觀測算子特性再探

基於 Liu *et al.* (2001) 曾有修正原 GPS ray-tracing 觀測算子在各 GPS/MET 探空所產生的 impact parameter 至觀測對應者之舉，來部份解決模式中低對流層折射角之系統性偏差問題，我們似有必要對此問題加以探討。

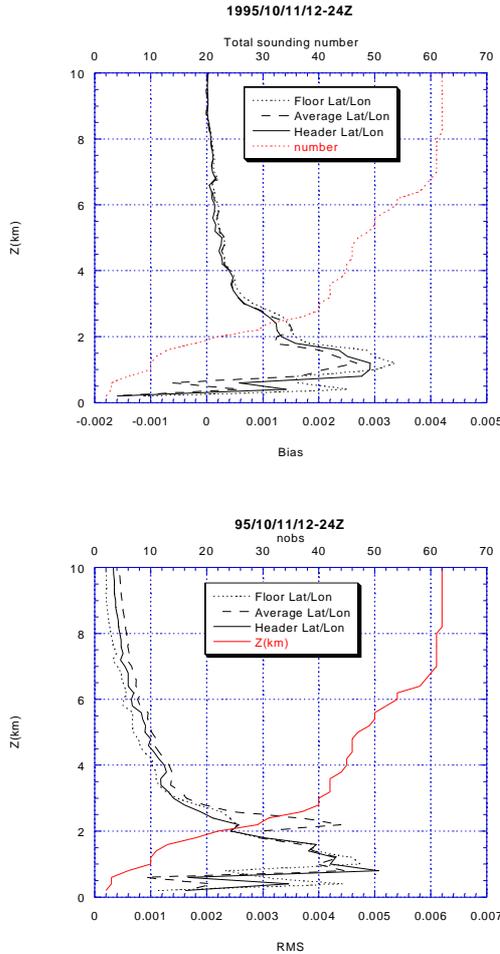
在以較長期資料比較 CWB 模式分析透過修正之 GPS ray-tracing 觀測算子(張，2001a、b) 所導出折射角的差異特性時，我們無意間發現：就同一探空而言，若使用不同的估算經緯位置（即如：以最低觀測點者、或整層觀測點平均者、或只最高與最低之平均），所得出的模擬折射角探空曲線，皆有所不同（見圖三），而且越近地面，分歧越大，狀似一共同曲線被上下按比率垂直平移。



圖三：GPS3 觀測折射角探空廓線及模式透過修正 GPS ray-tracing 觀測算子所模擬者。

回視 GPS ray-tracing 觀測算子之原始設計，探空所在位置的資訊乃用以計算局地球心，而各無線電波射線所相應的 impact parameter 則又是依此所導出者。因此，若給定探空位置有所偏差，將造成模式導出 impact parameter 的差異，進而影響模式內插至對應觀測高度之折射角垂直分布。假設觀測算子與原始資料處理時所認定之探空位置並不一致，由圖三的例子顯示，低層模式模擬折射角的系統性偏差是極有可能因此而產生的！

在此我們再以 1995 年 10 月 11 日 12~24Z 的 62 個 GPS Limb Sounding 為例，使用中央氣象局在 1995 年 10 月 11 日 12Z 的全球分析場，分別以 GPS/MET 折射資料觀測最低點（floor）的經緯度、觀測的垂直平均經緯度、觀測最高與最低點二者間的平均經緯度（由原始 POCC 資料檔頭所取出的資訊）等三種經緯度型式，做模式大氣折射角模擬。結果發現：無論是 bias 或均方根差異，在高度 10 公里以下，模式與實際大氣差異開始明顯，且愈往低層差異愈大。其中就 bias 而言，在高度 2 公里以下，以垂直平均經緯度之模擬結果最接近實際大氣者，並且在高度 1 公里以下偏回實際大氣，而高度 2 公里以上則是以最低點的經緯度以及觀測最高與最低點平均經緯度的模擬結果較好。但就均方根差異而言，則 4 km 以上以最低點經緯度者為佳；以下則以高低點平均者較好（圖四）。



圖四：1995年10月11日12Z相較於觀測的 (a) bias ;(b) 均方根差異。

六、GPS ray-tracing觀測伴隨算子之修正

(一) 修正原理

Zou *et al.* (1999) 根據 Gorbunov *et al.* (1996) 的原始 GPS ray-tracing 觀測算子結構大致分成三部分：1. 模式大氣格點折射率場之計算；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。使用該算子需提供模式三維格點所在位置之幾何高度、 p 、 T 、 q 。實際上，則僅需提供模式地形、地表氣壓、 ϕ -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 ϕ -座標求得，即：

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

(CWB 模式之 p_{top} 為 0.1 hPa) 至於 ϕ -面氣壓之高度，則由壓高公式逐步求得，即：

$$\frac{RT}{g} d \ln p = dz。$$

由上可知，原始 GPS ray-tracing 觀測算子假設模式溫度、水汽與由地表氣壓結合 ϕ -座標而得的氣壓是在相同垂直格點上，此與模式垂直交錯結構的安排並不一致，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。

因此，在去年我們針對GPS ray-tracing 觀測算子第一部份之原始設計，作必要之修正，使與模式垂直網格設計一致，以去除上述影響在模式對流層頂附近所造成的系統性偏差。主要變動有：1. 採模式變數定義所在之 ϕ -層為折射率場之計算格點；2. 採最低 ϕ -層之模式溫度，直接計算緊鄰地表之第二 ϕ -面高度，再依簡單線性內插求得模式最底層垂直格點之應有高度（非地表者），餘者再依原設計循序求之。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 ϕ -面上（下標 $k-1/2$ 者，為由地表起數者）之 p 推算出在 ϕ -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：

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

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。

(二) 測試結果

由於觀測算子已作如前之修正，為順利植入折射角觀測資料以作同化，必須同時修改其切向線性算子及伴隨算子，故今年大半的時間均花在修正伴隨算子的除錯上頭。總算心血沒有白花，同化所需之線性一致測試（即泰勒展開測試，見表一），以及伴隨與切向線性算子間內積恆等之測試均已分通過（以雙精度計算，相等

有效位數達 13 位；結果略)。目前正著手進植入單點 GPS/MET 折射角探空資料的同化實驗，其詳細結果將在下年度報告討論。

表一：

α	Taylor test
1.0000000000	0.9718034076260725
0.1000000000	0.9548902249714029
0.0100000000	0.9995307605685014
0.0010000000	0.9999729945270383
0.0001000000	0.9999972392473870
0.0000100000	1.0000000465856416

七、結語

我們在本研究中針對模式中、低對流層呈現之折射角系統性偏大傾向續作進一步的探討。

首先，吾人根據 Ware *et al.* (1996) 的建議，在忽略 GPS/MET 觀測導出折射率場之可能誤差情況下，由相對可靠的模式分析溫度與氣壓，求得較為準確之水汽含量。(即若 $\Delta T \leq 2C$ ，則 $\Delta e \leq 0.5 \text{ mb}$ 。) 以 1995 年 10/11/12Z - 24Z 時段中可達 700 hPa 共 39 個 GPS/MET 探空為例，我們注意到如此得出的 GPS/MET 反演水汽與模式原始分析比較，以偏乾者居多，且差異度遠較偏濕者為大。達 850 hPa (甚至 925 hPa) 者更形如此，唯樣本數減少。

若以特定之熱帶海洋高層冷渦系統為例，如 1995 年中可確定者共有 29 筆 GPS/MET 探空(幾均在北半球)，達 700 hPa 者僅有 16 筆(以下者更少)，整體而言，700 hPa (含) 以下之模式分析仍呈偏濕傾向，500 hPa 以上則呈偏乾，與上述結果相仿。

換言之，本研究分析指出：模式低層分析相對於 GPS/MET 觀測，確實存在顯著偏濕之傾向。故上述中、低對流層系統性偏差現象，應部分來自這個貢獻。

另一方面，由使用不同 GPS/MET 探空估計位置的實驗顯示：該系統性偏差確也可由觀測算子之探空位置認定設計與原始觀測資料處理流程間的不一致性所造成！顯然，處理過程中對探空所在經緯位置之認定不同，將可造成對局地球心之估計差異，進而影響折射角資料所對應之 impact

parameter (相當於高度) 隨之位移。這與 Liu *et al.* (2001) 在原始觀測算子中加入 impact parameter 修正的精神是相符的，可說是一項重大發現。

八、參考文獻

- 張忍成，2001a：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。
- 張忍成，2001b：GPS 折射資料同化與熱帶環流系統 國科會專題研究計畫報告 (NSC89-2111-M-034-008-)，5 頁。
- Chang, J.-C. J., C.-H. J. Tseng, H.-L. Liu, X. Zou, and M.-D. Cheng, 2000: Comparison of CWB's global analysis using a GPS ray-tracing operator with GPS/MET observation. *COSMIC International Workshop*, Sept. 27-29, Wanli, Taipei, Taiwan.
- Liu, H., X. Zou, H. Shao, 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.*, **106D**, 31771-31786.
- 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.