

地面雙頻微波輻射偵測大氣中 水氣含量及溫度剖線

劉說安 張銓倫

國立中央大學 太空及遙測研究中心暨太空科學研究所

(中華民國八十八年十一月三日收稿；中華民國八十八年十一月八日定稿)

摘 要

本研究探討微波輻射計(Water Vapor Radiometer; WVR)觀測大氣中水氣含量及溫度剖線，於民國八十七年三月十一日到五月二十五日間在台北氣象站進行觀測實驗，蒐集23.8及31.4 GHz兩種頻率的亮度溫度(brightness temperature; 亮溫)，並由統計迴歸估得大氣中水氣含量及溫度剖線。統計迴歸係數係根據民國七十七年到八十六年間，在中央氣象局台北氣象站蒐集的探空資料做分析所得。為探究該迴歸公式品質之良窳，比較迴歸所得大氣之溫、濕剖線與相應的探空觀測，發現加權的均方根差(weighted root mean squared error; weighted RMSE)分別為2.93K、1.50g/m³(以水氣含量為權重)。加入地面溫、濕、壓觀測當約束條件後，迴歸品質則顯著改進，加權的(weighted)RMSE分別降到1.62K、0.83g/m³。基本上而言，迴歸大氣最低層之溫、濕與相應的探空觀測比較，兩者間差異幾乎為零。

依據地面氣象觀測當約束條件方式，本研究中挑選兩種不同大氣剖線，說明雙頻輻射觀測大氣中水氣含量及溫度剖線之技術。第一種個案中，大氣溫、濕度隨高度單調性地遞減。第二種個案中，大氣溫、濕剖線隨高度非單調性地遞減，即剖線存有隨高程快速變化之逆溫、逆濕高頻訊號。雖然如預期般地，WVR觀測掌握不住高頻訊號，但是對單調性遞減之大氣溫、濕剖線，WVR觀測則與相應的探空觀測相當吻合。

關鍵詞：水氣含量、亮溫、輻射偵測

一、前 言

大氣中水氣含量及溫度，對於大氣能量平衡影響至鉅。因此，它們的時空分佈在數值天氣

預報模式的初始化及分析中，扮演極為重要的角色。一般而言，探空觀測法為獲得大氣溫、濕剖線的最基本方法，然而此法屬高消耗性觀測且僅限於陸地上使用。微波輻射偵測則代表另一種獲

取大氣剖線的方式，主要仰賴水氣及氧氣吸收頻帶位於微波波段(Hogg *et al.* 1983; Han and Westwater 1995; Westwater 1997; Sierk *et al.* 1997; Barbaliscia *et al.* 1998; Selheim *et al.* 1998; Westwater *et al.* 1999)。

本研究運用地面雙頻輻射偵測大氣中水氣含量及溫度剖線，觀測資料由民國八十七年三月十一日到五月二十五日間，在中央氣象局台北氣象站進行WVR觀測實驗所蒐集資料中選取，該實驗的部份資料過去曾用來研究WVR觀測大氣總水氣含量(劉 1999)，約束全球定位系統(Global Positioning System; GPS)訊號來估算總水氣含量(劉及楊 1999)，以及驗證GPS觀測總水氣含量(Liou *et al.* 2000)。隨後，得以應用GPS監測颱風侵襲台灣時水氣的動態(Liou and Teng 1999)。在本文中，我們使用WVR實驗部份觀測資料，進一步分析WVR觀測大氣剖線的技術。第二節中簡述輻射偵測大氣參數原理，第三節介紹統計迴歸法，第四節報告觀測結果及分析，最後是總結。

二、輻射偵測大氣參數原理

輻射偵測大氣參數，不論是總水氣含量或則是溫、濕剖線，均根植於輻射傳送理論，鑑於我們先前研究(劉 1999)，已對該理論詳述，茲不再贅述，謹就幾個重要公式略加重述。

微分形式輻射傳送方程可寫成爲(Ulaby *et al.* 1981)

$$\frac{dB(r)}{d\tau(r)} + B(r) = J(r) \quad (1)$$

其中 B 是亮度($W/m^2\text{-sr}$)， r 是位置(距離)(m)， τ 是光程(neper; Np)， J 是源函數($W/m^2\text{-sr}$)。從式(1)

可以推得地面輻射計觀測到的大氣輻射(積分形式)爲

$$B_g = B(\infty)e^{-\tau(0,\infty)} + \int_0^{\infty} J(r)e^{-\tau(0,r)} \frac{d\tau}{dr} dr \quad (2)$$

其中

$$\tau(r, r') \equiv \int_r^{r'} \kappa_e(r'') dr'' \quad (3)$$

其中 κ_e 爲大氣的消散係數(Np/m)。在微波波段，根據Rayleigh-Jeans定律我們可以改寫式(2)爲

$$T_{bg} = T_{bc}e^{-\tau(0,\infty)} + \int_0^{\infty} \kappa_a(r)T_a(r)e^{-\tau(0,r)} dr \quad (4)$$

其中 T_{bg} 爲地面輻射計觀測之亮溫(K)， T_{bc} 爲宇宙背景亮溫(2.7° K)， T_a 爲大氣溫度(K)。本文根據劉(1999)估計亮溫，茲不再重述。注意式(3)中的消散係數於式(4)中已爲吸收係數(κ_a)所取代，按低微波波段大氣散射效應較弱可忽略不計(Janssen 1993)。

三、統計迴歸

式(4)陳述大氣參數經由影響吸收係數而主宰亮溫，換個角度說，大氣參數可經由觀測大氣亮溫迴歸估計。爲了推導統計迴歸公式，一般作法係利用過去蒐集的探空觀測資料，進行輻射傳送理論分析，估計操作頻率的亮溫及相應的大氣剖線，進而做迴歸分析，找出迴歸係數(Westwater *et al.* 1999; 劉 1999)。本研究中，選取測試WVR觀測大氣剖線技術的觀測資料，乃於民國八十七年三月十九日所蒐集，因此，我們以台北氣象站過去十年三月間(民國七十七年到八十六年)的探空觀測資料進行迴歸分析，以降低季節性對迴歸品質的影響，迴歸公式如下：

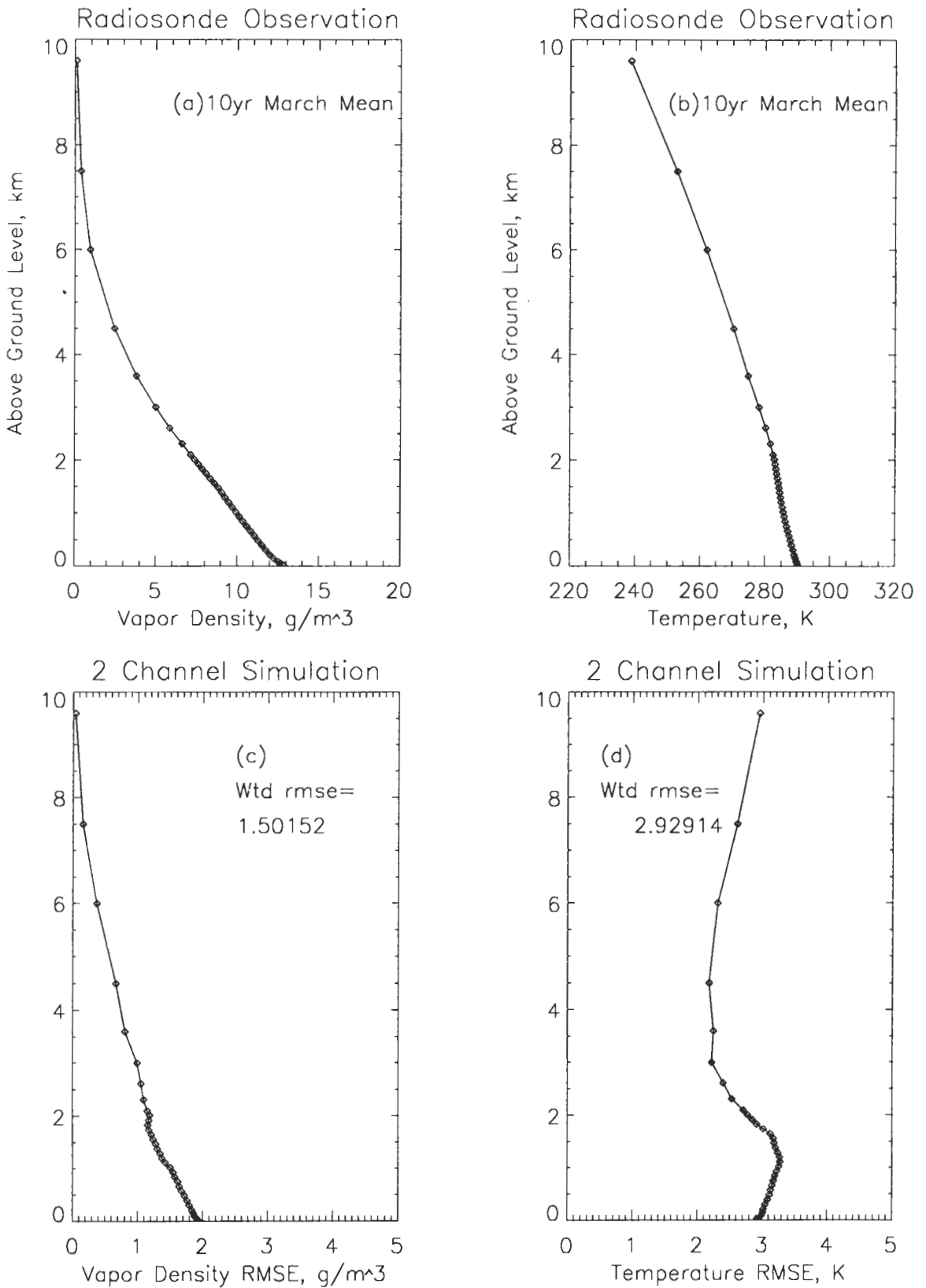


圖 1 根據民國七十七年到八十六年三月間台北氣象站的探空觀測所得平均(a)水氣密度及(b)溫度剖線，及比較迴歸溫、濕剖線及相應的探空觀測，求取之(c)水氣密度及(d)溫度剖線的RMSE。

$$X(j) = A_o^j + \sum_i A_i^j \times T b_i \quad (5)$$

其中 $X(j)$ 代表第 j 層大氣的水氣密度或溫度(大氣層被分成 n 層, $j=1,2,\dots,n$), A_i^j 為多維迴歸係數, $i=1,2,\dots,m$ 代表WVR的頻道, $T b_i$ 為第 i 頻道觀測到的大氣亮溫。以本研究而言, m 等於2, 即 $m=1$ 代表23.8GHz, $m=2$ 代表31.4GHz。 n 則為40。

為了探就迴歸公式(5)的品質, 植入亮溫於迴歸公式以估計大氣溫、濕剖線, 並與相應的探空觀測做比較, 求取RMSE。圖1展示過去十年三月間, 探空觀測所得的(a)平均水氣密度及(b)平均

溫度剖線, 以及比較迴歸溫、濕剖線及相應的探空觀測, 求得之(c)水氣密度及(d)溫度剖線的RMSE。以水氣密度為權重求得之加權的RMSE, 由圖中可看出其值不小, 就水氣密度而言為 1.50 g/m^3 , 就溫度而言為 2.93K 。我們注意到高權重的RMSE, 相當成份源自近地面的不吻合。因此, 加入地面溫、濕壓觀測當約束條件, 重新評估迴歸公式, 得以重寫迴歸公式(5)為

$$X(j) = A_o^j + \sum_i A_i^j T b_i + A_{m+1}^j \times T_o + A_{m+2}^j \times P_o + A_{m+3}^j \times V D_o \quad (6)$$

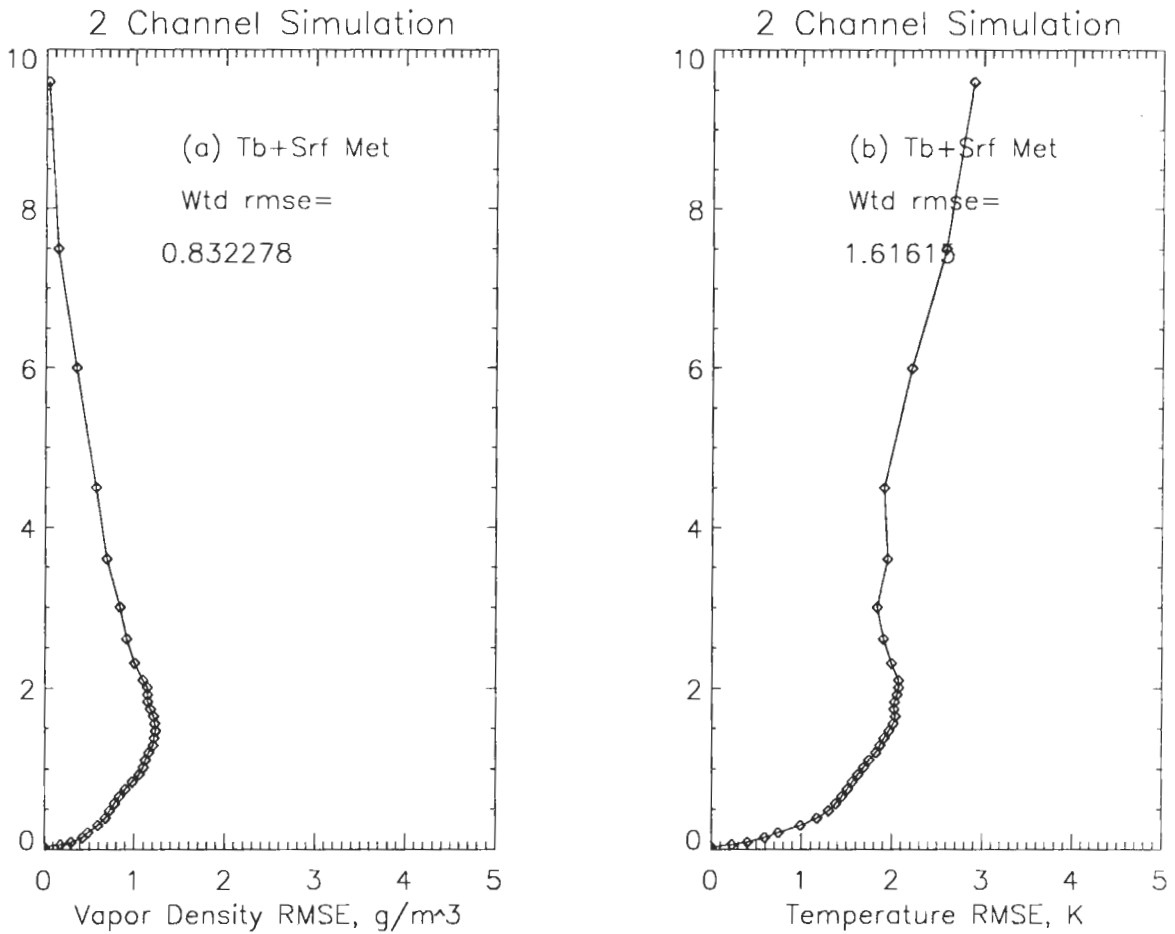


圖 2 以地面氣象觀測當約束條件, 迴歸WVR觀測所得的溫、濕剖線與相應的探空觀測比較, 求得之(a)水氣密度及(b)溫度剖線的RMSE。

其中 T_0 、 $V D_0$ 、 P_0 分別代表地面溫(K)、濕(g/m^3)、壓(hPa)觀測。

圖2展示以地面氣象觀測當約束條件，迴歸WVR觀測所得的溫、濕剖線與相應的探空觀測比較，求得之(a)水氣密度及(b)溫度剖線的RMSE。比較圖1及圖2，很明顯地可以看到地面氣象觀測有效地約束迴歸，改進了大氣剖線的萃取。相對地加權的RMSE對水氣密度而言降至 $0.83\text{g}/\text{m}^3$ ，對溫度而言降到 1.62K 。這些改進在近地面時，特別顯著。基本上而言，以地面氣象觀測當約束條件的迴歸所得及探空觀測在近地面時，幾乎沒有差異。

四、輻射計與探空觀測大氣剖線之比較

本研究選取兩種不同的大氣剖線，說明雙頻WVR觀測大氣剖線技術，其中第一種剖線為溫、濕度隨高程單調性遞減，第二種剖線則非單調性遞減。

圖3展示民國八十七年三月十九日00UTC時，有及無地面氣象觀測當約束條件情況下，WVR觀測及探空觀測的(a)水氣密度及(b)溫度剖線，相應的兩種參數觀測間差異則分別展示於(c)及(d)。整體而言，即使沒有地面氣象觀測，WVR觀測掌握住大氣剖線的變化，然而，在近地面處，WVR觀測對水氣密度與探空比較偏離近 $3\text{g}/\text{m}^3$ ，而溫度之差異則介於2到5K間。加入地面氣象觀測當約束條件後，WVR觀測與探空觀測更為吻合，只是在3公里高處，兩者間之水氣密度差異稍為變大。

圖4展示民國八十七年三月十九日12UTC時，有及無地面氣象觀測當約束條件情況下，

WVR觀測及探空觀測的(a)水氣密度及(b)溫度剖線，相應的兩種參數觀測間差異則分別展示於(c)及(d)。與圖3比較，顯示縱使剖線存有逆溫(濕)現象，WVR觀測仍能抓住大氣大致變化趨勢，只是無法重現隨高程快速變化之逆溫、逆濕高頻訊號。此外，雙頻WVR觀測縱使加入地面氣象約束條件，就水氣密度剖線而言，仍無法改善反演品質，就溫度剖線反演而言，則改善較多，主要是因逆溫現象較逆濕現象來得弱。

另外，我們也比較民國八十七年三月十八日至二十五日間，其它組WVR觀測及探空觀測的水氣密度及溫度剖線，鑒於相應的兩種參數觀測間差異，大致落在本研究選取兩個案的範疇內，因此不再多加敘述。

綜合以上所展示的成果，在過去大氣剖線資訊的輔助情況下，雙頻WVR觀測可抓住大氣剖線大致變化趨勢，加入地面氣象約束條件後，則可某些程度地改善大氣剖線的萃取，尤其是在近地面處的大氣剖線。唯受制於雙頻WVR較為有限的空間解析能力，無法重現隨高程快速變化的逆溫、逆濕高頻訊號。據我們所知，國際上探討相關議題的文獻並不多，如Schaerer and Wilheit (1979)及Skoog *et al.* (1982)等。就應用雙頻WVR觀測大氣剖線的誤差而言，本研究結果不比前述兩文獻遜色。近幾年來，科技日新月異，製作多頻道微波輻射計的技術已趨成熟，對於解析大氣剖線的能力也改善了不少(Solheim *et al.* 1998; Scheve and Swift 1999)。可以預期的是，多頻道微波輻射計觀測大氣剖線的方法，在促進大氣科學相關研究升級所扮演的角色，將會日趨重要。

五、結 論

本研究以民國八十七年三月十九日在台北

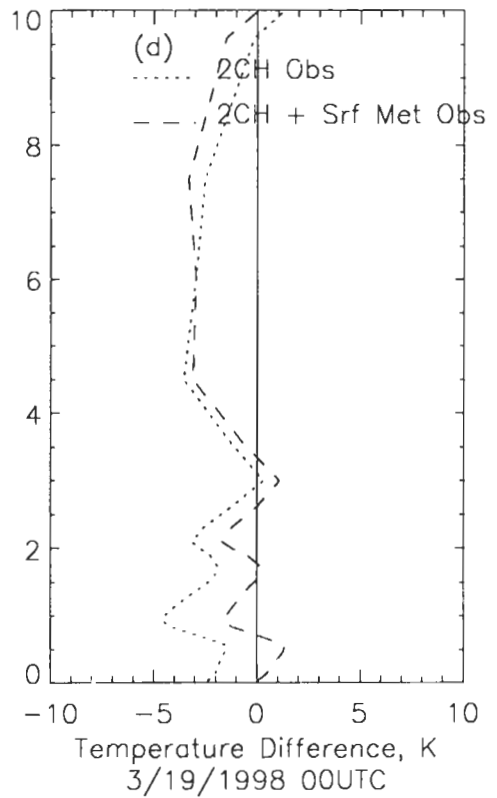
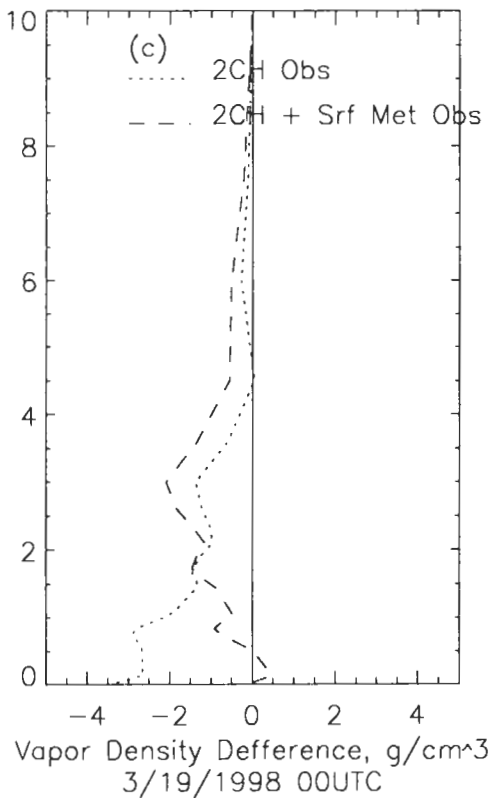
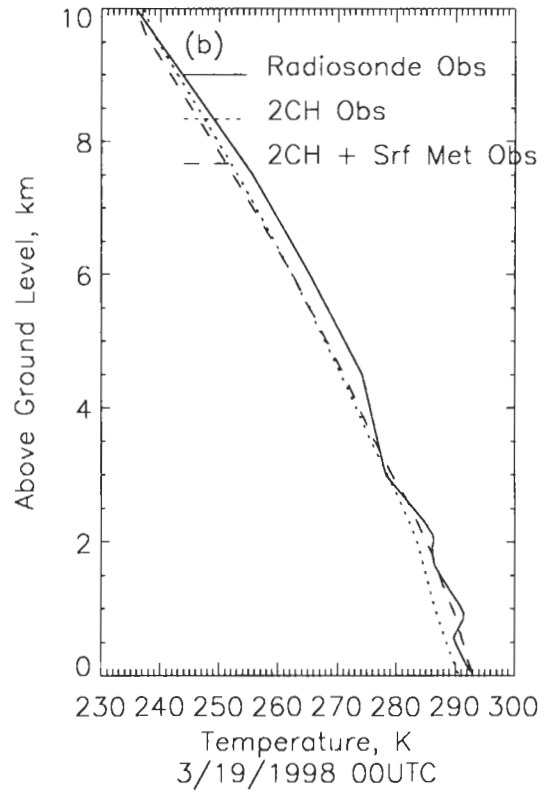
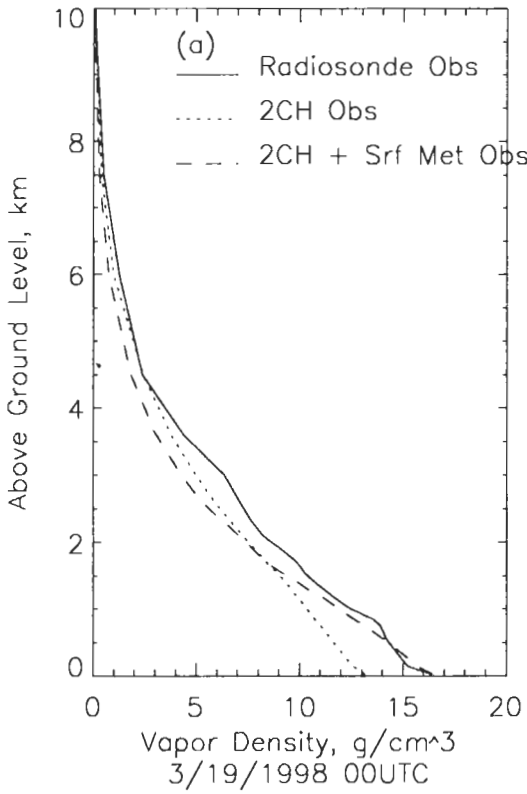


圖 3 民國八十七年三月十九日00UTC時，有及無地面氣象觀測當約束條件情況下，WVR觀測及探空觀測的(a)水氣密度及(b)溫度剖線，相應的兩種參數觀測間差異則分別展示於(c)及(d)。

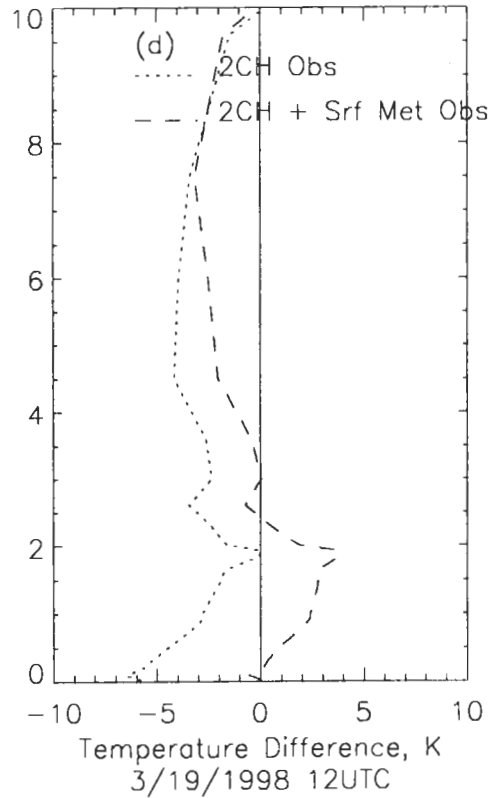
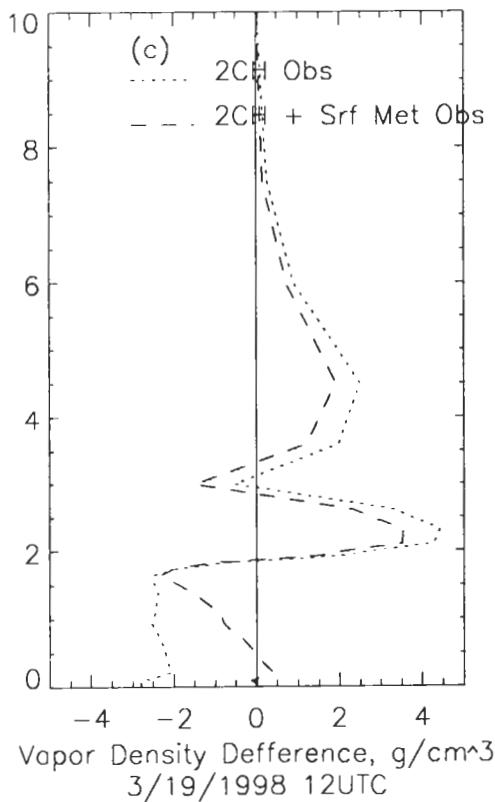
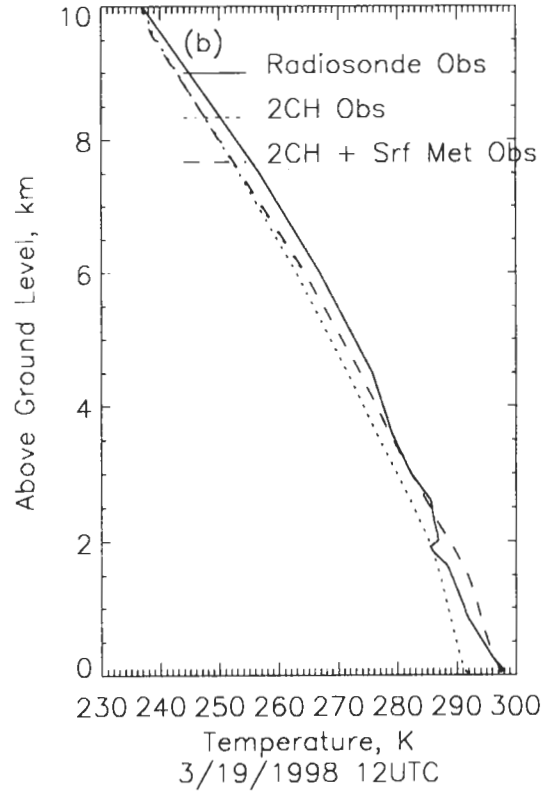
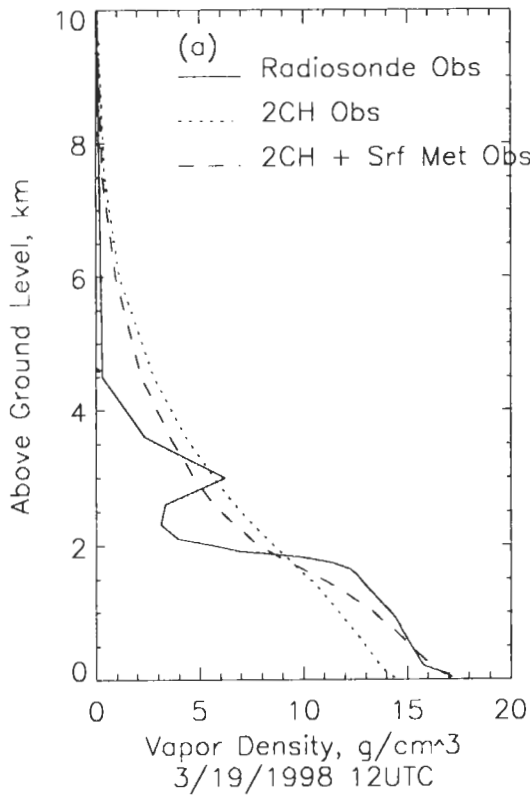


圖 4 民國八十七年三月十九日12UTC時，有及無地面氣象觀測當約束條件情況下，WVR觀測及探空觀測的(a)水氣密度及(b)溫度剖線，相應的兩種參數觀測間差異則分別展示於(c)及(d)。

氣象站的水氣微波輻射計觀測資料為例，說明輻射計觀測大氣中水氣含量及溫度剖線的技術，原理根植於大氣溫、濕度主宰大氣在23.8及31.4 GHz兩種操作頻率的輻射特性。選取三月十九日觀測為例子說明，在於當日兩次探空觀測提供兩種不同大氣剖線：一為溫、濕度隨高程單調性地遞減，一為非單調性地遞減。比較WVR與探空觀測大氣溫、濕剖線顯示，WVR觀測在沒有逆溫濕現象時，掌握住大氣剖線，在有逆溫濕現象時，則無法觀測到快速變化的高頻資訊。此外，加入地面氣象約束可以改善有弱逆溫現象時的低層大氣剖線觀測。

鑑於本研究中使用的水氣微波輻射計僅有23.8及31.4 GHz兩種頻率，對於解析大氣剖線的能力弱，必須使用更多頻道的微波輻射計來改善解析力，如以22-29 GHz水氣吸收頻帶及50-60 GHz氧氣吸收頻帶，分別用來觀測可降水量剖線及溫度剖線，並用兩頻帶組合來估計雲水剖線(Solheim *et al.* 1998)。繼我們先前之研究(劉1999)，茲再次呼籲學界共同努力，開發與提昇多頻道微波輻射計觀測大氣剖線的技術，裨益國內大氣科學研究更上一層樓。

致 謝

本研究在太空計畫室建教合作計畫NSC 87-NSPO(A)-PC-FA07-05支持下完成，特此申謝。作者並感謝美國Radiometrics公司提供水氣微波輻射計，中央氣象局提供觀測場所，台北氣象站陳清得主任及全體員工大力支持觀測實驗，及審查委員們提供寶貴意見。

參考文獻

- 劉說安，1999: 地面微波輻射偵測大氣中可降水之動態，*大氣科學*，**27**，141—158。
- 劉說安、楊名，1999: GPS估算可降水量: WVR約束法，*大氣科學*，**27**，131—140。
- Barbaliscia, F., E. Fionda, and P. G. Masullo, 1998: Ground-based radiometric measurements of atmospheric brightness temperature and water contents in Italy. *Radio Sci.*, **33**, 697—706.
- Han, Y., and E. R. Westwater, 1995: Remote sensing of tropospheric water vapor and cloud liquid water by integrated ground-based sensors. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **12**, 1,050—1,059.
- Hogg, D. C., F. O. Guiraud, J. B. Snider, M. T. Decker, and E. R. Westwater, 1983: A steerable dual-channel microwave radiometer for measurement of water vapor and liquid in the troposphere. *J. Appl. Meteor.*, **22**, 789—806.
- Janssen, M. A., 1993: *Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry*. (ed) John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Liou, Y.-A., Y.-T. Teng, T. VanHove, and J. Liljegren, 2000: Comparison of precipitable water observations in the near tropics by GPS, radiometer, and radiosondes. *J. Appl. Meteor.* (in press)
- Liou, Yuei-An and Yu-Tun Teng, 1999: Precipitable water dynamics of 1998 typhoon Zeb observed by GPS in Taiwan. *International Symposium on GPS Application to Earth Sciences and Interaction with Other Space Geodetic Techniques*, Tsukuba, Ibaraki, Japan, October 18-22, 1999.
- Schaerer, G., and T. Wilheit, 1979: A passive microwave technique for profiling of atmospheric water vapor. *Radio Sci.*, **14**, 371—375.
- Scheve, T. M. and C. T. Swift, 1999: Profiling atmospheric water vapor with a K-band spectral radiometer. *IEEE Trans. Geoscience And Remote Sensing*. **37**, 1,719—1,729.

- Sierk, B., B. Burki, H. Becker-Ross, S. Florek, R. Neubert, L. P. Kruse, and H. Kahle, 1997: Tropospheric water vapor derived from solar spectrometer, radiometer, and GPS measurements. *J. Geophys. Res.*, **102**, 22,411—22,424.
- Skoog, B. G., J. I. H. Askne, and G. Elgered, 1982: Experimental determination of water vapor profiles from ground-based radiometer measurements at 21.0 and 31.4 GHz. *J. Appl. Meteor.*, **21**, 394—400.
- Solheim, F., J. R. Godwin, E. R. Westwater, Y. Han, S. J. Keihm, K. Marsh, and R. Ware, 1998: Radiometric profiling of temperature, water vapor and cloud liquid water using various inversion methods. *Radio Sci.*, **33**, 393—404.
- Ulaby, F. T, R. K. Moore, and A. K. Fung, 1981: *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*, Vol. I: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry. Artech House Inc, Norwood.
- Westwater, E. R, 1997: Remote sensing of tropospheric temperature and water vapor by integrated observing system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 1,991—2,006.
- Westwater, E. R, Y. Han, J. B. Snider, J. H. Churnside, J. A. Shaw, M. J. Falls, C. N. Long, T. P. Ackerman, K. S. Gage, W. Ecklund, and A. Riddle, 1999: Ground-based remote sensor observations during PROBE in the tropical western Pacific. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 257—270.

Ground-Based Dual-Channel Radiometric Sensing of Water Vapor and Temperature Profiles

Yuei-An Liou Chuan-Lun Chang

Center for Space and Remote Sensing Research
and Institute of Space Sciences, National Central University

(Manuscript received 3 November 1999 ; in final form 8 November 1999)

ABSTRACT

A ground-based water vapor radiometer (WVR) operating at 23.8 and 31.4 GHz was utilized to observe sky brightness temperatures at the Taipei weather station from March 11 to May 25, 1998. The observed sky brightnesses are used to investigate radiometric sensing of water vapor and temperature profiles through a statistical regression method whose coefficients are derived based on radiosonde soundings collected at the same site every March starting from the year 1988 to 1997. The regression method is evaluated by a self-consistent test by comparing its retrievals of water vapor and temperature profiles with those observed by radiosonde observations (ground truth). While the weighted root mean square error (RMSE) between the retrievals and ground truth is somewhat large (about 1.5 g/m^3) for the water vapor, the RMSE decreases exponentially with altitude. In contrast, the RMSE for the temperature is on the range of 2.2 to 3 K. To improve the retrieval accuracy, surface observations of temperature, water vapor density, and pressure are used as constraints. We found the RMSE for both water vapor and temperature retrievals are significantly decreased near the surface. Essentially, zero differences between the retrieved profiles and the corresponding radiosonde observations are acquired near the surface for both variables.

With the constraints of surface meteorological measurements, the regression scheme is applied to derive water vapor and temperature profiles from WVR-observed sky microwave emissions. Two extreme cases are chosen for the current study, one with an atmosphere of monotonically decreasing water vapor and temperature profile and the other with a non-monotonically decreasing (inversion) profile. While WVR does not capture a low-elevation inversion (high-frequency signals) in both temperature and water vapor profiles for the latter case, it does perform reasonably well in determining the profiles for the former case.

Key words: Water vapor, Brightness temperature, Radiometric sensing