

模擬實驗 ATOVS 觀測資料於資料同化之研究

周鑑本
氣象衛星中心
中央氣象局

摘要

本研究主要是模擬測試新一代繞極軌道衛星 NOAA 上的觀測儀器 ATOVS 運用於一維變分法時的反演能力，反演的參數包括溫、溼剖面、雲中液態水含量及地表微波放射率，並比較新舊兩代衛星於晴空及全雲遮視場的反演結果，由於 ATOVS 包括許多新的微波頻道，因此確能改善雲層以下的溫、溼剖面反演的情形，尤其是對於水汽的反演而言，目前的觀測儀器 TOVS 中使用來反演水汽的頻道全部都是紅外頻道，在雲層以下不具反演的能力，而 ATOVS 中的微波頻道模擬的結果顯示，確能有效的改善此一缺點。微波頻道可以偵測雲中液態水含量及地表微波放射率，因此在實驗中將雲中液態水含量及地表放射率納入反演參數中進行測試，由測試的結果發現，反演之後確能改善初始的猜測值，唯在不同的真值設定之下，其收斂成功的個數有極大的不同，在有雲且液態水含量不大時收斂成功的個數減少很多，尚須進一步的研究以發現其中的原因。

一、前言

自從 1978 年 NOAA 系列衛星開始作業起，其上的紅外線探測器 HIRS 與微波探測器 MSU 及探測平流層溫度的 SSU，一直是衛星反演溫溼剖面的重要工具，其中 HIRS 對於晴空及半雲遮視場的反演扮演極重要的角色，於全雲遮的視場只能仰賴 MSU 探測系統作為輔助，但 MSU 的水平與垂直的解析度都不夠理想，且 MSU 只能反演溫度剖面，對於雲層以下的水汽不具反演的能力，在過去二十年中有許多國內外的學者從事於衛星溫、溼剖面反演的工作，或衛星輻射資料同化的工作，但始終受制於以紅外線為主遙測系統的限制，預計自 1990 年代中期發射升空的新一代衛星上的探測器 ATOVS 上將以 AMSU 取代目前的 MSU，由於其水平與垂直的解析度都大幅的提高，將可成為遙測大氣溫溼剖面的主要工具。AMSU 包括 AMSU-A 與 AMSU-B 兩部分，AMSU-A 包括 15 個頻道，主要用於探測溫度剖面，AMSU-B 主要用於探測水汽剖面，其中尚包括窗區頻道可用於探測地表溫度及地表微波放射率，本文主要的目的是使用輻射計算模式模擬研究新舊兩代衛星於反演溫溼剖面的能力，並建立新一代遙測儀器 ATOVS 的反演方法，以為運用新一代衛星資料作準備。第二段將敘述理論及實驗的方法，第三段敘述實驗的結果，最後是結論與討論。

二、理論回顧及實驗方法

目前所採用的一維變分分析法，是以變分學為

基礎的資料同化方法，簡言之是尋找一個大氣狀態使得所定義的 cost 函數發生極小值，Lorenz(1986) 使用 Bayesian Theory 與假設觀測與背景場誤差是高斯分布的情形下導出的 cost 函數定義如下：

$$J(x) = (x - x^b)^T C^{-1} (x - x^b) + \{y^n - y(x)\}^T E^{-1} \{y^n - y(x)\}$$

其中 x^b 是以數值預報場當作背景場，矩陣 C 是背景場誤差的協方差矩陣， y^n 是衛星觀測的輻射值或亮度溫度， $y(x)$ 是代表由輻射計算模式模擬在大氣狀態為 x 時的衛星觀測值， E 是衛星觀測與輻射計算模式二者誤差和的誤差協方差矩陣，上標 t 代表矩陣的轉置，上標 -1 代表矩陣的反置。

求取 cost 函數極小值時，採用 Rodgers(1976) 所提出的疊代公式(Newtonian iteration)進行數值上的計算，公式如下：

$$x_{n+1} = x^n + w_n \{y^n - y(x_n) - k_n(x^n - x_n)\}$$

$$w_n = C k_n^{-1} (k_n C k_n^{-1} + E)^{-1}$$

其中 K 是 y 對 x 的導函數， n 代表疊代的次數， $k_n = k(x_n)$ ，當疊代計算至 $x_{n+1} - x_n$ 小於某一設定值時判定為收斂，將 x_{n+1} 代入輻射計算模式中計算此時的衛星模擬觀測值，若觀測與計算的差值小於設定的品質檢定值，則視 x_{n+1} 合於品質檢定的條件。

對於 TOVS 觀測儀器選取的頻道包括 HIRS 的 1 到 8 及 10 到 15、MSU 的 2 至 4 及 SSU 中的 1 到 3 頻道，反演的參數包括大氣垂直溫、溼剖面，地表空氣溫、溼度、地表溫度及雲參數，至於 ATOVS 的觀測儀器則保留原有的 HIRS 頻道，捨棄 SSU 以 AMSU 的所有頻道代替 MSU 的頻道，以模擬新一代繞極軌

道衛星的觀測儀器，反演的參數則包括上述的所有參數，並另外加入地表微波放射率及雲中液態水含量，實驗時以衛星的觀測亮度溫度代替輻射值。

反演公式中的矩陣 E 是設定為對角矩陣，即各觀測頻道間的誤差是不相關的，並設定其各頻道的誤差標準差為 0.2°k，反演公式中矩陣 C 是代表背景場的誤差協方差矩陣，實驗中設定各層的溫度與水汽的誤差是各自相關的，但溫度與水汽間的誤差並不相關，其它參數間的誤差也是相互獨立的，當矩陣 C 與 E 定義後，實驗中的背景場 x^b 的設定如下：

$$x^b = x^i + \sum_j \varepsilon_j \lambda_{ci}^{0.5} I_{ci}$$

其中 λ_{ci} , I_{ci} 是矩陣 C 的固有值與固有向量， ε_j 由亂數決定， x^i 是已知的大氣剖面， y^m 是模擬的衛星觀測值，其設定方法如下：

$$y^m = y^i + \sum_j \varepsilon_j \lambda_{Ei}^{0.5} I_{Ei}$$

其中 λ_{Ei} , I_{Ei} 為矩陣 E 的固有值及固有向量， y^i 是由 x^i 代入輻射計算公式計算而得的，在實驗中收斂的條件是 $x_{n+1} - x_n$ 小於 C 矩陣中對角元素的 0.4 倍。

三、結果分析

首先我們比較 TOVS 與 ATOVS 兩種觀測儀器對溫度溼度剖面反演的能力，圖一是晴空的情形，以 300 個剖面進行反演，TOVS 成功收斂 81%，ATOVS 成功收斂 81%，比較其中相同的成功個案，由圖中可以發現溫度剖面 ATOVS 於大部份的地區平均而言皆優於 TOVS，唯修正的幅度不大，對於水汽剖面而言，上層的改進比較小，但對於下層而言則有較大幅度的改進，這是由於 AMSU 中的水汽頻道於低層有較大的權重所致。圖二是比較全雲遮時的情形，且設雲中液態水含量為 0.2mm 時的情形，TOVS 反演成功 72%，ATOVS 反演成功 52%，比較其中相同的 127 個剖面，由圖中可以發現溫度剖面於雲層之上 ATOVS 相對於 TOVS 反演結果改進不大，但於雲層之下則 AMSU 較之原有的 MSU 改進甚多，對於水汽剖面而言，則由於 TOVS 缺乏微波的探測頻道，因此結果遠遜於 ATOVS 的反演結果。

對於 ATOVS 對地表微波放射率及雲中液態水含量的反演，我們分別測試在晴空，全雲遮且雲中液態水含量為 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 的情形下進行，雲中液態水含量的背景場值設為 0.0。由圖三可以發現，對於地表放射率而言，在晴空的情形下，可以得到非常精確的反演結果，但在有雲的情形下，無論是有液態水或無液態水，反演的結果都受到一定程度的干擾。圖四是與圖三相同設定下，液態水含量反演的結果，在晴空時反演的結果

可保持原有初始值的精確度，在有雲的情形下，當雲中液態水含量為 0.0 時，反演的結果比原先的猜測值更不理想，當雲中液態水含量逐漸增加時，反演的結果也逐漸改善。若由收斂個數的多寡來看反演的結果可以發現，當晴空視場時約有 50% 的剖面收斂，而有雲但無液態水含量時，收斂的個數最少約 10%，隨著液態水含量的增加收斂的個數逐漸增多，這個結果的原因，尚須進一步的研究。

四、討論與結論

本次實驗我們利用一維變分法及模擬的衛星觀測值探討新一代繞極軌道衛星上的觀測儀器 ATOVS 的反演能力，初步的結果顯示，ATOVS 觀測儀器於溫度及水汽剖面方面都有改進，尤其是對低層的水汽改進至為明顯，對於全雲遮的視場而言 ATOVS 中的微波頻道使得雲層以下的溫溼剖面得以反演，這將使得衛星的觀測能力不再受制於雲層的限制，這將為以後的資料使用提供更大的空間。AMSU 中提供足以觀測地表微波放射率及雲中液態水含量的能力，初步結果顯示，反演之後的情形大部分都優於初始的猜測值，但是收斂的個數隨真實參數設定的不同而有較大的差異，在某些設定之下反演成功的比例偏低，其中的原因尚須進一步的探討。

實驗中所使用的輻射計算模式未能包含較大水滴或冰晶存在時的散射效應，因此不能夠反演這兩種物理量，在真實的大氣狀態下若要運用此一方法必須事先偵測這兩種物理量的存在與否，若存在則目前的方法並不適用，須事先加以濾除。

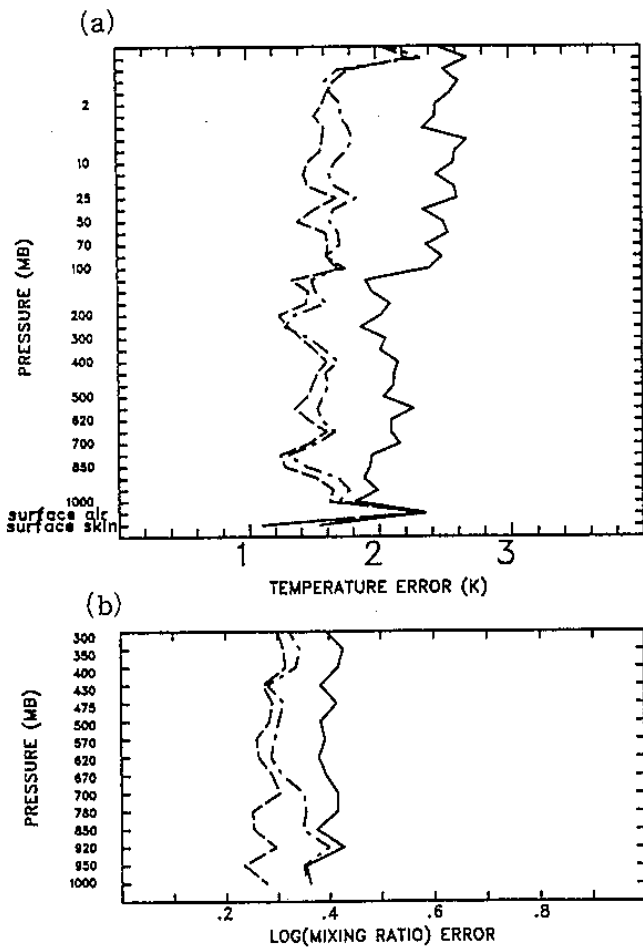
本次實驗以模擬的衛星觀測進行初步的測試，尚有許多狀況並未考慮在內，這須進一步的測試。對於真實的資料而言則尚須考慮觀測誤差的真實大小等等實際的問題，方能得到最佳化的運用方式。

誌謝

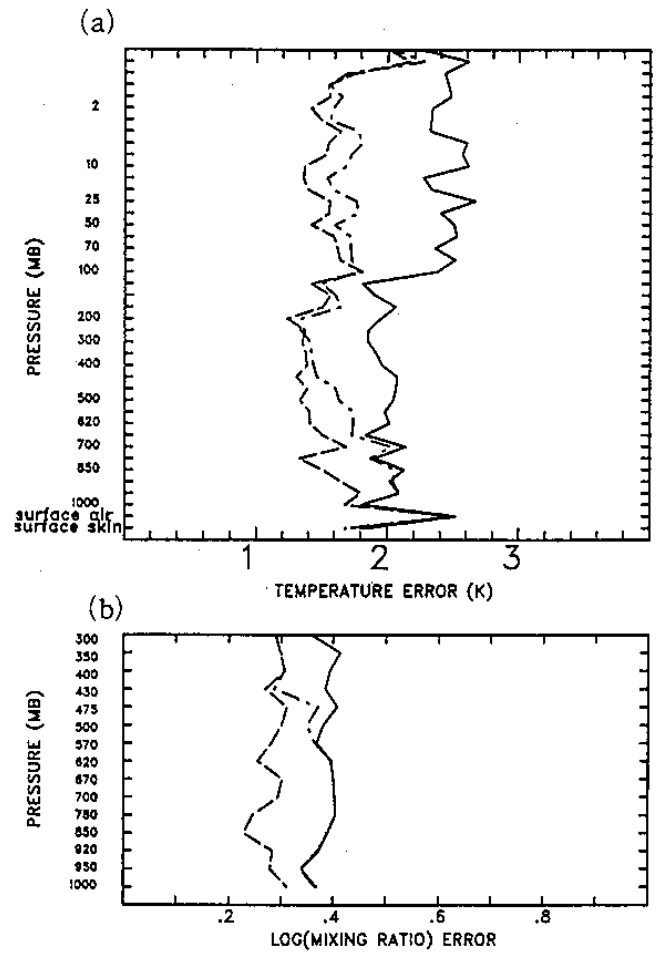
本文承蒙 FSL 程式和繪圖方面的協助，在此深表謝意。

參考資料

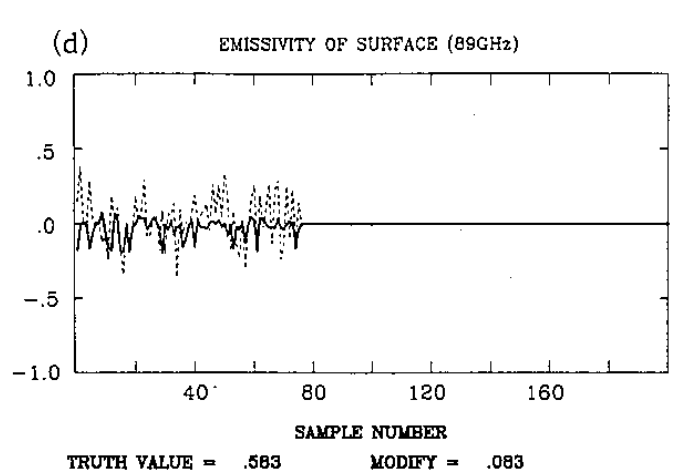
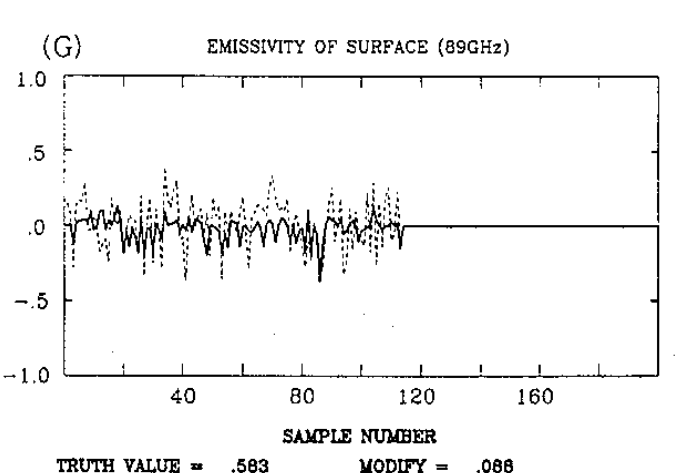
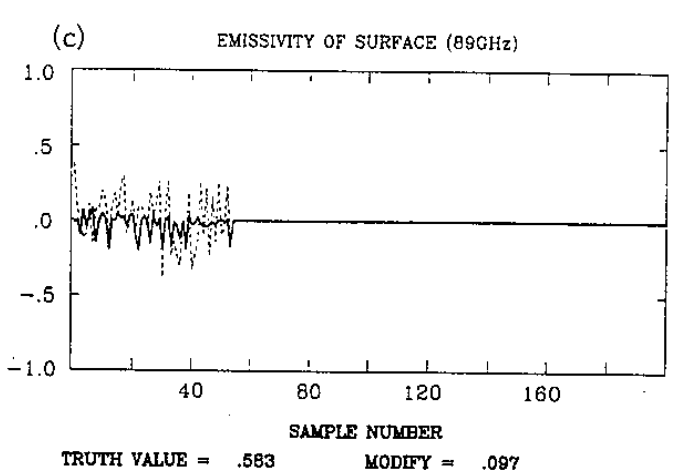
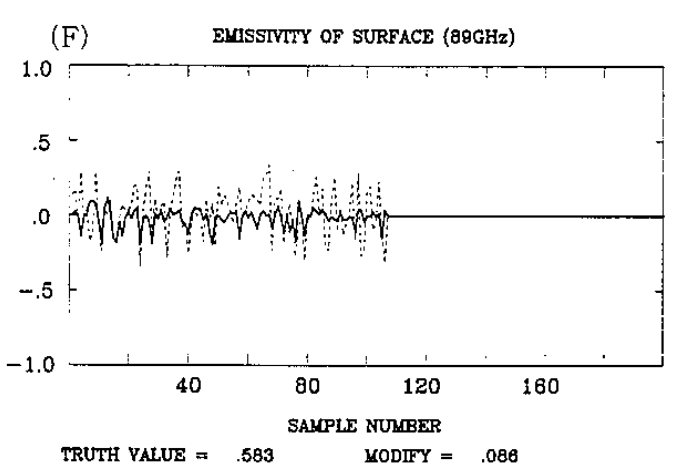
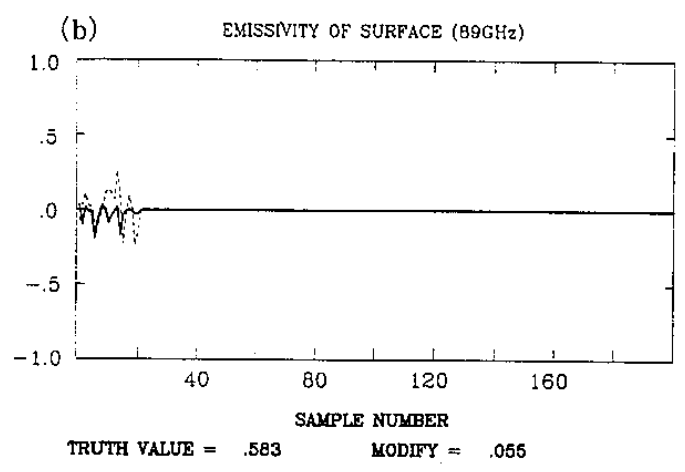
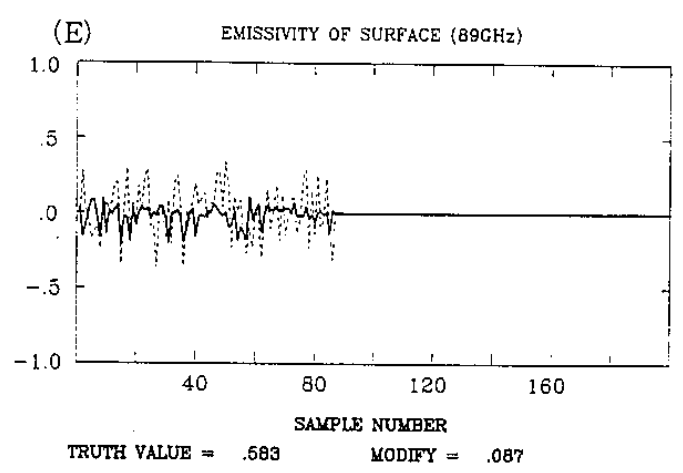
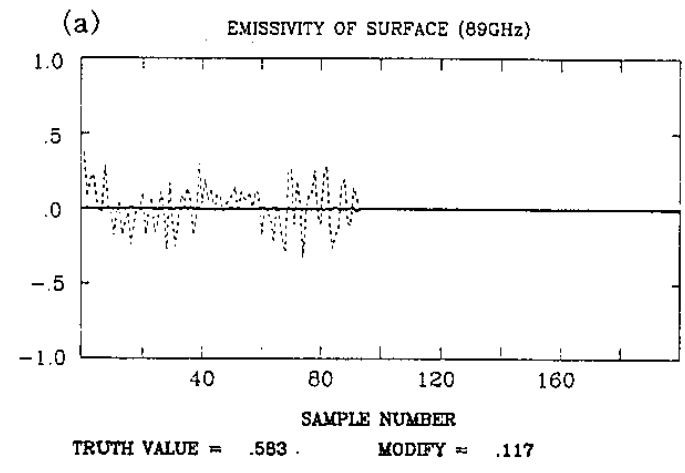
- Lorenz, A. C. 1986: Analysis methods for numerical weather prediction. Q.J.R. Meteorol. Soc., 112, 1117-1194
- Rodgers, C. D., 1976: Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurement of thermal radiation.



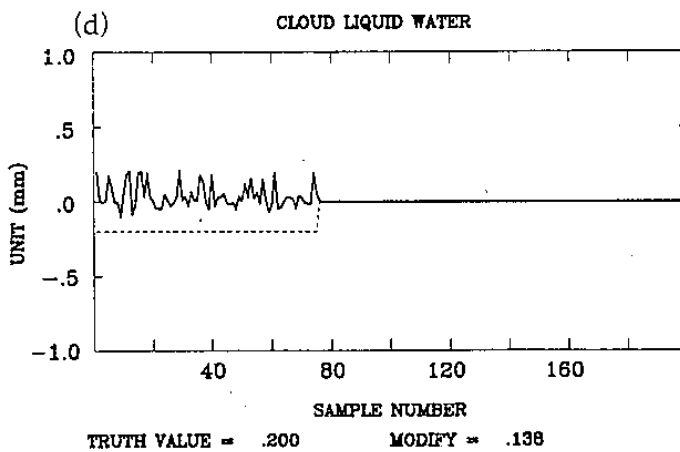
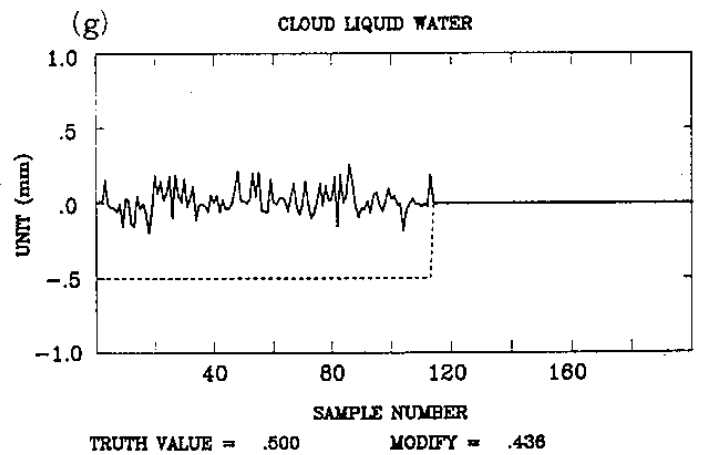
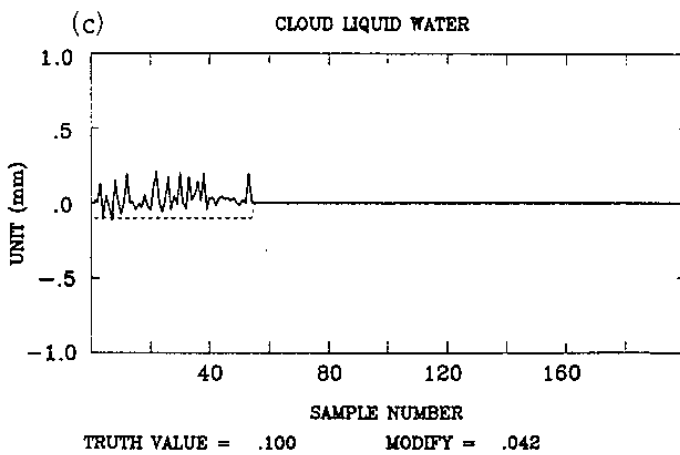
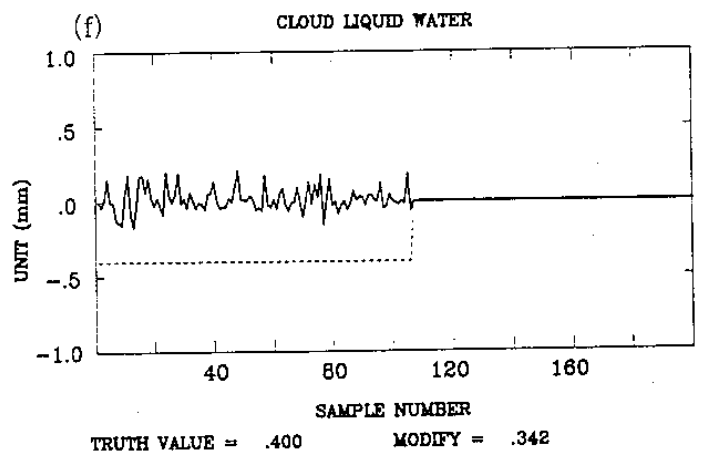
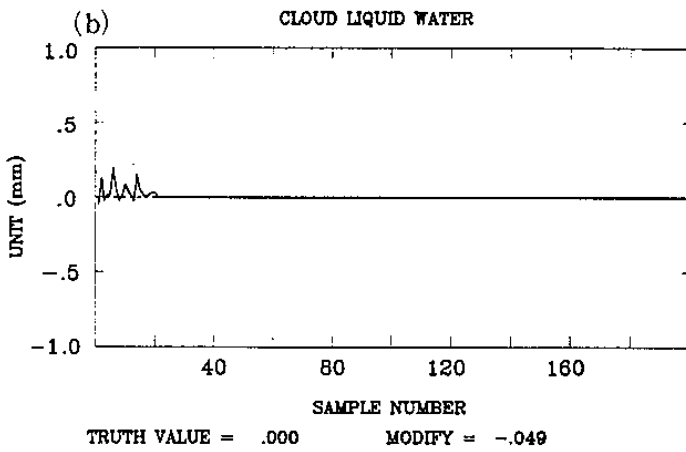
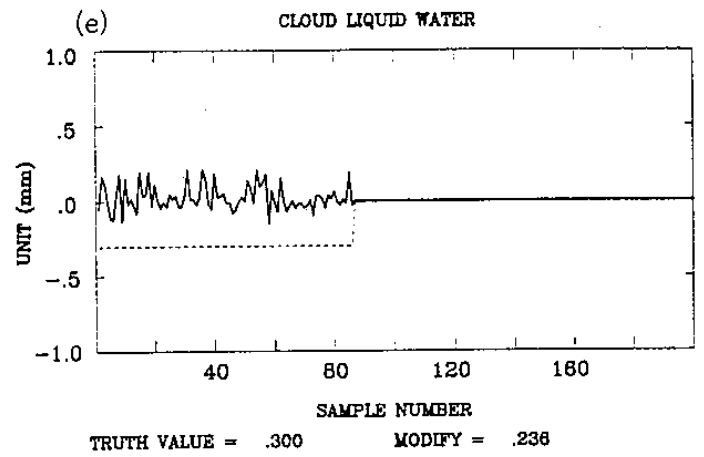
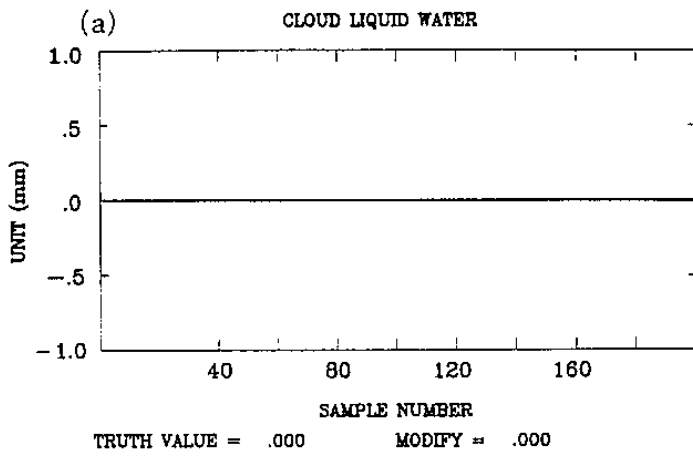
圖一：比較 ATOVS 與 TDVS 於晴空時反演結果的均方根誤差，(a)是溫度剖面，(b)是水汽剖面，實線是背景場的均方根誤差，(---)是代表 ATOVS 的均方根誤差，(-·-·-)是代表 TOVS 的均方根誤差。



圖二：與圖一相似，只是此時非晴空的例子而有雲遮於 500mb, 且雲中液態水含量設為 0.2mm.



圖三：(a)是晴空下微波地表放射率反演的情形，縱座標是放射率，橫座標是反演個數，由(b)到(G)分別是設定液態水含量為0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5的情形下。
 (—)代表反演值減真實值。
 (---)代表背景值減真實值。



圖四：(a)是在晴空情形下反演液態水含量的結果。縱坐標是液態水含量(單位 mm)，橫坐標是反演個數。由(b)到(g)分別是液態水含量設定為 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 的情形。
 (—)代表反演值減真實值。
 (--)代表背景值減真實值。