

GPS 與 WVR 觀測可降水含量之比較

劉說安 黃成勇 王承賢 王啟明

中央大學太空科學研究所暨太空遙測中心

中壢市五權里 38 號 32054

Tel: 03-4227151 轉 7631 Fax: 03-4254908 Email: yueian@csrsr.ncu.edu.tw

摘要

大氣中可降水含量(Precipitable Water; PW)的觀測方法，傳統上是施放探空氣球來觀測，但是，探空氣球一經施放便無法回收，而且氣球在上升過程中取樣時間長且會隨風飄移，觀測頻率受制於儀器價格而無法提升，因此，時間解析度較為有限。相對地，全球定位系統(Global Position System; GPS)與水氣微波輻射計(Water Vapor Radiometer; WVR)則具備較高的時間解析度，可連續監測可降水的變化。

本研究的目的是要探討 GPS 與 WVR 觀測可降水含量的技術，其中前者觀測 GPS 衛星播放訊號的遲延量，而後者觀測大氣的微波輻射量，由於兩種物理量均為可降水的函數，因此，均可用來估計大氣中的可降水含量。本文中，將分析民國 87 年 3 月至 5 月在中央氣象局板橋台北氣象站收集的 GPS 與 WVR 觀測資料，來比較兩者觀測可降水含量的差異。

一、 述論

全球定位系統(Global Position System; GPS)是由一組衛星群，飛行在兩萬一千公里的高空，對地面不斷發射雙 L-band (1227.6、1575.42 MHz)載波頻率，地面 GPS 接收站可以二十四小時接收載波訊號。訊號在傳播過程中，受到中性大氣層影響而延遲且傳播路徑為弧線而非直線。遲延量與對流層折射率隨高度變化有關，水氣含量是決定折射率的重要因素之一，所以可藉電磁波傳遞遲延量估計可降水量(Bevis et al. 1992, 1994; Duan et al. 1996; Liou and Huang 2000; Liou et al. 2000a, 2000b)。此外，水氣主宰 WVR 觀測大氣的輻射量，所以 PW 可由 WVR 觀測估得(劉 1999; 劉及楊 1999; Liou et al. 2000b)。

二、 理論介紹

WVR 方面：

A. 輻射傳遞方程式

古典輻射理論由 Chandrasekhar (1960)提出後，歷經許多專家學者的研究解釋，至今成為微波遙測上的重要理論基礎，其主要是描述當不同形式的能量經過介質傳遞時，產生吸收(absorb)、放射(emit)及散射(scatter)等機制，並用輻射的強度變化來表示。

首先，考慮一個忽略散射和極化的輻射場，其輻射強度 I_ν 表示輻射能量通過介質中每一點時，每單位面積、每單位頻率區間及每單位立體角上的能量，根據輻射傳遞原理，一般情況下物體的表面亮度 $B_\nu(T)$ 便是其輻射強度 I_ν ，再利用 Kirchoff 原理、Planck 函數及 Rayleigh-Jeans 近似原理，可得到以亮溫為函數的輻射傳遞方程

$$T_b = T_b^{ext} e^{-\tau(0,s)} + \int_0^s T(s) e^{-\tau(0,s)} \alpha(s) ds \quad (1)$$

其中 T_b^{ext} 為宇宙背景溫度， $\alpha(s)$ 為吸收係數， s 代表路徑， τ 為光程(optical depth)

$$\tau(0,s) = \int_0^s \alpha(s') ds' \quad (2)$$

在(1)式中，亮度溫度 T_b 與觀測頻率、角度及介質的吸收特性有關。

其中，x 分別代表 P 、 ρ_v 、 ρ_l 。

B. 大氣吸收特性

在微波的範圍內，大氣的吸收主要來自於 H_2O 及 O_2 ，在水氣吸收方面，水分子為電偶極的極性分子，在電場的作用下，旋轉能階躍遷在微波波段所對應的共振吸收線有 22.235 GHz（弱吸收線）及 183.31 GHz（強吸收線），其他的吸收光譜則出現在遠紅外線區。本研究中使用 Liebe (1987) 的水氣吸收模式。在氧氣吸收方面，氧氣分子擁有永久磁矩，電場的交互作用產生一族旋轉能階吸收線在 50 GHz 到 70 GHz 之間，以 60 GHz 為中心，以及一單獨的吸收線 118.8 GHz。本研究採用 Rosenkranz (1975) 建立的氧氣模式。

由於氣體的吸收係數是溫度 (T)、壓力 (P)、水汽密度 (ρ_v) 及液態水密度 (ρ_l) 的函數，因此本文使用的吸收係數是水氣 (H_2O)、氧氣 (O_2) 及雲水的線性總和

$$\alpha_a = 1.15\alpha_{O_2} + 1.08\alpha_{H_2O} + \alpha_L \quad (3)$$

其中，係數 1.15 及 1.08 為 Keilm (1992) 所建議之修正量。

C. 權重函數

輻射傳遞方程式受到吸收係數的影響，隨高度的變化而變化，而吸收係數又與大氣的溫度、壓力、水汽密度、液態水密度有關，由於吸收係數與這些大氣參數並非簡單的線性相關，須分層考慮不同高度的影響量，故將(1)式線性化得到

$$\delta T_b = \int_0^{\infty} W_T(r) \delta T(r) dr + \int_0^{\infty} W_P(r) \delta P(r) dr + \int_0^{\infty} W_{\rho_v}(r) \delta \rho_v(r) dr + \int_0^{\infty} W_{\rho_l}(r) \delta \rho_l(r) dr \quad (4)$$

其中 $W_T(r)$ 、 $W_P(r)$ 、 $W_{\rho_v}(r)$ 、 $W_{\rho_l}(r)$ 分別代表溫度、壓力、水汽密度、液態水密度的權重函數，表示如下

$$W_T(r) = \kappa_a(r) e^{-\tau(0,r)} + e^{-\tau(0,r)} \frac{\partial \kappa_a(r)}{\partial T} \times \left[T(r) - T_b^{ext} e^{-\tau(r,\infty)} - \int_0^{\infty} T(r') \kappa_a(r') e^{-\tau(r,r')} dr' \right] \quad (5)$$

以及

$$W_x(r) = e^{-\tau(0,r)} \frac{\partial \kappa_a(r)}{\partial x} \times \left[T(r) - T_b^{ext} e^{-\tau(r,\infty)} - \int_0^{\infty} T(r') \kappa_a(r') e^{-\tau(r,r')} dr' \right] \quad (6)$$

GPS 方面：

GPS 系統主要利用訊號在衛星與接收器間的傳播時間做定位，其訊號的兩個頻率分別為 1575.42MHz(L1) 及 1227.6MHz(L2)。其在大氣傳播時，會受到電離層及中性大氣的遲延。其訊號在傳播時可寫成如下的關係式：

$$L_{1k}^i = \rho_k^i - I_k^i + \Delta \rho_k^i + c \delta_k - c \delta^i + \lambda_1 n_{1k}^i \quad (7)$$

$$L_{2k}^i = \rho_k^i - \frac{f_1^2}{f_2^2} I_k^i + \Delta \rho_k^i + c \delta_k - c \delta^i + \lambda_2 n_{2k}^i \quad (8)$$

L 代表接收器接收的載波距離，阿拉伯數字 1, 2 各代表頻率為 L1 及 L2 的訊號， ρ 代表衛星與接收器的徑向距離， I 代表電離層在頻率為 1575.42MHz 的電離層遲延量， δ_k, δ^i 分別代表接收器(k)及衛星(i)的時鐘誤差， λ 代表訊號的波長， n 代表為訊號的周波模稜值。電離層本身具有色散性質，其訊號的遲延量與頻率的平方成反，若將遲延量寫成與訊號 L1 的關係式可寫成

$$\Delta \rho_l = \frac{f_1^2}{f_2^2} I \quad (9)$$

可經由雙頻線性組合成無電離層項：

$$L_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2) \quad (10)$$

在長基線、低仰角的情況下，電離層影響可消除至數公分等級(Brunner and Gu, 1991)，在經過二次差分後

$$L_{3kl}^j = (L_{3k}^i - L_{3l}^i) - (L_{3k}^j - L_{3l}^j) \quad (11)$$

其影響更可減少到數公釐以下的等級(Brunner and Gu 1991)。

在中性大氣方面大氣總遲延量可表示為

$$D = Z_w m_w(\theta) + Z_h m_h(\theta) \quad (12)$$

其中 Z_m 為天頂溼遲延量(Zenith Wet Delay: ZWD)， Z_h 為天頂乾遲延(Zenith Hydrostatic Delay: ZHD)， θ 為觀測仰角， $m_w(\theta)$ 、 $m_h(\theta)$ 分別為 ZWD 和 ZHD 的映射函數(Mapping Function)，在本文中修正 Hopfield 模式(Goad and Goodman

1974)，截角 12 度計算大氣總遲延量。簡單來說，我們假設 $m_w(\theta)$ 、 $m_h(\theta)$ 相同(Duan et al. 1996)，考慮不同接收站 (k, l) 接收同一衛星訊號間的大氣遲延量的差分結果 dD

$$dD = Z_k m(\theta_k) - Z_l m(\theta_l) \quad (13)$$

Z_k, Z_l 分別為 (k, l) 兩站的大氣總遲延量，在短基線時 θ_k 趨近於 θ_l ，式(13)可寫成如下的形式

$$dD = (Z_k - Z_l)m(\theta_l) \quad (14)$$

此時僅能求出相對的遲延量，故必須已知其中一站的大氣總遲延量才能求出另一站的相對總遲延量。對於長基線則因 $m(\theta_k), m(\theta_l)$ 之間數學相關性較低，可直接求出兩測站的絕對大氣遲延量 (Liou et al. 2000b)。

三、資料分析方法與結果

WVR 估算可降水

首先，將當地由氣球探空資料中提供的溫度、濕度及壓力剖面，帶入以發展出來的輻射傳遞模式估算當時的大氣輻射量，該模式是以水氣、雲水、及氧氣的吸收為主，而探空資料並未提供雲水的資訊，因此在模式當中估算輻射量值及總雲水含量時，必須設定每一層探空資料中相對濕度的門檻值，超過此一門檻值時，視為有雲水的存在，而未超過的部分視為可降水的部分 (Han and Westwater 1995)。在過去經由預設的三個門檻值 (92%、94% 及 98%) 帶入的結果，發現以 98% 為門檻值較符合實際的觀測 (劉 1999)，因此我們在輻射傳遞模式中以 98% 作為估算的門檻值。

接著，我們將觀測得到的亮溫 (T_b) 與 PW 及 LWP 的關係以多維線性回歸式表示如下：

$$\begin{aligned} PW &= A_0 + \sum_i A_i \times T_{b_i} \\ LWP &= B_0 + \sum_i B_i \times T_{b_i} \end{aligned} \quad (15)$$

其中 A_0, B_0, A_i 及 B_i 分別為亮溫反演式的係數，足標 i 表示不同的頻率， T_b 為觀測的亮溫值。另外也可以光程 τ 來反演 PW 及 LWP 如下

$$\begin{aligned} PW &= C_0 + \sum_i C_i \times \tau_i \\ LWP &= D_0 + \sum_i D_i \times \tau_i \end{aligned} \quad (16)$$

其中 C_0, D_0, C_i 及 D_i 分別為以光程反演的係數， τ_i 則為不同頻率的光程，而光程是經由亮溫估算得到的，其關係式是將輻射傳遞方程式線性化得到

$$T_b = T_b^{ext} e^{-\tau} + T_{mr} (1 - e^{-\tau}) \quad (17)$$

其中 T_{mr} 為大氣的平均輻射溫度 (mean radiating temperature)，可利用平均值定理計算，如下

$$T_{mr} = \frac{\int_0^\infty \alpha T e^{-\int_0^s \alpha dt} ds}{\int_0^\infty \alpha e^{-\int_0^s \alpha dt} ds} \quad (18)$$

再經由 (20) 式即可得到光程，如下

$$\tau (dB) = 3.43 \ln \left[\frac{T_{mr} - T_b^{ext}}{T_{mr} - T_b} \right] \quad (19)$$

反演係數的計算是將收集到的氣球探空資料經由線性回歸分析，這裡為了避免季節帶來的差異，我們把探空資料分月份處理，得到適用於當月的反演係數。再利用 (18)、(19) 式估算出可降水量及液態水量 (劉 1999)。

天頂溼遲延量及可降水量的關係

以 GPS 系統或輻射儀計算的 ZWD 為訊號在傳播時所受到 PW 影響的遲延量，經由下列的關係式可轉換 ZWD 成 PW (Bevis et al. 1994)：

$$PW = \Pi \times ZWD \quad (20)$$

其中

$$\Pi = \frac{10^8}{\rho R_v [(k_3 / T_m) + k_2]} \quad (21)$$

此式中， R_v 為水氣空氣常數 ($J/Kg \cdot k$)， k_3 為 $3.793 \pm 0.012 \times 10^5 K^2 / mb$ ， ρ 為水的密度， k_2 為 $22.1 \pm 2.2 K / mb$ ，加權平均溫度

$$T_m = \frac{\int (P_v / T) dz}{\int (P_v / T^2) dz} \quad (22)$$

P_v 為水氣壓(mb), T 為溫度(K), 一般來說, Π 約為 0.15。但是, Π 本身為季節、位置及氣候的函數, 其變動大小約為 20%(Bevis et al. 1994), 根據(Liou et al. 2000b)以台北站 1997 年至 1998 年十月份的 586 筆探空資料統計的結果, 其值為 0.153 至 0.166, 平均值為 0.159, 標準偏差為 0.0022。

本文中 GPS 訊號取樣時間為每三十秒一筆, 每小時解一筆大氣天頂溼遲延量, 因探空氣球無法提供如此高頻率的量測, 因此使用地表模式, 以地表溫度 T_s 計算平均加權溫度(Bevis et al. 1992), 根據台北站的探空資料(Liou et al. 2000b), 地表溫度及平均加權溫度可表示為:

$$T_m = a + b \times T_s \quad (23)$$

其中 a 與 b 是利用當月探空氣球所反演的係數。

結果討論

經由以上敘述的分析方法, 得到不同方式觀測估算的可降水量。其中在 WVR 方面, 由於降雨期間資料受到儀器上水滴附著的干擾, 於本研究中排除降雨後的資料有 4119 筆, 另外, 在 GPS 方面, 由於取樣資料的不足導致估算可降水量時, 差異較大的值也加以排除, 得到約 3758 筆的資料, 加上收集自探空氣球(RAOBs)的資料約 167 筆, 比較的結果如圖一。圖中我們將 WVR 方面受到降雨影響的資料排除後, 發現在此三者間的比較上, 可降水量的趨勢是大致相同的, 唯有在降雨出現前後的時段, 差異較為明顯。以下表示 RAOBs、WVR 及 GPS 在不同月份的平均值及標準差。發現在不同月份的平均值有逐步增加的趨勢, 而標準差在四月份出現較高的值, 此外, 從三者間的比較中發現 WVR-RAOBs 之間的差異, 最大值出現在五月的 1.51, 而在 GPS-RAOBs 及 WVR-GPS 方面, 最大值分別在四月的 0.909 及五月的 0.967。

Month	RAOBs		GPS		WVR	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD
March	3.79	0.61	3.21	0.85	3.25	0.79
April	4.63	0.87	3.92	1.20	3.61	1.06
May	5.54	0.64	5.14	1.00	4.88	1.13

表一、不同月份的平均值(cm)及標準差(cm)。
SD = Standard Deviation.

Month	WVR-RAOBs	GPS-RAOBs	WVR-GPS
	rmsd(cm)	rmsd(cm)	rmsd(cm)
3	0.917	0.931	0.589
4	1.004	0.909	0.744
5	1.513	0.791	0.967

表二、WVR、GPS 及 RAOBs 不同月份的差異量。

四、結論與未來展望

本研究針對 GPS 與 WVR 兩者對於估算可降水量的差異性做探討。並與傳統的探空資料做比較。由於傳統探空氣球在觀測上, 時間的解析度較差, 且資料筆數較少、較不連續, 對於天氣上短暫的變化也較無法完全掌握。故本篇利用 WVR 及 GPS 觀測的技術估算可降水量, 希望建立一個連續的觀測系統, 用來進而改進天氣預報及分析。

參考文獻

- Westwater, E. R, J. B. Snider, and M. J. Falls, 1990: Ground-based radiometric observations of atmospheric emission and attenuation at 20.6, 31.65, and 90 GHz: A comparison of measurement and theory. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **38**, 1569-1580.
- Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, 1992: GPS meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Position System.. *J. Geophys. Res.*, **97**, 15784-15801.

- Bevis, M., S. Businger, S. Chiswell, T.A. Herring, R. A. Anthes, C. Rocken, and R. H. Ware, 1994: GPS meteorology: Mapping Zenith Wet Delay onto Precipitable Water. *J. Appl. Meteor.*, **33**, 379-386.
- Duan, J. P., M. Bevis, P. Fang, Y. Bock, S. Chiswell, S. Businger, C. Rocken, F. Solheim, T. Vanhove, R. Ware, S. McClusky, T. A. Herring, R. W. King, 1996: GPS Meteorology: Direct Estimation of the Absolute Value of Precipitable Water. *J. Appl. Meteor.*, **35**, 830-838.
- Beutler, G., I. Bauersima, W. Gurtner, M. Rothacher, T. Schildknecht, G. Mader, D. Abell, 1987: Evaluation of the 1984 Alaska GPS Res., Campaign with the Bernese GPS Software. *J. Geophys. Res.*, **92**, 1 295-1 304.
- Beutler, G., P. Morgan, and R. E. Neilan, 1993: Geodynamics: Tracking Satellites to Monitor Global Change. *GPS World*, **4**, 40-46.
- Beutler, G., E. Brockman, S. Frankhauser, W Gurtner, J. Johnson, L. Mervart, M. Rothacher, S. Schaer, T. Springer, and R. Weber, 1996: *Bernese GPS Software Version 4.0*. Univ. of Berne.
- Brunner, F.K., and M. Gu, 1991: An Improved Model for Dual Frequency Ionospheric Correction of GPS Observation, *Manuscripta Geodaetica*, **16(3)**, pp.205-214.
- Goad, C.C., and L. Goodman, 1974: A Modified Hopfield Tropospheric Annual Refraction Correction Model in Processing of the Full Meeting of the America Geophysical Union, San Francisco, California, December 12-17.
- Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, and J. Collins, 1997: *Global Positioning System Theory and Practice*, Springer-Verlag, Wien.
- Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, and J. Collins, 1993: *Global Positioning System: Theory and Practice*. Springer-Verlag, pp. 326.
- 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.
- Liebe, H. J., 1987 : A Contribution to Modeling Atmospheric Millimeter- Wave Properties, *Frequenz*, **41**, 31-36.
- Rosenkranz, P. W., and M. J. Komichak, and D. H. Staelin, 1982: A Method for Estimation of Atmospheric Water Vapor Profiles by Microwave Radiometry. *J. Appl. Meteor.*, **21**, 1 364-1 370.
- Janssen, M. A., 1993: *Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry*. (ed) John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 572.
- Liou, Y.-A., C.-Y. Huang, and Y.-T. Teng, 2000a: Precipitable Water Observed by Ground-Based GPS Receivers and Microwave Radiometry. *Earth, Planets, and Space*. (in press)
- Liou, Y.-A., Y.-T. Teng, Teresa Van Hove, and James Liljegren, 2000b: Comparison of precipitable water observations in the near tropics by GPS, microwave radiometer, and radiosondes. *J. Appl. Meteor.* (in press)
- Liou, Y.-A., and C.-Y. Huang, 2000: GPS Observation of PW during the Passage of a Typhoon, *Earth, Planets, and Space*. (in press).
- 劉說安、張銓倫，2000：地面雙頻微波輻射偵測大氣中水氣含量及溫度剖面，*大氣科學*。
- 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*。
- 劉說安、楊名，1999：GPS 估計可降水量：WVR 約束法，*大氣科學*。

