

GPS 估計可降水量：WVR 約束法

劉說安¹ 楊 名²

¹ 國立中央大學太空及遙測研究中心暨太空科學研究所

² 國立成功大學測量工程學系

(中華民國八十八年元月五日收稿；中華民國八十八年二月二十六日定稿)

摘 要

本文應用中央氣象局(Central Weather Bureau; CWB)台北及花蓮氣象站，從民國 87 年 3 月 18 日至 25 日所蒐集的全球定位系統(Global Positioning System; GPS)、氣球探空、雙頻水氣輻射計(Water Vapor Radiometer; WVR)和地面逐時氣象觀測資料，以 WVR 觀測約束 GPS 觀測，估計可降水量。在僅有台北站設有一套 WVR 的情況下，GPS 估計可降水量主要步驟有四：1. 應用科學軟體 Bernese 4.0 處理 GPS 資料，求解台北和花蓮兩個氣象站大氣相對濕遲延量；2. 使用 WVR 觀測估計台北站絕對濕遲延量；3. 比較台北站 GPS 和 WVR 濕遲延量，來計算 GPS 濕遲延補償量；4. 以補償花蓮氣象站 GPS 濕遲延量，來估計絕對濕遲延量，並且由此求出可降水量。結果顯示，GPS 計算出的花蓮站濕遲延量、可降水量的平均值(標準差)分別為 22.7(3.30)、3.72(0.55)cm，對應的氣球探空觀測分別為 24.9(2.99)、4.04(0.50)cm。由於兩種異質觀測的時、空解析度截然不同，GPS 較氣球探空觀測低估濕遲延量、可降水量分別為 2.16、0.32cm。

關鍵詞：可降水量、濕遲延量、GPS 氣象

一、前 言

全球定位系統(Global Positioning System; GPS)是一組衛星群，飛行在兩萬一千公里的高空中，均勻地分佈在六個軌道上，每一個衛星皆以雙 L-band 載波頻率 1227.6、1575.42 MHz 訊號，一天二十四小時不斷地廣播到全球每一角落。地面上的 GPS 接收站，幾乎在任一時間可以接收來自五個以上衛星的訊號。訊號在傳播過程中，受到中性大氣層影響而遲延(電磁波在大氣層的傳遞速度較真空為慢)，而且電磁波傳遞是呈弧線而非直線。這種遲延與對流層折

射率隨高程變化有關，而水氣含量是決定折射率的重要因素之一，所以藉由電磁波傳遞遲延量可以估計可降水量(Bevis et al. 1992, 1994; Rocken et al. 1993; Duan et al. 1996)。GPS 訊號也會受到電離層影響，但該影響為頻率的函數，現在已可應用雙 L-band 載波觀測做準確的訂正，故下面不再提及此事。

基於GPS估計大氣參數技術日趨成熟，該技術對於改善環流模式預報能力確實具有潛力(Kuo et al. 1997, 1998)，因而促成了中美兩國攜手合作，共同規劃我們國家「中華衛星三號」太

空計畫，其任務為太空及大氣觀測，目前預定在民國九十一年以前，連續發射八顆載有GPS接收器的小型低軌道衛星，即為所謂GPS氣象(GPS/Meteorology; GPS/MET)衛星。然而，欲達前述任務，GPS/MET數據推算大氣參數的驗證工作實為重要。目前GPS掩星觀測水氣剖面技術，仍以氣球探空法驗證為主(Rocken et al. 1997)。但是氣球探空法觀測的時間為三、四十分鐘數量級，異於GPS掩星觀測法的微秒時間數量級，加上前者水平空間解析度代表單點大氣資訊，大異於後者所代表的二、三百公里解析度。因此，氣球探空驗證法只可作為參考，驗證法並非完正確。相對於氣球探空法，水氣輻射計法同樣也是建立在電磁(微)波傳遞原理，在觀測時間數量級方面與GPS掩星觀測法相似，本可多加利用，但是本研究利用雙頻水氣微波輻射計(Water Vapor Radiometer; WVR)，其垂直空間解析度不足，必須仰賴多頻道觀測方法，故不適應用(Liou and Solheim 1998 ; Solheim et al. 1998)。

我們擬研發並驗證 GPS/MET 掩星觀測水氣剖面技術，步驟為循序漸進地從開發地面觀測水氣總含量模式做起，繼而發展掩星觀測水氣剖面技術。目前已藉由 Wu and Lin (1995, 1996)開發的軟體 ManGo，處理在中壢地區蒐集的短基線 GPS 雙頻載波相位觀測量，計算天頂對流層路徑遲延，再加上地面氣象觀測估計可降水量(Liou and Lin 1998)。由於當時缺乏驗證資料，因此民國八十七年三月中起，在中央氣象局台北氣象站進行為期三個多月的地面雙頻 WVR 觀測實驗。並且已應用科學研發軟體 Bernese 4.0 處理民國 87 年 3 月 18 日到 25 日間，在台北、花蓮兩氣象站蒐集的 GPS 觀測資料，以花蓮站氣球探空觀測當約束條件，加上地面逐時氣象觀測資料，估計台北站的可降

水量，並和氣球探空與 WVR 觀測作比較(Liou and Teng 1999)。由於台北和花蓮兩個氣象站基線長較短，僅約為 114 公里，兩個氣象站的 GPS 觀測為高相關，估得的路徑遲延量為相對量，必須仰賴其他氣象觀測器材，提供獨立的觀測當約束條件(Rocken et al. 1995)。

鑑於氣球探空觀測一般一天僅為兩次，對於一天內觀測頻率可高於上萬次的 GPS 觀測法而言，在開發技術層面上，未能善加利用高頻率的 GPS 觀測資料，降低提供即時氣象預報的時效性，未盡理想。因此，在本文中，我們進一步使用觀測頻率較高、且同植根於電磁波傳遞原理的輻射計觀測當約束條件，探討 GPS 觀測估計可降水量的技術。

二、GPS 估算可降水量原理

GPS 廣播雙 L-band 載波訊號，隨著傳遞路徑上折射率變化而彎曲減緩，整體效應造成的影響，即為所謂過度路徑遲延(excess path delay)(Hecht 1987)

$$\Delta L = \int_A^B n(\underline{r}, f) ds - G \quad (1)$$

其中 A 與 B 分別為射線傳送的起訖點， $n(\underline{r}, f)$ 為介質的折射率， \underline{r} 為位置向量， f 為頻率， G 為 A 到 B 的幾何路徑長。過度路徑遲延俗稱為遲延，通常被描述為大氣折射係數(N)的函數，而 $N = 10^6(n - 1)$ 則是溫度、壓力與水汽壓的函數。處理方式一般分成兩步驟：1. 將遲延分成乾與濕兩部份，2. 轉換濕遲延為可降水量。細節已於 Liou and Teng 1999) 詳述，茲不贅述，唯考量區域特性影響步驟 2. 的轉換，相關處必須陳述。

利用 GPS 可估計因水汽造成的天頂遲延

量(Zenith Wet Delay; ZWD)，該量與可降水量(Precipitable Water; PW)間關係為(Bevis et al. 1994, 1995)

$$PW = \Pi \times ZWD \quad (2)$$

其中 $\Pi = 10^6 / \{ \rho R_v [(k_3 / T_m) + k_2'] \}$ ， ρ 為水的密度， kg/m^3 ， R_v 為水汽的比氣體常數， J/kg-K ， k_2' 為 22.1 ± 2.2 ， K/mb ， k_3 為 $(3.739 \pm 0.012) \times 10^5$ ， K^2/mb ， T_m 為大氣的加權平均溫度， K (以氣球探空觀測之溫、濕、壓剖面外插至 0.1 mb (劉 1999))：

$$T_m = \frac{\int (P_v / T) dz}{\int (P_v / T^2) dz} \quad (3)$$

其中 P_v 為水汽分壓， mb ， T 為溫度， K 。一般而言， Π 約為 0.15 ，但該量由於季節、位置與天候的不同，存在著 20% 的變異性(Bevis et al. 1994)。根據民國 84 年 7 月至 86 年 6 月間花蓮站氣球探空觀測的 PW 與 ZWD 展示於圖 1，兩者同樣呈現規律的週期性變化，且相關性高，相關係數為 99.9% 。其中前者變化範圍約由冬季的 $2\text{-}4\text{cm}$ 到夏季的 $6\text{-}8\text{cm}$ ，符合台灣地區季節性天氣的變化特性。至於 Π ，PW 與 ZWD 比值，則展示於圖 2，同時繪出對應的地表溫度。很顯然地， Π 與地表溫度是高相關的，兩者間相關係數為 92.6% 。參數 Π 的平均值為 0.161 ，標準差為 0.00223 ，分佈的範圍在 0.153 到 0.167 之間。

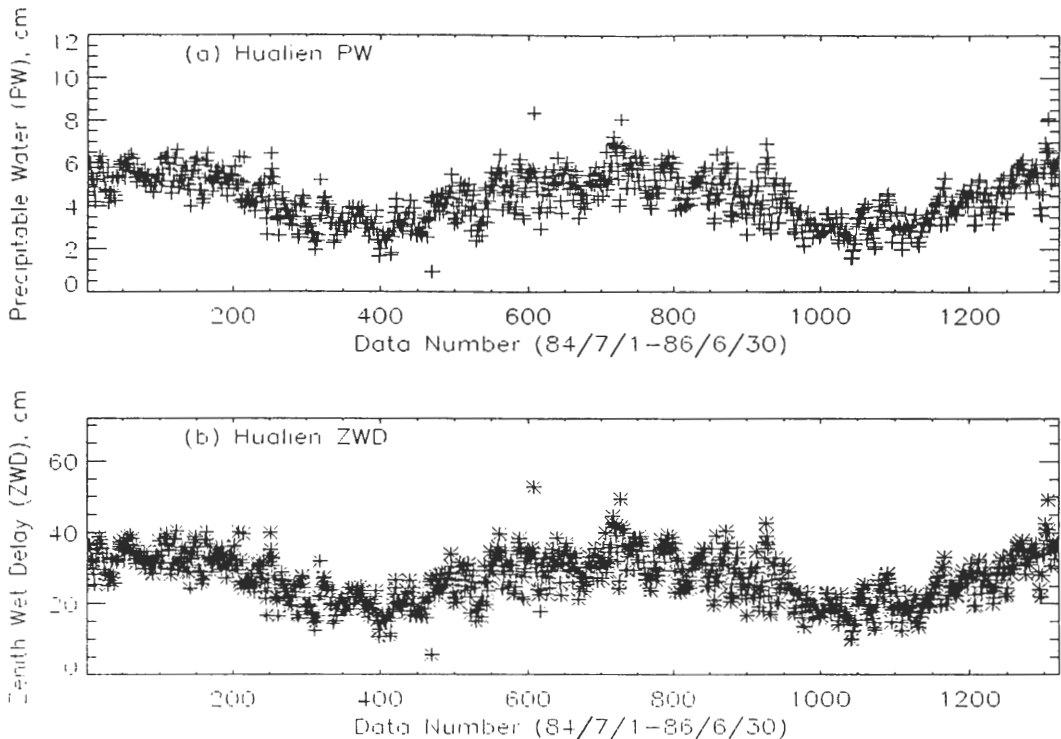


圖 1 民國 84 年 7 月至 86 年 6 月間，共兩年花蓮站氣球探空觀測之 PW 及 ZWD。

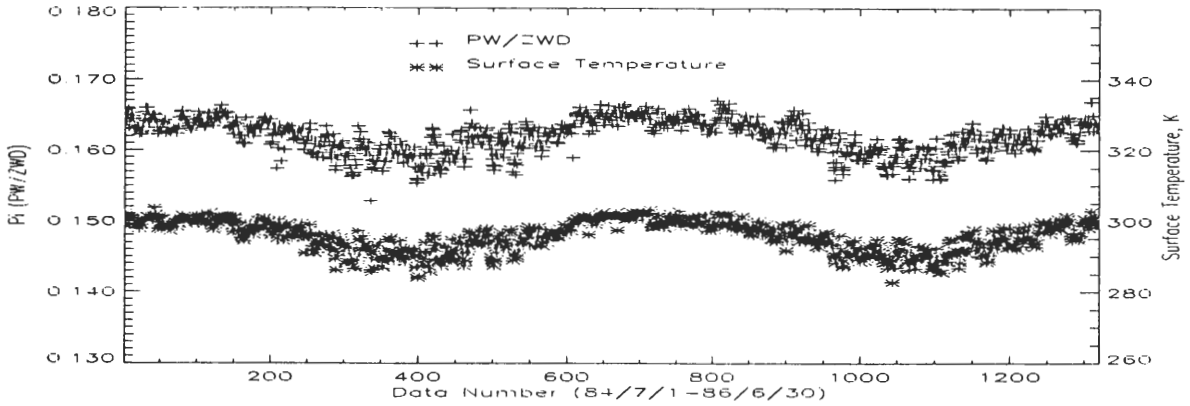


圖 2 民國 84 年 7 月至 86 年 6 月間，花蓮站氣球探空觀測之 Π (=PW/ZWD)，以及對應的地表溫度。

式(2)顯示， Π 為 T_m 的函數，然而 T_m 必須經由剖面積分處理求得，非常不方便。Bevis et al. (1992)因而建議使用地表溫度(T_s)來估計 T_m ，所以吾人利用氣球探空資料建立 Π 與 T_s 的關係。我們過去以民國 77 年到 86 年三月間，在台北氣象站的氣球探空資料，推導該區 T_m - T_s 關係，得到 $T_m=1.09T_s-38.4$ (Liou and Teng 1999)。唯在花蓮站蒐集氣球探空資料的歷史尚短，三月間資料更是相對的少，因此，本研究中利用民國 84 年 7 月至 86 年 6 月間，對花蓮站兩年的氣球探空資

料進行分析，總共有 1372 組資料，以最小二乘法迴歸求解加權平均溫度與地表溫度的關係，如下：

$$T_m = 0.897T_s + 18.839 \quad (4)$$

圖 3 為民國 84 年 7 月至 86 年 6 月間，花蓮站加權平均溫度和地表溫度的關係，顯示 T_m 與 T_s 的相關性很高，兩者間相關係數約為 92.6%，因此採用一次式描述兩者的關係尚為合理。吾人比較以 T_s 經式(4)估計的 T_m 與對應的氣球探空觀測，發現均方根差為 1.57 K。關係式(4)與台北

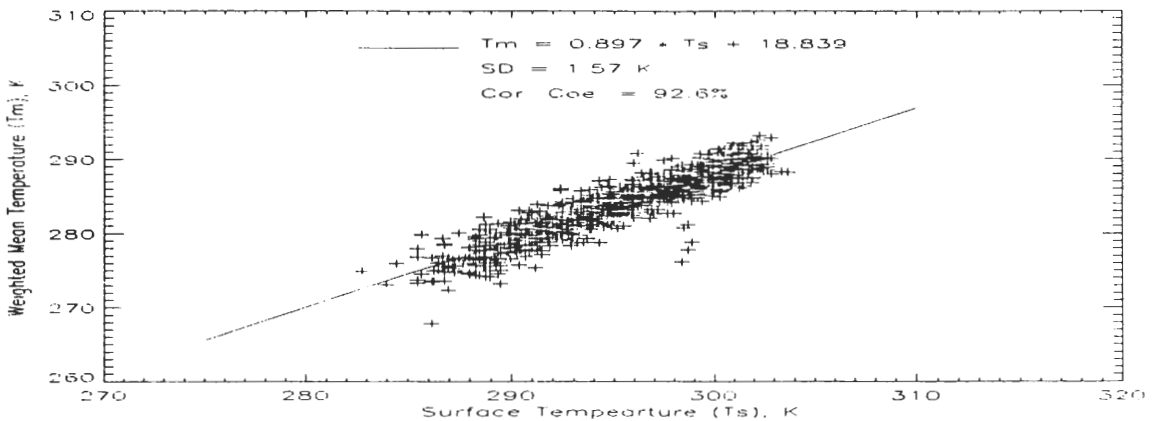


圖 3 民國 84 年 7 月至 86 年 6 月間，花蓮站加權平均溫度和地表溫度的關係。

氣象站的 $T_m=1.09T_s-38.4$ (Liou and Teng 1999) 和 Bevis et al. (1992)的 $T_m=0.72T_s+70.2$ 差異頗大，反應了區域性的差別。利用式(2)與式(4)，即可由地表溫度估得 Π ，以 $\hat{\Pi}$ 表示。將 $\hat{\Pi}$ 與氣球探空觀測的 Π 進行比較，發現兩者間的較差平均值為 0.00245 及標準差為 0.00088。也就是說，

若視氣球探空觀測的 Π 為參考值，則以 T_s 推得的 $\hat{\Pi}$ 有 $0.00088/0.162=0.55\%$ 的精度。由於 $\hat{\Pi}$ 及 Π 間呈現相當一致的正偏倚，吾人以兩者間的較差平均值 0.00245 對 $\hat{\Pi}$ 平移，如圖 4 所示為平移後的 $\hat{\Pi}-\Pi$ 和兩年氣球探空觀測資料筆數的關係，相對的精度依舊。

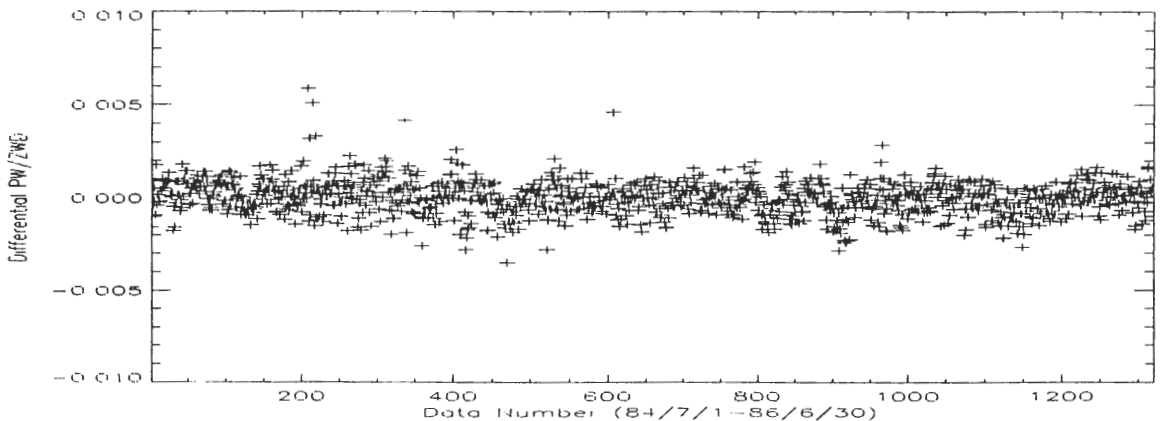


圖 4 民國 84 年 7 月至 86 年 6 月間，平移後的 $\hat{\Pi}-\Pi$ 。

三、WVR 約束 GPS 估計濕遲延與求解可降水量

本研究中，GPS 估計可降水量主要步驟有四：1. 應用科學軟體 Bernese 4.0 處理 GPS 資料，求解台北及花蓮兩氣象站大氣相對濕遲延量；2. 使用 WVR 觀測估計台北站絕對濕遲延量；3. 比較台北站 GPS、WVR 濕遲延量，來計算 GPS 濕遲延補償量；4. 補償花蓮站 GPS 濕遲延量，來計算絕對濕遲延量，並且由此求出可降水量。WVR 性能介紹，如精準度、頻道資訊，請參見劉(1999)。

圖 5 展示民國 87 年 3 月 18 日到 25 日間，在台北及花蓮兩氣象站，(a)以 Bernese 4.0 軟體

處理 GPS 資料估得台北站大氣的相對濕遲延量、以氣球探空及 WVR 觀測的絕對濕遲延量，(b) 由 GPS 資料估計得到的花蓮站相對於台北站的遲延量。其中 Bernese 4.0 軟體處理 GPS 資料直接算出大氣總遲延量，再以之扣除地面氣象資料得出的乾遲延量，便求出相對濕遲延量。由圖(a)可知：1. 在所探討為期一週的實驗期間，氣球探空及 WVR 觀測的濕遲延量，趨勢相當一致，變化範圍主要落在 20 到 30cm 間；2. 氣球探空觀測頻率顯然低於 WVR；3. 以 GPS 估得的濕遲延量分佈範圍非常大，偏離氣球探空與 WVR 觀測。因此，GPS 估得濕遲延量必須受到約束。此外，WVR 比氣球探空觀測法提供更高頻率的觀測，在開發技術層面上更為有利。由圖(b)可

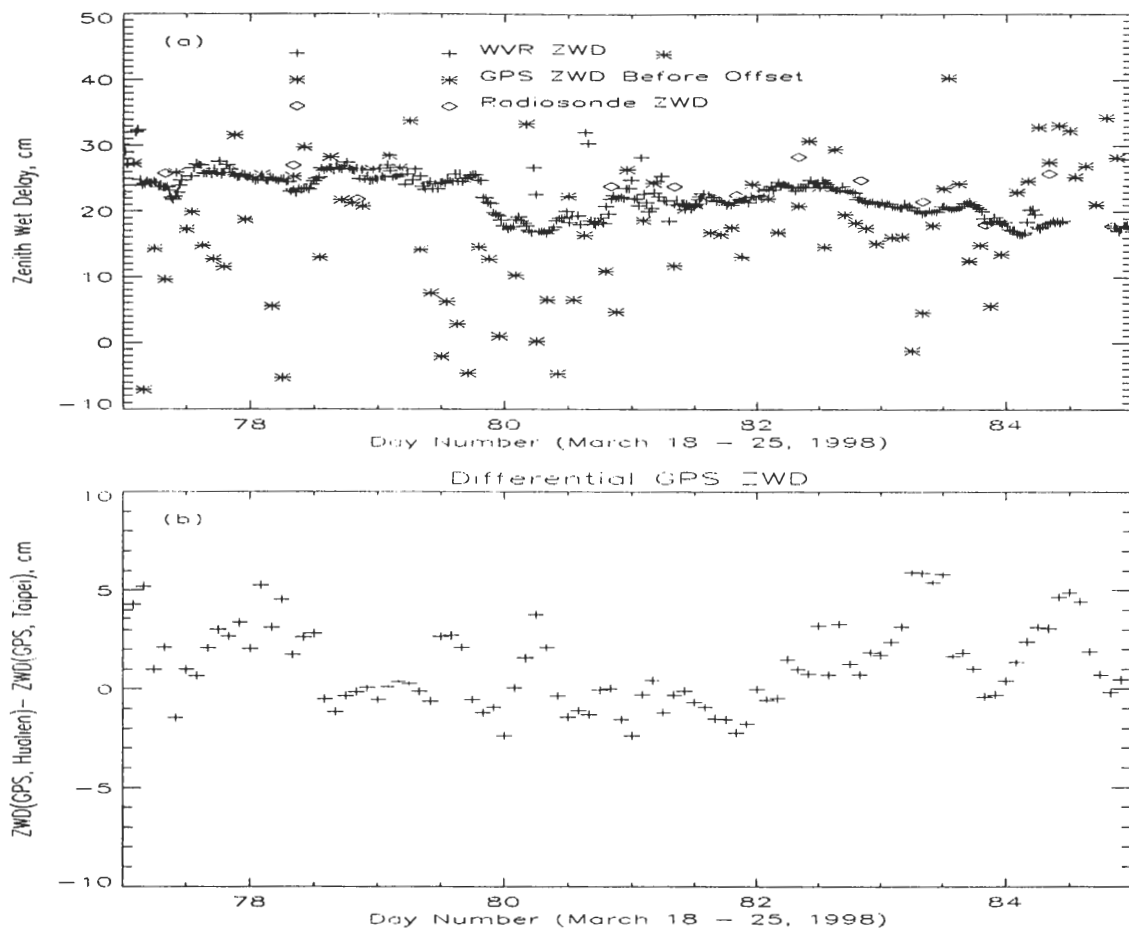


圖 5 民國 87 年 3 月 18 日到 25 日間，在台北及花蓮兩氣象站 (a) 以 Bernese 4.0 軟體處理 GPS 資料估得台北站大氣的相對濕遲延量、以氣球探空及 WVR 觀測求得的絕對濕遲延量，(b) 由 GPS 資料估計得到的花蓮站相對於台北站的遲延量。

知：花蓮與台北兩氣象站濕遲延量差異分佈在 6 到 -3cm 間（差異量和時間的關係並無明顯相依性），這表示一週的實驗期間，花蓮比台北氣象站稍為潮濕，兩氣象站 PW 差異值在 1cm 內。

爲了計算花蓮氣象站絕對濕遲延量，並求解可降水量，本研究假設台北與花蓮兩站 GPS 估計遲延量時的補償量相同，如此一來，即可以用台北站估得的補償量，加上花蓮站 GPS 估得的相對濕遲延量，推算花蓮站絕對的濕遲延量，

然後利用式(2)，即可推算可降水量。圖 6 爲民國 87 年 3 月 18 日到 25 日間，在花蓮站 GPS 與氣球探空觀測求出的(a)濕遲延、(b)可降水量的圖表，就整體而言，它顯示兩者趨勢相當一致。由表一和表二得知兩者間觀測量，其差異平均值/標準差(百分比)，對於濕遲延量、可降水量，分別爲-2.16/3.46(13.9%)、-0.32/0.58(14.3%) cm。這是由於兩者異質觀測的時、空解析度截然不同，GPS 較氣球探空觀測低估濕遲延量及可降水量。

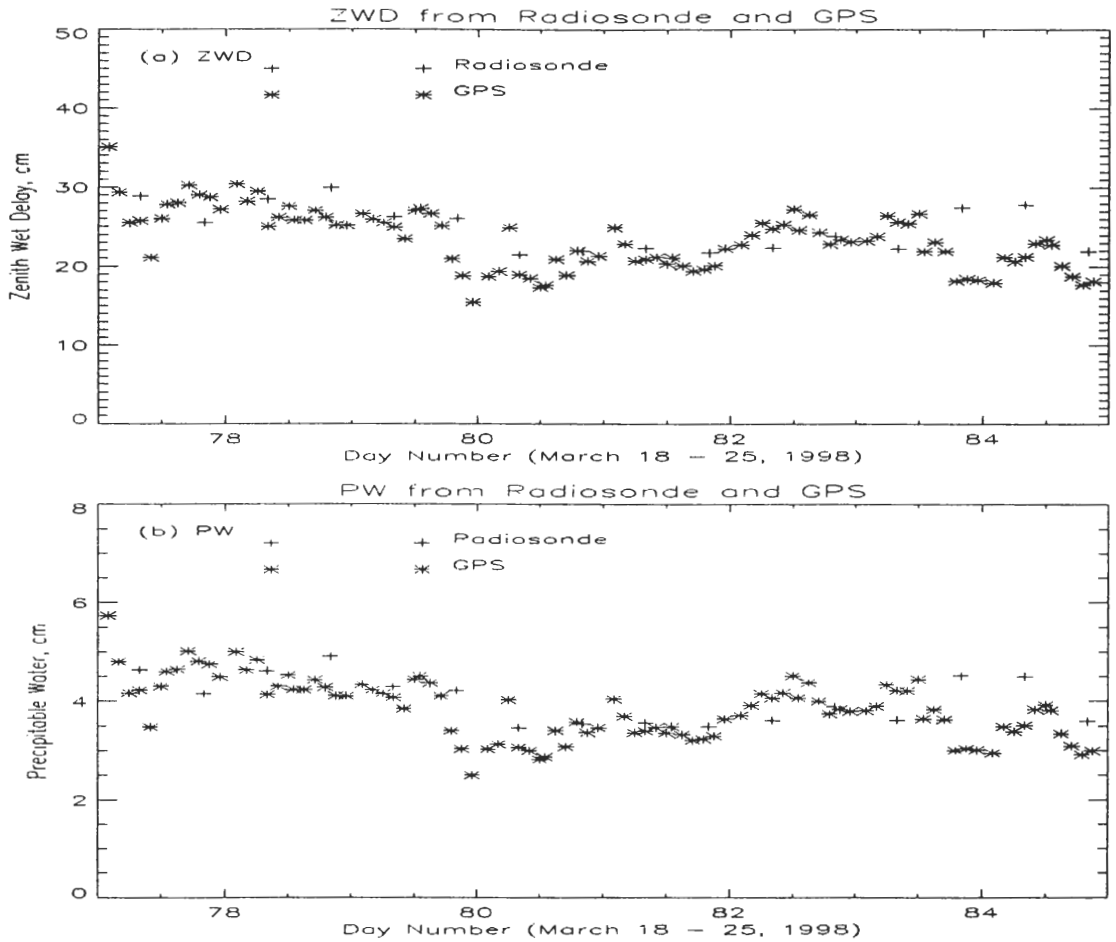


圖 6 民國 87 年 3 月 18 日到 25 日間，在花蓮站 GPS 及氣球探空觀測的(a)濕遲延及(b)可降水量。

表一 花蓮氣象站氣球探空及以 WVR 約束 GPS 觀測的濕遲延，以及兩者間差異。

| | 平均, cm | 標準差(百分比),cm |
|----------|--------|-------------|
| GPS | 22.7 | 3.30(14.5%) |
| 氣球探空 | 24.9 | 2.99(12.0%) |
| GPS-氣球探空 | -2.16 | 3.46(13.9%) |

表二 花蓮氣象站氣球探空及以 WVR 約束 GPS 觀測的可降水量，以及兩者間差異。

| | 平均, cm | 標準差(百分比), cm |
|----------|--------|--------------|
| GPS | 3.72 | 0.55(14.7%) |
| 氣球探空 | 4.04 | 0.50(12.3%) |
| GPS-氣球探空 | -0.32 | 0.58(14.3%) |

四、結論與建議

本研究建立花蓮氣象站加權平均溫度與地表溫度間的關係式，以及濕遲延量與可降水量間的關係式，該關係式有 0.55% 的精度；並應用科學軟體 Bernese 4.0 處理 GPS 資料，以 WVR 觀測當約束條件，加上地面逐時氣象觀測之資料，來估計絕對濕遲延量、計算出可降水量，最後以氣球探空觀測驗證，結果顯示：GPS 觀測的濕遲延量與可降水量相當合理。由於 WVR、GPS 和氣球探空觀測時、空解析度的異質特性，GPS 法與氣球探空觀測法，稍微低估濕遲延量及可降水量，差異量(標準差)分別為 2.16(3.46)及 0.32(0.58) cm。

然而，我們過去以氣球探空觀測約束 GPS 觀測法，並以 WVR 觀測驗證，發現在估計濕遲延量與可降水量時，GPS 法較 WVR 法稍微高估二者，差異量(標準差)分別為 1.80(2.99)及 0.44(0.47) cm (Liou and Teng 1999)。比較本研究結果，隱含著異質觀測間，存在著差異傳遞的可能性。本文以「差異」而不用「誤差」一詞，係因我們認為異質觀測值，可互為參考(雖然不能當作完全絕對之參考，然其方法完全合理)。既然異質間差異傳遞會導致不同的濕遲延量與可降水量，那麼未來在開發 GPS 相關觀測技術時，約束條件法與觀測法必須屬同質。就我們目前所知而言，WVR 比氣球探空觀測法提供更高的觀測頻率，且與 GPS 同植根於射線傳遞原理，因此，建議在地面觀測兩端同時架設 WVR，對於發展 GPS 觀測可降水量技術將更為有利。

致 謝

本研究在太空計畫室建教合作計畫

NSC87-NSPO(A)-PC-FA07-05 及太空及遙測研究中心支持下完成 WVR 觀測大氣水氣含量實驗，在國科會 NSC87-2621-P-008-016 及太空及遙測研究中心支持下完成 GPS 觀測資料處理，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，太空及遙測研究中心吳究教授技術指導。最後作者感謝審查委員提供寶貴建議，使本報告更為完整通暢。

參考文獻

- 劉說安, 1999: 地面微波輻射偵測大氣中可降水量之動態, *大氣科學*, **27**, 141-158。
- 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 positioning system. *J. Geophys. Res.*, **97**, 15,787—15,801.
- _____, _____, S. Chiswell, T. A. Herring, R. A. Anthes, C. Rocken, and R. H. Ware, 1994: GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *J. Appl. Meteor.*, **33**, 379—386.
- _____, T. van Hove, J. Johnson, F. Solheim, and R. H. Ware, 1995: GPS/STORM---GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology. *J. Atmos. Oceanic Techno.*, **12**, 468—478.
- Duan, J., M. Bevis, P. Fang, Y. Bock, S. Chiswell, S. Businger, C. Rocken, F. Solheim, T. van Hove, R. Ware, S. McClusky, T. A. Herring, and R. W. King, 1996: GPS Meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water. *J. Appl. Meteor.*, **35**, 830—838.
- Hecht, E., 1987: *Optics*. 2nd ed., Addison-Wesley Publishing Company.
- Kuo, Y.-H., X. Zou, and W. Huang, 1997: The impact of Global Positioning System data on

- the prediction of an extratropical cyclone: an observing system simulation experiment. *Dyn. Atmos. Oceans*, **27**, 439—470.
- _____, X. Zou, S.-J. Chen, W. Huang, Y.-R. Guo, R. A. Anthes, M. Exner, D. Hunt, C. Rocken, and S. Sokolovskiy, 1998: A GPS/MET sounding through an intense upper-level front. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **79**, 617—626.
- Liou, Y.-A., and S.-G. Lin, 1998 : Ground-based GPS sensing of atmospheric integrated water vapor. *Weather Analysis and Forecasting Workshop*, Taipei, Feb. 23-25.
- _____, and F. S. Solheim, 1998 : Verification of water vapor profile retrieved from GPS/MET. *US-Taiwan Bilateral Workshop on COSMIC*, Taipei, Feb. 26-28.
- _____, and M. Teng, 1999 : Precipitable water observed by ground-based GPS receivers. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. (submitted)
- Rocken, C., R. Ware, T. van Hove, F. Solheim, C. Alber, J. Johnson, M. Bevis, and S. Businger, 1993: Sensing atmospheric water vapor with the Global Positioning System. *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 2,631—2,634.
- _____, C., R. Anthes, M. Exner, D. Hunt, S. Sokolovskiy, R. Ware, M. Gorbunov, W. Schreiner, D. Feng, B. Herman, Y.-H. Kuo, and X. Zou, 1997: Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **102**, 29,849—29,866.
- 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.
- Wu, J. and S. G. Lin, 1995: Height accuracy of one and a half centimeters by GPS rapid static surveying. *Int. J. Remote Sensing*, **16**, 2,863—2,874.
- _____, and _____, 1996: Leveling by GPS relative positioning with carrier phases. *J. Surveying Engineering*, **122**, 145—157.

Precipitable Water from GPS : A WVR Constraint Approach

Yuei-An Liou¹ Ming Yang²

**¹Center for Space and Remote Sensing Research, and Institute of Space Science,
National Central University**

²Department of Surveying Engineering, National Cheng-Kung University

(Manuscript received 5 January 1999 , in final form 26 February 1999)

ABSTRACT

This paper presents observations of Precipitable Water (PW) from Global Positioning System (GPS). GPS, radiosonde, Water Vapor Radiometer (WVR), and hourly surface meteorological observations collected at Central Weather Bureau's (CWB) Taipei and Hualien weather stations from March 18 to 25, 1998, were utilized. The only WVR was installed at the Taipei site. Four major procedures are proceeded to derive PW from GPS data. First, Bernese GPS software version 4.0 was used to estimate relative wet delay over the Taipei and Hualien sites. Second, absolute wet delay was determined from WVR at the Taipei site. Third, offset in wet delay was computed by subtracting GPS- from WVR-observed wet delay at the Taipei site. Fourth, wet delay derived from GPS data at the Hualien site was compensated by the offset to determine absolute wet delay, and PW given surface meteorology. It is found that the averages (standard deviations) of GPS-derived wet delay and PW are 22.7(3.30) and 3.72(0.55) cm, respectively. The corresponding observations from radiosondes are 24.9(2.99) and 4.04(0.50) cm, respectively. Since the two kinds of instruments are distinctive in terms of their measuring characteristics in time- and spatial-resolutions, GPS observations underestimate wet delay and PW by 2.16 and 0.32 cm, respectively.

Key words: Precipitable water (PW), Wet delay, GPS/Meteorology(GPS/MET)