

中央氣象局衛星資料反演大氣垂直剖面 系統之理論基礎

顏泰崇¹ 黃鴻榮² 王光華¹ 張拱祿¹

¹ 中央氣象局氣象衛星中心

² 美國威斯康辛大學太空科學工程中心(SSEC/UW)

摘 要

中央氣象局氣象衛星中心透過與美國國威斯康辛大學的合作，引進國際TOVS處理套裝軟體ITPP (International TOVS Processing Package)，其中兩個版本ITPP-4及ITPP-5已經順利的在氣象衛星中心的電腦系統上測試中。本文探討這個軟體系統在衛星資料反演中所使用之理論，以作為氣象衛星中心在發展資料應用上技術生根及進一步改良的基礎。主要內容包括衛星資料處理上所需要的各項參數求取、反演理論、輻射模式及數值求解方法的剖析。

一、前言

中央氣象局氣象衛星中心目前全天候接收處理日本的地球同步氣象衛星GMS及美國繞極軌道氣象衛星NOAA系列的資料。其中較被廣泛使用的是日本的地球同步氣象衛星GMS的影像資料，它可以每小時密集觀測亞太地區大範圍的雲系移動、發展與消散、鋒面的生命史、颱風的動態以及各種中小尺度天氣系統(如雷雨胞)的生長、消散等，在天氣預報與惡劣天氣守視上提供了一項不可缺少的重要資料。至於美國繞極軌道氣象衛星，每日每顆衛星可以提供兩次台灣附近東西向三千多公里範圍的影像及多頻道探空數據資料(圖一)，目前在國內並未被充分的使用。其中用來觀測影像的精密極高解像輻射儀AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)包括五個高水平解像力的影像頻道資料，是用來求取海面溫度及雲量的最佳儀器，而由20個頻道的高解像紅外線探空儀HIRS/2 (High-

Resolution Infrared Radiation Sounder)、4個頻道的微波探測器MSU (Microwave Sounding Units)及3個頻道的平流層探測器SSU (Stratospheric Sounding Units)所組成的泰洛斯作業垂直探測器TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder)則是用來反演大氣溫度、濕度垂直剖面的資料(表一)。

Smith & Woolf (1976)提出以迴歸法處理衛星資料反演大氣垂直剖面的理論基礎，美國威斯康辛大學(Smith等, 1983)依據此方法發展出國際TOVS處理套裝軟體ITPP (International TOVS Processing Package)，其後Smith等(1985)又以同時物理反演法改進成第二版的ITPP軟體，成為國際間最通用的處理TOVS資料的軟體。在過十年中，國內已有多人以ITPP套裝軟體從事這方面的研究，Yen & Wang (1986)首先嘗試處理TOVS資料；柳等(1988)以TAMEX第一階段實驗計畫期間之個案反演，顯示近地面的誤差極待改進；劉(1990)也研究引進ITPP軟體以應用於東亞地區；劉等(1991)嘗試

以地面及對流層頂觀測資料來改善反演結果；劉與陳(1992)的研究顯示初始猜測值對結果的影響很大；劉與陳(1993)的研究則嘗試以AVHRR 資料估算HIRS/2視場內的雲量，以改進反演結果。

中央氣象局氣象衛星中心為反演大氣溫度、濕度垂直剖面，引進ITPP軟體，已經順利的建置在氣象衛星中心的電腦系統上測試中。本文的目的在於詳細解說如何利用反演理論、輻射模式及數值方法來處理HIRS/2觀測資料，進而得到大氣溫、濕度垂直剖面的訊息，第二節討論衛星輻射反演的基本理論及方法，第三節概述反演步驟及細節，第四節則綜合全文及淺談未來發展。

二、衛星輻射及反演理論

利用衛星觀測資料求取大氣溫度及水汽的垂直分布在遙測數學方法上是一個相當困難的問題，因為觀測到的輻射能量與大氣的溫度及水汽分布以及地表溫度、大氣中的輻射吸收氣體、太陽光線的反射、雲的吸收、散射等因素呈現非線性的關係，用一般簡單的數值方法求解常常得到非常不穩定的不唯一解。因而在反演的過程中，各項步驟的計算及客觀與非客觀性控制的使用都需要非常注意。同時反演中的初始值，通常會決定了反演結果的好壞，如何求得初始值將是一個很重要的關鍵。

輻射傳遞方程可以簡略的寫成：

$$R_o = B_{s,v} \tau_{s,v} - \int_0^{P_s} B_s d\tau \quad (1)$$

因紅外線頻道的反射率通常很小，在此忽略不計。在(1)式裏， v 代表頻道， s 代表地面， R 為衛星觀測到之輻射量， B 為普朗克函數， τ 為總透射率， P_s 代表地面氣壓。(1)式的物理意義為：大氣層頂(衛星高度)所測量到的輻射能量 R_o 是地面溫度放射出的能量經大氣層的吸收衰減後，加上大氣中各層的放射及吸收後的能量總合。此種關係使得輻射能量與大氣溫度剖面，地表溫度呈現非線性比例，造成衛星反演問題需要使用非線性解法。

假設(1)式可以合理的對某一初始值作一階線性化微分，則(1)式可變為：

$$\delta R_o = R_o - R_o^0 = \delta B_s \tau_s^0 - \int_0^{P_s} \delta B_s d\tau^0 \quad (2)$$

或更進一步的將要求取的兩個重要參數(溫度剖面 $T(p)$ 及水汽混合比剖面 $q(p)$)直接的在輻射傳遞方程中表示出來：

$$\delta T_b = \delta T_s W_{T_s} - \int_0^{P_s} \delta T(p) W(T) dp + \int_0^{P_s} \delta q W(q) dp \quad (3)$$

其中 $\delta T_b = T_b - T_b^0$; $\delta T_s = T_s - T_s^0$; $\delta T(p) = T(p) - T^0(p)$; $\delta q(p) = q(p) - q^0(p)$ 。()⁰代表初始值， T_b 為亮度溫度， T_s 則是地表溫度，代表近地層非常微薄一層的有效溫度，與近地面的空氣溫度是有所不同的，(3)式中也省略了頻道 v 的符號。(3)式中最有意義的權重函數(Weighting function) W_{T_s} 、 $W(T)$ 及 $W(q)$ 是衛星反演的重要角色，它們可以進一步的定義為：

$$W(T_s) = \beta_s \tau_s \quad (4-1)$$

$$W(T) = \beta d\tau/dp \quad (4-2)$$

$$W(q) = \{ (B(p_s) - B_s) \tau_s + \int_0^{P_s} \tau dB \} d \ln \tau_w / d \ln p \quad (4-3)$$

其中 $\beta_s = \frac{\partial B / \partial T_s}{\partial B / \partial T_b}$; $\beta = \frac{\partial B / \partial T}{\partial B / \partial T_b}$ ，簡單說明乃是普朗克函數對溫度的一階微分代入 T_s 、 T 或 T_b 值的比率，是將輻射能 R 轉換成 T_b 及 $\delta \beta(T)$ 轉換成 $\delta T(p)$ 的函數。

(4-1)式是地表溫度的權重函數，也就是總透射率，對於窗區頻道而言， τ_s 趨近於1，有著最大的貢獻。至於強吸收頻道， τ_s 趨近於0，沒有提供任何訊息。

(4-2)式是溫度剖面的權重函數，它與透射率在垂直方向變化成比例。透射率在垂直變化最大的高度層上會有最大的機會可以求取最佳的溫度。換句話說，在權重函數最大值層(Weighting function peak level)是衛星反演誤差最小的地方；若是衛星觀測所有頻道的權重函數都沒有明顯的最大值層存在，那麼衛星反演的誤差就會很大了。未來的衛星紅外線觀測朝向更多頻道(上千個)、更高解像力(高波譜分辨率，比目前高出50至100倍)，則權重函數

最大值層出現機率更多，權重函數曲線更為窄細，衛星反演求取的溫度、濕度的精確度將會提高至1°及10—15%左右 (Huang等, 1992; Smith, 1992)。

因為衛星紅外線觀測存在著上面談到的問題，因而反演求解有可能出現無限多解的困難，如何應用數值方法及其它客觀輔助資料將是下面要繼續探討的。

(4-3)式解析出水汽剖面權重函數的兩大項的來源。其中 τ_v 表示水汽部份透射率，一般來講總透射率 τ 是 τ_d (二氧化碳及其它微量氣體的透射率)與 τ_v 的乘積，即 $\tau = \tau_d \tau_v$ 。水汽的訊息在於垂直方向上水汽透射率的變化乘上大括符裏的兩項。括符裏的第一項代表著地表與近地面空氣溫度的對比，此對比越大則水汽訊息也跟著被提高了；第二項則代表了蒲郎克函數在垂直方向的變化，也就是溫度垂直遞減率的變化，若是在垂直方向溫度沒有變化，那麼此項也就沒有貢獻了。因此若地表與空氣間溫度沒有變化，大氣溫度又是常溫的，則不管水汽頻道的吸收放射如何，永遠得不到的水汽訊息。

基於以上衛星紅外線觀測原理、輻射理論以及資料誤差的了解，進一步則可以應用數值方法來反求我們所期待的溫度及水汽剖面的資料。

一般對付衛星反演問題是需要使用數學上所謂的“Minimization”，定義一個“Cost”或“Penalty”函數，使得這個函數在得到解的時候有最小值。這個數學手續基本上是與數值天氣預報模式多重參數變分法(Multi-dimensional Variational Analysis)是相同的。假設我們以這個數值方法為起點，那麼反演公式以反覆非線性求解的矩陣型式則為

(Rodgers, 1976; Eyre, 1989)

$$\delta X_{n+1} = (W^T E^{-1} W + S^{-1})^{-1} W^T E^{-1} (\delta Y_n + W^T \delta X_n) \quad (5)$$

其中 δX 為所要求的參數(T_s 、 $T(p)$ 、 $q(p)$)與初始值 X 的差值， W 矩陣為 T_s 、 $T(p)$ 、 $q(p)$ 的權重函數； E 為衛星觀測誤差(measurement noise covariance)； S 為初始場的誤差(background error covariance)， δY 為衛星觀測與初始場計算得到衛星輻射的差值。 n 代表反覆求解之階段數， $n=0$ 代表初始值。

在ITPP-4中將(5)式作了兩種簡化，第一是將 $W^T \delta X_n$ 項忽略不計，使方程式變為線性；第二則是將 S^{-1} 改為簡單經驗常數，因為通常初始資料的誤差相當難以準確估計，此種作法ITPP-4的解法又被人叫作最小平方法。在ITPP-5及將來的改良本則又將 W 轉換成另一較小長度的矩陣，其基本原理可以參考Smith等(1976)。利用(5)式可以作理論上反演線性誤差，此誤差可表示為(Rodgers, 1987)：

$$\epsilon = (W^T E^{-1} W + S^{-1})^{-1} \quad (6)$$

其中矩陣 ϵ 的對角元素即是溫度及水汽剖面理論上的平方誤差，此誤差可以說明衛星反演精確度的極限。圖三所表示為HIRS/2資料反演線性誤差分的結果。

三、反演步驟與程序

氣象衛星中心的ITPP-4及ITPP-5軟體處理美國NOAA軌道衛星HIRS/2及MSU資料，反演大氣溫、濕度垂直剖面的過程中，首先要求取初始場。溫、濕度垂直剖面及地表溫度的初始資料可以使用氣候資料(根據經、緯度、季節時間自資料庫中取得)，或是利用迴歸方法(根據模式計算的HIRS/2及MSU模擬值與相對應的探空溫、濕度剖面作迴歸而得到迴歸係數)所計算而獲得。利用線性迴歸法求取初始場對反演的成敗扮演著很重要的角色，因為非線性的關係(尤其是水汽量與輻射兩者間)，若是水汽初始值不佳，則反演常常得不到最佳解。迴歸中使用的資料庫若是能夠作較詳細的分類，則初始結果會比較完善，進而會改進反演最終的結果。目前氣象衛星中心已開始收集儲存亞洲及太平洋附近地區的探空剖面資料，建立適用於台灣附近衛星資料反演的初始場迴歸係數，將來反演結果的改良是可預期的。

反演過程中，首先將HIRS/2資料存入 3×3 的網格裏(75公里水平解像力)，MSU資料則被內差到對應的HIRS/2的網格裏，接下來是ITPP軟體中的三個反演程序(Smith等, 1983; Smith等1985)：

(1) 使用HIRS/2的 1-3及11-12頻道加上 MSU的 1-4頻道資料求取溫、濕度的垂直剖面初始值(迴歸法)。此一方法可以避免雲的干擾,得到較好的初始值,因為HIRS/2的1-3及11-12頻道受到雲的影響較小,而 MSU可以穿透非降雨性的雲系。在初始剖面得到後,如遭遇有雲的情況下,雲高及雲量(75公里網格範圍內)則利用下節描述的方法來求得。

(2) 處理在75公里範圍內雲對反演影響的:當 3×3 網格內被認定受到雲的影響時(HIRS/2窗區頻道的亮度溫度小於初始地表溫度,且可見光反射率大於某一閾值),以CO₂ Slicing法(Smith & Platt, 1978; Menzel等, 1983)求取雲高及雲量。在雲層下的溫、濕度權重函數中的透射率則變為:

$$\tau = (1 - N) \tau^{\text{clear}} \quad (7)$$

N 為雲量, τ^{clear} 代表晴空下的透射率。至於初始濕度剖面在雲層(P_c)以下也修正成爲,

$$q(P_c) = Nq_{\text{sat}} [T^0(p_c)] + (1 - N)q^0(P_c) \quad (8)$$

其中 P_c 為雲層氣壓; N 為雲量(以CO₂ Slicing求得); $q_{\text{sat}} [T^0(p_c)]$ 為雲層溫度 $T^0(p_c)$ 下的水汽飽和混合比。其中雲以下的水汽剖面則以 $q(p)$ 及 $q^0(p)$ 作線性內差。透過(7)與(8)式的調整後,將雲的影響考慮在裏面,在有雲的情況下的反演就與晴空時完全相同。

(3) 使用HIRS/2資料(在夜間用1-19頻道,在白天用1-16頻道)加上MSU資料,配合相關的雲參數,反覆反演求得最後的溫、濕度垂直剖面。同時也開始實施品質管制,對於反演結果不良(利用反演剖面計算的輻射能與觀測到的輻射能相差大者)的區域則認定為無法反演。

四、未來發展與結語

中央氣象局氣象衛星中心透過與美國威斯康辛大學技術合作,成功的引進ITPP軟體,順利的建置在氣象衛星中心的電腦系統上,已上線測試產生所接收範圍的大氣溫、濕度垂直剖面。在未來的一兩年,除將繼續測試成果、改良缺陷外,將繼續擴展產品由基本的溫、濕度的垂直剖面產生風場、可降

水量、雲參數、穩定指數等副產品,以提供天氣預報作業參考,並配合中央氣象局發展中的四維資料同化計畫,提供相關衛星資料與反演技術,以期能進一步改進數值天氣預報模式。

本文中只討論到氣象衛星資料反演大氣垂直剖面的理論基礎、數值方法的應用與客觀及非客觀輔助資料的角色,待氣象衛星中心測試一段時間,將在亞洲及大平洋地區反演的結果做過分析後,再提出更詳細的報告,並對反演程序、方法的修改等做進一步的討論。

誌謝: 本文由鍾佩容小姐打字,謹此誌謝; 本文乃在中央氣象局八十四年度委託研究計畫支持下完成。

參考文獻:

- 柳中明, 顏泰崇, 沈秀蓉, 1988: 梅雨季TOVS遙測資料處理。中央氣象局研究報告第304號, 303-318頁。
- 劉振榮, 1990: 臺灣區衛星遙測大氣垂直剖面反演方法之研究。大氣科學, 十八期, 一號, 1-19頁。
- 劉振榮, 朱曙光, 顏泰崇, 1991: 利用地面及對流層頂資料以改善衛星遙測大氣垂直剖面。CWB78-01-12, 78頁
- 劉振榮, 陳萬金, 1992: 同時物理反演法在TAMEX期間反演結果之分析。大氣科學, 二十期, 二號, 135-152頁。
- 劉振榮, 陳萬金, 1993: 應用AVHRR資料在HIRS/2視場雲量估算之研究。大氣科學, 二十一期, 一號, 23-53頁。
- Eyre, J. R., 1989: Inversion of cloudy satellite sounding radiances by nonlinear optimal estimation, I: Theory and simulation for TOVS, Q. J. R. Meteorol. Soc., 115, 1001-1026。
- Huang, H. L., Sun, W. L., Smith and H. M. Woolf, 1992: Vertical resolution and accuracy of

atmospheric infrared sounding spectrometers. J. Appl. Meteor., 31, 265-274.

Menzel, W. P., W. L. Smith and T. R. Stewart, 1983: Improved cloud motion wind vector and altitude assignment using VAS. J. Climate and Appl. Meteor., 22, 377-384.

Rodgers, C. D., 1976: Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation. Rev. Geophys. Space Phys., 14, 609-624.

Rodgers, C. D., 1987: A general error analysis for profile retrievals. RSMJ 87, Advances in remote sensing retrieval methods, a Deepak Publishing, Hampton, Va.

Smith, W. L., and C. M. R. Platt, 1978: Comparison of satellite-deduced cloud heights with indications from radiosonde and ground-based laser measurements. J. Appl. Meteor., 17, 1796-1802.

Smith, W. L. and H. M. Woolf, 1976: The use of eigenvectors of statistical covariance matrices for interpreting satellite sounding radiometer observations. J. Atmos. Sci., 33, 1127-1140.

Smith, W. L., H. M. Woolf, C. M. Hayden, A. J. Schreiner, and J. F. Lemarshall, 1984: The physical retrieval TOVS export package. The Tech. Proc. of the 1st International TOVS Study Conf., p.227-278, Igls, Austria, ed. W. P. Menzel. Report of CIMSS, Univ. of WI-Madison.

Smith, W. L., H. M. Woolf, C. M. Hayden, and A. J. Schreiner, 1985: The simultaneous export retrieval package. The Tech. Proc. of the 2nd International TOVS Study Conf., Igls, Austria, ed. W. P. Menzel. Report of CIMSS, Univ. of WI-Madison.

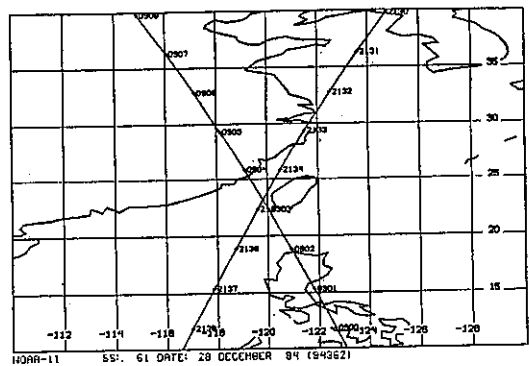
Smith, W. L., 1992: Future space-based sounding observations for weather analysis and

forecasting. Adv. Space Ses., vol.12, no. 7, p.175-178.

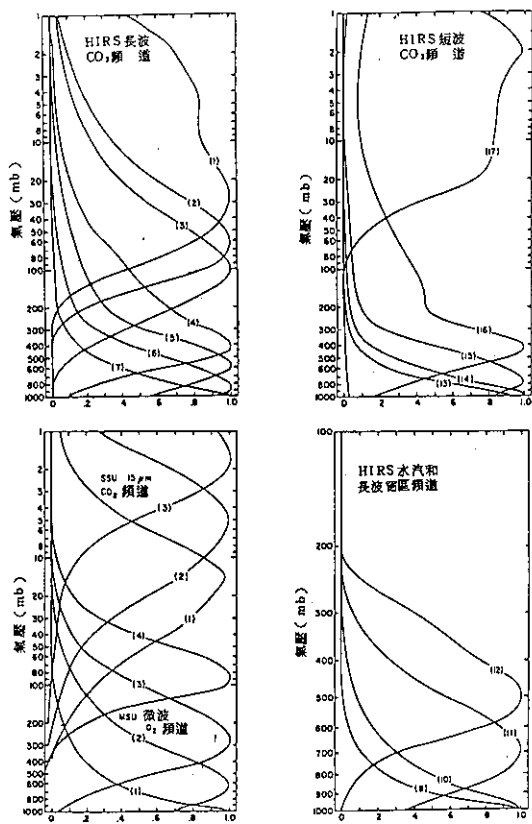
Yen, T. C., and H. S. Wang, 1986: An preliminary study of TOVS retrieval in Taiwan. The Tech. Proc. of the Third TOVS Study Conference. p332-338. Igls, Austria, ed. W. P. Menzel. Report of CIMSS, Univ. of WI-Madison.

HIRS 頻道序號	中心 波數	中心 波長 (μm)	主要 吸收氣體	權重函數最大 氣壓層度(mb)	預計溫度觀 測的目的
1	668	14.98	CO ₂	30 mb	Temperature sounding. The 15- μm band channels provide better sensitivity to the temperature of relatively cold regions of the atmosphere than can be achieved with the 4.3- μm band channels. Radiance in Channels 5, 6, and 7 are used to calculate the height and amount of cloud within the HIRS field of view.
2	679	14.70	CO ₂	60 mb	
3	691	14.30	CO ₂	100 mb	
4	704	14.20	CO ₂	400 mb	
5	716	14.00	CO ₂	400 mb	
6	732	13.70	CO ₂ /H ₂ O	600 mb	
7	758	13.00	CO ₂ /H ₂ O	900 mb	
8	899	11.10	Window	Surface	Surface temperature and cloud detection.
9	1028	9.70	O ₃	25 mb	Total ozone concentration.
10	1217	8.20	H ₂ O	900 mb	Water vapor sounding. Provides water vapor corrections for CO ₂ and window channels. The 6.7- μm channel also is used to detect thin cirrus cloud.
11	1364	7.30	H ₂ O	700 mb	
12	1464	6.70	H ₂ O	500 mb	
13	2190	4.57	N ₂ O	1000 mb	Temperature sounding. The 4.3- μm band channels provide better sensitivity to the temperature of relatively warm regions of the atmosphere than can be achieved with the 15- μm band channels. Also, the short wavelength radiance are less sensitive to clouds than those for the 15- μm region.
14	2215	4.52	N ₂ O	850 mb	
15	2240	4.44	CO ₂ /H ₂ O	700 mb	
16	2259	4.40	CO ₂ /H ₂ O	400 mb	Surface temperature. Much less sensitive to clouds and H ₂ O than the 11- μm window. Used with 11- μm channel to detect cloud contamination and derive surface temperature under partly cloudy sky conditions. Simultaneous 3.7- and 6.7- μm data enable reflected solar contribution to be eliminated from observations.
17	2361	4.24	CO ₂	5 mb	
18	2312	4.00	Window	Surface	
19	2471	3.70	Window	Surface	
20	14387	6.70	Window	Cloud	Cloud detection. Used during the day with 4.0- and 11- μm window channels to define clear field of view.
MSU 頻道序號	頻率 (GHz)	主要的 吸收氣體	權重函數最大 氣壓層度 (mb)	預計溫度觀 測的目的	
1	50.31	Window	Surface	Surface sensitivity and cloud attenuation determination.	
2	51.73	O ₃	300 mb	Temperature sounding. The microwave channels probe through clouds and can be used to eliminate the influence of clouds on the 4.3- and 15- μm sounding channels.	
3	54.94	O ₃	300 mb		
4	57.93	O ₃	90 mb		
MSU 頻道序號	波長 (μm)	主要的 吸收氣體	權重函數最大 氣壓層度(mb)	預計溫度觀 測的目的	
1	110	CO ₂	15.0 mb	Temperature sounding. Using CO ₂ gas cell line pressure modulation, the MSU observes infrared emission from the stratosphere.	
2	150	CO ₂	6.0 mb		
3	150	CO ₂	1.5 mb		

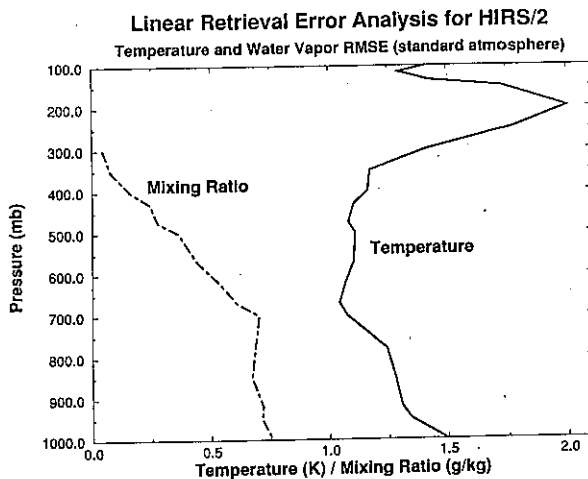
表一：TOVS各項儀器之頻道波譜特性



圖一：NOAA-11衛星軌道之涵蓋範圍



圖二：TOVS之權重函數



圖三：HIRS/2線性反演之誤差

Theoretical Backgrounds of Atmospheric Vertical Profile Retrieval System from Satellite Data at CWB

Tai-Chung Yen¹ Hung-Lung Huang² Kuang-Hwa Wang¹ Keng-Lu Chang¹

¹ : Central Weather Bureau/ Meteorological Satellite Center

² : University of Wisconsin-Madison/Space Science Engineering Center

Abstract

With the cooperation between Central Weather Bureau and University of Wisconsin-Madison, the ITPP (International TOVS Processing Package) is introduced to Meteorological Satellite Center and running smoothly at Center's system for extensive testing. In this paper, the discussions focus on the theoretical backgrounds of this system, which includes the retrieval background acquisition, inversion theory, numerical method and radiative transfer model and theory. Meteorological Satellite Center now not only can use this system as a solid technique tool but also can further improve through the efforts and experiences gained over times.