

地面雙頻微波輻射計觀測濕遲延之空間變化

劉說安¹

摘 要

本研究應用水汽微波輻射儀 (Water Vapor Radiometer; WVR) 觀測大氣水汽對全球定位系統 (Global Positioning System; GPS) 訊號延遲之影響，該影響量即所謂濕遲延 (Wet Delay, WD)。首先，使用了民國七十七年到八十六年三月間在台北氣象站氣球探空觀測資料做分析，推導亮溫 (brightness temperature) 及光程估算濕遲延之迴歸公式。其次，於民國八十七年三月十八日到二十五日間在台北氣象站進行實驗，蒐集 23.8 及 31.4GHz 兩頻率的亮溫觀測，觀測時水平角設定在東西及南北走向兩方向轉換，仰角則設定在 15° 及 165° 間，每 15° 做一次觀測。最後，分析 WVR 觀測資料，在天頂方向時，濕遲延變化範圍約介於晴天的 14.8cm 到陰雨天的 40.8cm 間。此外，成層化大氣之假設，隨著仰角偏離天頂方向而逐漸失真，在仰角 165° 時誤差可達 8.3cm。

關鍵詞：濕遲延，亮溫，光程。

1. 前 言

全球定位系統 (Global Positioning System; GPS) 的發展，源自於美國國防部軍事定時、定位、與導航用途之需求，原理係求解 GPS 所廣播電磁波傳遞的時間或距離。基於在高精度定位時 GPS 明顯優於傳統方法，加上求解法與科技日新月異，其應用面已迅速拓展開來，從定位精度需求較低的汽車導航、污染追蹤、與災區辨識等到需求較高的潮汐變化、地殼變形、與地層下陷監控等，乃至國家一等衛星控制點之決定。顯而易見，對流層路徑遲延影響 (陳、等，1996；郭、等，1998)、天線相位中心考量 (Schupler and Clark, 1991)、以及電波多路徑效應 (Braasch, 1994) 等之修正，在精度需求較高時，將相對地提高。

¹ 國立中央大學太空及遙測研究中心暨太空研究所副教授

在本文中，我們延伸過去以水汽微波輻射儀 (Water Vapor Radiometer; WVR) 觀測可降水的研究 (劉說安, 1999)，更進一步應用 WVR 觀測估計可降水對 GPS 廣播電磁波傳遞之影響，最終目的在於提昇 GPS 定位之精度，進而增進 GPS 定位功能在多方面應用之可信度，尤其是對於高精度定位需求之課題，例如可降水之估算 (Rocken, *et al.*, 1993; Duan, *et al.*, 1996; Liou and Lin, 1998)、與地殼變形之監控 (Dixon, 1991) 等。

2. 電磁波傳遞之過度路徑

GPS 廣播雙 L-band (1575.42MHz 及 1227.6MHz) 載波頻率，這兩種微波訊號在大氣傳遞的過程中，受到兩種機制影響而遲延，其一為電磁波傳遞速度較真空為慢，其二為電磁波傳遞是在一弧線上而非直線上。這兩種電磁波傳遞的遲延行為，主要是因介質的折射率沿著波路徑而改變，原理係遵循赫美 (Fermat) 法則，波傳遞的光程路徑 (Optical Path Length; OPL) 因而可表為 (Hecht, 1987)

$$\text{OPL} = \int_A^B n(\underline{r}, f) ds \quad (1)$$

其中，A、B 分別為波傳遞的起 (GPS 衛星)、訖 (GPS 接收器) 點， $n(\underline{r}, f)$ 為在位置向量 $\underline{r}$ 及頻率 f 時的介質折射率。OPL 相對於真空中波由 A 傳播到 B 幾何路徑 (G) 的增量，即為 GPS 訊號受到大氣影響的遲延量 ΔL

$$\begin{aligned} \Delta L &= \text{OPL} - G \\ &= \int_A^B n(\underline{r}, f) ds - G \end{aligned} \quad (2)$$

也就是

$$\Delta L = \int_L [n(\underline{r}, f) - 1] ds + [S - G] \quad (3)$$

其中， S 為延著彎曲波導路徑 L (A 到 B) 的幾何距離。式(3)右邊第一項源自射線速度減慢之效應，第二項則源自彎曲之效應。射線彎曲所導致遲延之值，在仰角 15° 時為 1cm 量級 (Bevis, *et al.*, 1992)，所以，一般在仰角 15° 以下時均忽略之。通常式(3)被寫成為大氣折射係數 (N) 的函數，即 $N = 10^6 (n - 1)$ 。 N 則是溫度、壓力及水汽壓的函數 (Smith and Weitraub, 1953)

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{P_v}{T^2} \quad (4)$$

其中， P 是總大氣壓，mb， T 是溫度，K，及 P_v 為水汽分壓，mb。式(4)準確度可達 0.5%

(Resch, 1984)。Thayer (1974) 提出一個較準確的折射係數公式

$$N = k_1 \frac{P_d}{T Z_d} + k_2 \frac{P_v}{T Z_v} + k_3 \frac{P_v}{T^2 Z_v} \quad (5)$$

其中， $k_1 = 77.604 \pm 0.014$ K/mb， $k_2 = 64.79 \pm 0.08$ mb⁻¹， $k_3 = (3.776 \pm 0.004) \times 10^5$ K²/mb， P_d 為乾空氣大氣分壓，mb，及 Z_d^{-1} 與 Z_v^{-1} 分別為乾與濕空氣反壓縮因子。式(5)的準確度可達 0.02% (Davis, *et al.*, 1985)。

一般而言，學界延用 Saastamoinen (1972) 建議，將大氣遲延量 ΔL 分成乾及濕延遲 (Wet Delay; WD) 兩個部份，其中，後者可表示為

$$\Delta L_w^o = WD = 10^{-6} \left[k'_2 \int \frac{P_v}{T} dz + k_3 \int \frac{P_v}{T^2} dz \right] \quad (6)$$

其中， $k'_2 = 17 \pm 10$ K/mb。顯然，去除乾延遲項後，可降水是主宰折射係數的最重要元素，因此，波傳遞的濕延遲，可由路徑上的可降水量萃取出來。

在另一方面，可降水量又主宰大氣微波輻射，所以，吾人可以運用 WVR 監控可降水量，更進一步則可推算 L-band 射線傳遞的濕延遲。此外，由於 WVR 具有即時與高時間解析特性，自然而然，微波輻射量測在發展 GPS 高精度定位需求技術時，扮演極為重要的角色 (Rocken, *et al.*, 1993; Alber, *et al.*, 1997; Haines and Bar-Sever, 1998)。

3. 輻射偵測濕遲延

地面 WVR 觀測大氣輻射之亮溫可寫為 (劉說安, 1999)

$$T_{bg} = T_{bc} e^{-\tau(0,\infty)} + \int_0^\infty \kappa_e(r) T_a(r) e^{-\tau(0,r)} dr \quad (7)$$

其中， T_{bc} 為宇宙背景亮溫 (2.7°) K， $\tau(r, r^1) \equiv \int_r^{r^1} \kappa_e(r'') dr''$ 為 r 到 r^1 的光程，neper (Np)， r 是位置 (距離)，m， κ_e 為消散係數 (extinction coefficient) (大氣水汽含量、溫度等參數的函數)，Np/m，以及 T_a 為大氣溫度，K。一般而言，大氣散射效應在較低微波波段較弱，可忽略不計，而以吸收係數 κ_a (absorption coefficient) 取代式(7)中之消散係數。

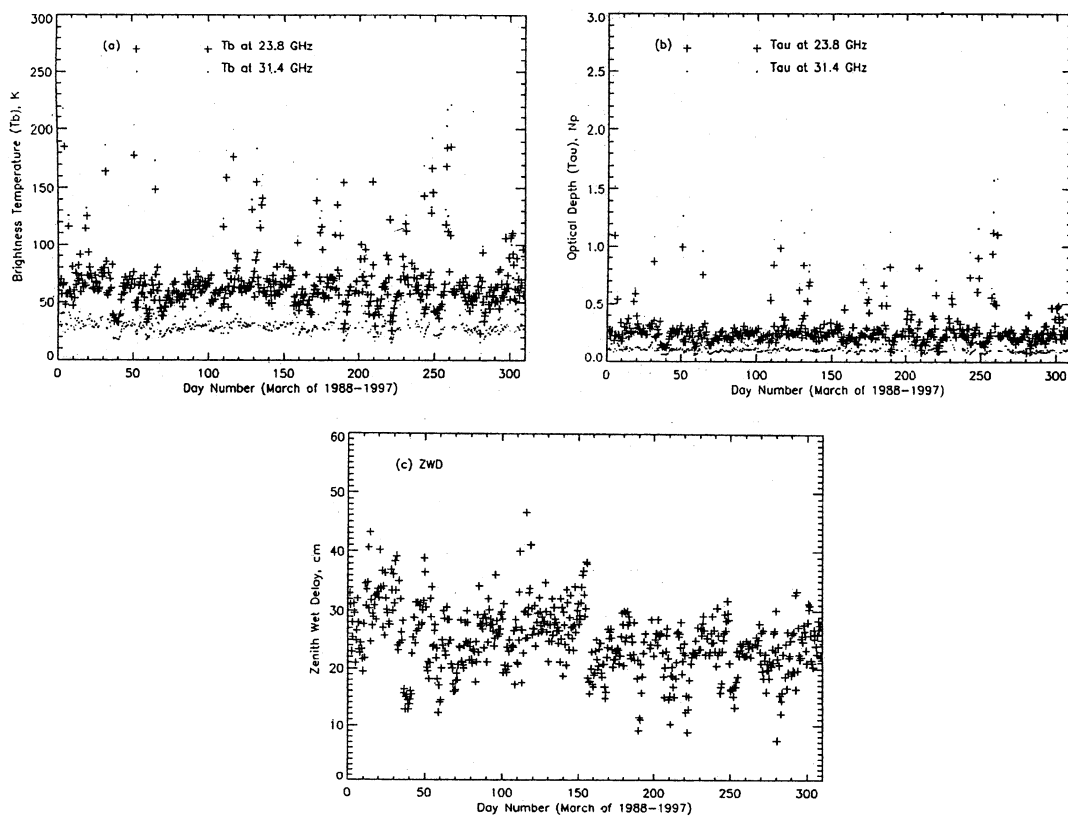
由於可降水量主宰大氣微波吸收係數，結合式(6)與式(7)可知，可降水對 GPS 廣播電磁波傳遞之影響，可由 WVR 雙頻亮溫觀測之線性迴歸估得，以式子表示時，濕遲延可表為

$$WD = C_{WD0} + C_{WD1} \times Tb_1 + C_{WD2} \times Tb_2 \quad (8)$$

其中， C_i 以亮溫為基準之迴歸係數，下標 i 代表 WD0，WD1 及 WD2， Tb_i 為觀測之亮

溫，K，下標 $i = 1$ 或2分別代表本研究所使用WVR之23.8及31.4GHz操作頻率。若在天頂方向，將式(8)中之WD以天頂濕遲延(Zenith Wet Delay; ZWD)取代即可。

推導亮溫估計WD之迴歸公式時，蒐集了民國七十七年到八十六年的氣球探空資料做分析，以NOAA Wave Propagation Laboratory發展的輻射傳送模式估計大氣輻射在23.8及31.4GHz的亮溫(Schroeder and Westwater, 1991)。該模式以氣球探空觀測之溫、濕、壓剖面外插至0.1mb，以可降水、雲水及氧氣為主要吸收成份。圖一所示即為根據民國七十七年到八十六年三月間的氣球探空資料測得大氣之23.8及31.4GHz (a) 亮溫及 (b) 光程，以及相對的 (c) ZWD。在這十年間，23.8及31.4GHz亮溫的平均值分別為65.7K及40.8K，相對的標準差(百分比)分別為23.5K(35.7%)及34.0K(83.5%)。



圖一 根據民國七十七年到八十六年三月間台北氣象站氣球探空資料測得大氣之23.8GHz及31.4GHz (a) 亮溫及 (b) 光程，以及相對的 (c) ZWD

茲特別說明，氣球探空資料並未提供雲水資訊，因此，一般作法是假設相對濕度在超過某一參考值時雲水即存在 (Han and Westwater, 1995; Solheim, *et al.* 1998; Snider and Hazen, 1998)。由於前述相對濕度之假設自由度較大，選定時需特別小心 (Westwater, 1978)。為了探討那一種相對濕度假設較適合台灣北部地區，在我們過去的初步研究顯示，98% 時較為合理 (劉說安，1999)，因此，在本文中依此延用，並僅就公式(8)在迴歸WD時之良窳進行評估，其餘不另贅述。

評估迴歸公式時，首先以氣球探空資料估得 23.8 及 31.4GHz 亮溫帶入式(8)，並將結果與式(6)直接求得之濕遲延做比較，發現均方根差小於 1.78cm (7.48%)，如表一。若以大氣的光程推導迴歸，則相對的均方根差降到 1.33cm (5.56%)。光程迴歸結果較亮溫迴歸結果較理想，所以，除非另述，本文自此以光程迴歸結果做分析。以光程迴歸 WD 時，只要以光程取代式(8)中之亮溫即可，如下

$$WD = \hat{C}_{WD0} + \hat{C}_{WD1} \times \tau_1 + \hat{C}_{WD2} \times \tau_2 \quad (9)$$

其中， $\hat{C}_i$ 以光程為基準之迴歸係數，下標 i 代表 WD0，WD1 及 WD2， τ_i 為觀測亮溫推得之光程，K，下標 $i = 1$ 或 2 分別代表 23.8 及 31.4GHz。光程與亮溫之關係為

$$Tb = T_{bc} \times e^{-\tau(\infty)} + [1 - \tau(\infty)] \times T_{mr} \quad (10)$$

其中， $\tau(\infty)$ 為大氣之總光程 (以下以 τ 表示)， T_{mr} 代表大氣的平均輻射溫度如下

$$T_{mr} = \frac{\int_0^\infty \kappa_a T_a e^{-\int_0^s \kappa_a dr} ds}{\int_0^\infty \kappa_a e^{-\int_0^s \kappa_a dr} ds} \quad (11)$$

表一為依據民國七十七年到八十六年三月間的氣球探空資料測得 ZWD 之平均值與標準差，以及以 23.8 及 31.4GHz 亮溫與光程分別迴歸所得 ZWD 與由式(6)直接求得 ZWD 之均方根差。括弧內 Tb 及 τ 分別代表以大氣亮溫與光程迴歸， Tb 迴歸係數為 WD0 = -3.46，WD1 = 0.66，WD2 = -0.39， τ 迴歸係數為 WD0 = -1.20，WD1 = 149.27，WD2 = -88.56。迴歸係數係以多線性迴歸法 (multiple linear regression fit) 求取。

表一 依據資料所測得之 ZWD 平均值與標準差，及大氣亮溫與光程迴歸之均方根差

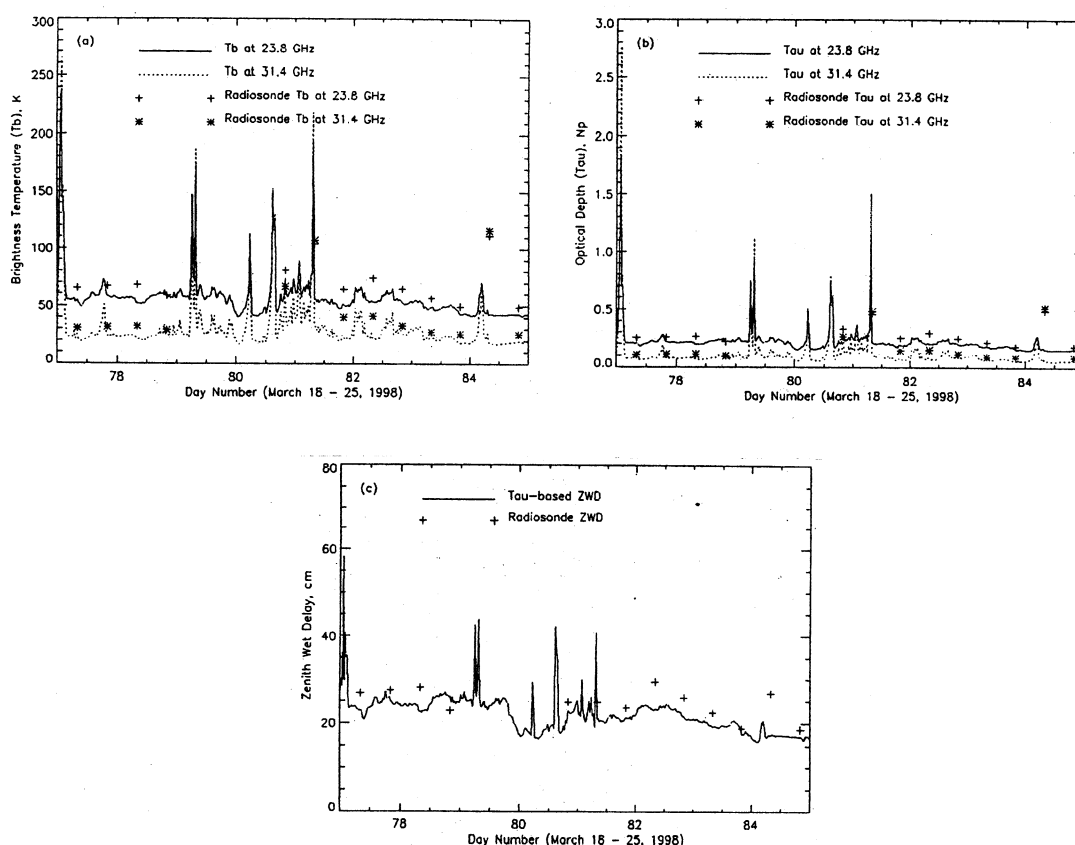
項目 參數	平均值	標準差 (百分比)	均方根差 (Tb)	均方根差 (τ)
ZWD (cm)	23.8	5.40 (22.7%)	1.78 (7.48%)	1.33 (5.56%)

4. WVR 觀測結果分析

實驗觀測於民國八十七年三月十八日到二十五日間在台北氣象站進行，WVR 架設於不銹鋼架上，儀器主體設定在東西及南北走向兩方向轉換，而天線反射鏡旋轉方向與儀器主體走向成正交，實驗中重複掃描 15° 及 165° 間仰角 (每 15° 做一次觀測)。在為期一週的實驗中，共蒐集了 383 組 23.8 及 31.4GHz 兩種頻率的亮溫觀測。本研究使用之 WVR 為美國 Radiometrics 公司所提供，操作頻率為 23.8 及 31.4GHz，選用 23.8GHz

有兩大考量：(1) 該頻率接近水汽吸收頻率且幾乎不受壓力擴張影響；(2) 該頻率免於衛星下鏈傳輸的影響。其解析度為 0.25K，半功率頻寬在 23.8 及 31.4GHz 分別為 5.7° 及 4.4° 。其它特色簡述如后：(1) 以液態氮及環境溫度為準不時地自我校正；(2) 以步進馬達控制基座水平旋轉 ($3^\circ/\text{秒}$) 及天線反射鏡仰角 ($90^\circ/\text{秒}$) 變化；(3) 經介面由電腦控制，達到自動化觀測；以及 (4) 被動式儀器不影響其他作業之電波訊號。

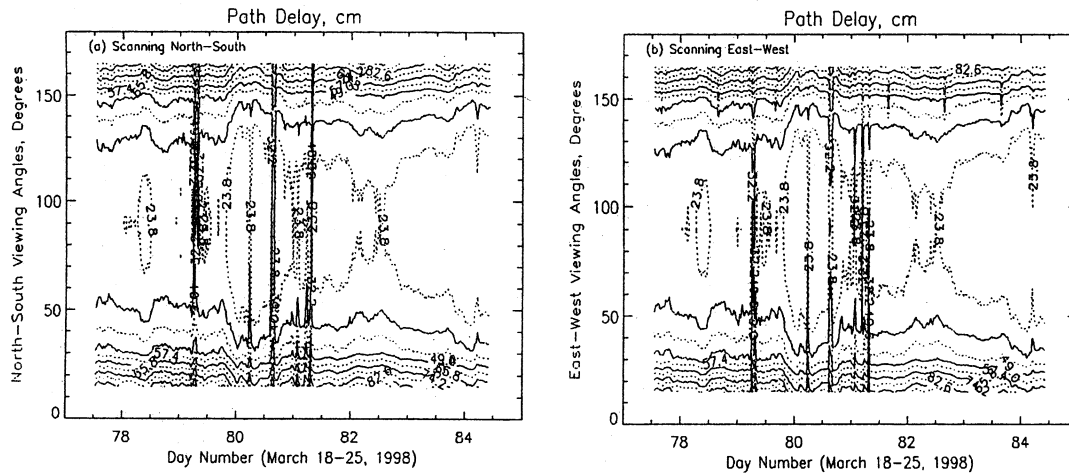
圖二為 WVR 及氣球探空觀測所得大氣在天頂方向 23.8 及 31.4GHz 的 (a) 亮溫及 (b) 光程，以及 (c) ZWD。一般而言，三組相對參數間觀測量趨勢相當一致。此外，水汽總含量增加時亮溫及光程遞增，WD 亦然。在一週實驗期間，大氣亮溫在 23.8 及 31.4GHz 的平均值分別為 57.8 及 32.4K，相對的標準差 (百分比) 分別為 20.5K (35.4%) 及 27.1K (83.7%)，這些平均值小於民國七十七年到八十六年三月間氣球探空資料的觀測值，差異分別為 7.9K 及 8.4K。差異主要歸因於大氣中水汽含量較低，亦即 WD 較小。WD 平均值 21.5cm 小於過去十年三月間氣球探空資料相對的觀測值 (23.8cm，如表一)，兩者間差異 (百分比) 為 2.3cm (9.7%)。此外，圖二說明光程在觀測期間均小於 1，其平均值 (標準差) 在 23.8 及 31.4GHz 兩種頻率分別為 0.227Np (0.136) 及 0.126Np



圖二 民國八十七年三月十八日到二十五日間，在台北氣象站水汽微波輻射儀及氣球探空所測得在天頂方向的大氣 (a) 亮溫及 (b) 光程，以及相對的 (c) ZWD

(0.198)。至於在一週實驗期間氣球探空觀測，由於 WVR 與氣球探空觀測之空間與時間解析差異大，大氣亮溫在 23.8 及 31.4GHz 的平均值分別為 68.4K 及 42.4K，大於相對的 WVR 觀測分別為 10.6K 及 10.0K。又鑑於所比較的氣球探空觀測資料少，茲未做進一步定量分析。

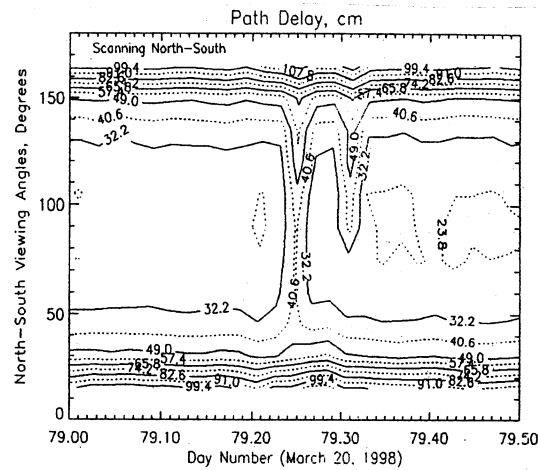
圖三所示為 WVR 主體設定在 (a) 東西及 (b) 南北走向時，不同仰角 (天線反射鏡在 (a) 南北及 (b) 東西方向旋轉) 所測得之 WD。由圖可知，WD 隨著仰角的增加而遞減 (165° 視同為 15° 低仰角)。就其極值而言，在觀測南北時，變化範圍由天頂方向的 14.8cm 到低仰角的 122.0cm。在觀測東西時，變化範圍則由天頂方向的 14.8cm 到低仰角的 139.0cm。兩者間低仰角觀測極值差異達 17.0cm，顯示大氣之不均勻特性。就平均值而言，觀測東西與南北兩組間最大差異僅為低仰角的 0.37cm。因此，以下僅就 WVR 主體設定在東西走向時之觀測進行探討。



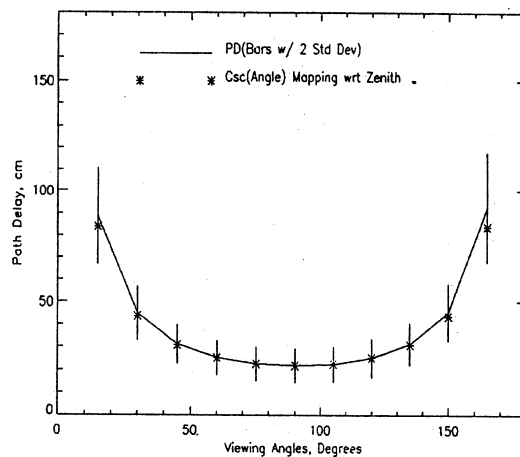
圖三 民國八十七年三月十八日到二十五日間，WVR 主體設定在 (a) 東西及 (b) 南北走向時，不同仰角 (天線反射鏡在 (a) 南北及 (b) 東西方向旋轉) 所測得之 WD

此外，由圖三顯示，尤其在三月二十日 (day number = 79 ~ 80) 到二十二日間，WVR 仍能掌握住劇烈之 WD 變化。由於三月二十日當天的 WD 變化相當劇烈，看似雜訊，茲特將該日午夜到正午間 WD 觀測畫出，如圖四。圖四中顯示，南北 WD 變化大，其範圍約由天頂方向的 21.6cm 到低仰角的 118.0cm。

圖五所示為 WVR 測得 WD 的統計值，以及相對於天頂方向的變化行為。其中，垂直線代表同一仰角參數的變化大小，其長度為兩個標準差 (請見表二 WVR 觀測 WD 之平均值與標準差)；星號 (*) 代表以天頂方向為基準經反正弦函數映射之值，可以明顯地看出，映射值隨著仰角遠離天頂而偏離量增大，在 165° 時偏離量 (百分比) 達 8.3cm (9.3%)，顯示成層化大氣之假設，隨著仰角遠離天頂而逐漸失真，如表三所列舉各個仰角之偏離量 (百分比)。



圖四 民國八十七年三月二十日午夜到正午間，WVR 南北觀測之 WD 等位圖



圖五 民國八十七年三月十八日到二十五日間，水汽微波輻射儀所測得大氣中 WD 的統計值，垂直線長度為兩個標準差，星號 (*) 代表以天頂方向為基準經反正弦函數映射之值

表二 為期一週的實驗中，WVR 觀測 WD 之平均值與標準差 (光程迴歸結果)

仰角 (°)	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
WD 平均值 (標準差) (cm)	85.2 (10.5)	43.0 (5.6)	30.0 (4.1)	24.3 (3.7)	21.6 (3.6)	20.9 (3.6)	21.4 (3.7)	24.2 (4.0)	30.0 (4.4)	43.4 (6.1)	89.0 (12.0)

表三 以天頂方向為基準經反正弦函數映射 WD 之偏離量 (百分比)

仰角 (°)	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
WD 偏離量 (百分比) (cm)	4.5 (5.2)	1.2 (2.7)	0.40 (1.3)	0.15 (0.5)	-0.01 (0.1)	0 (0)	-0.19 (0.9)	0.03 (0.1)	0.48 (1.6)	1.6 (3.8)	8.3 (9.3)

5. 結 論

本文介紹輻射計量評估可降水對 GPS 訊號傳遞造成的影響，原理植基於可降水主宰大氣的折射率，以及大氣在 23.8 及 31.4GHz 兩種頻率的輻射特性。依據民國七十七年到八十六年三月間的氣球探空資料所做分析，發現以亮溫迴歸引起的均方根差為 1.78cm (7.48%)。若以光程進行迴歸，則相對的均方根差降到 1.33cm (5.56%)。

民國八十七年三月十八日到二十五日間在台北氣象站進行 WVR 觀測結果顯示，在天氣系統變化較大的時候，輻射偵測技術仍然掌握住瞬息萬變 WD 的分佈。以三月二十日清晨 6 ~ 8 a.m. 兩個小時為例，WD 約由天頂方向的 21.6cm 劇升到低仰角的 118.0cm，僅在天頂方向則由 21.6cm 劇升到 40.8cm。顯而易見，微波輻射技術具有偵測 WD 動態的能力，可以提供 GPS 觀測技術即時之大氣校正。尤其在觀測角度偏離天頂時，如在 165° 時正弦函數映射誤差可達 8.3cm，亦即成層化大氣之假設逐漸降低適用性時，更可以突顯出 WVR 大氣校正在高精度定位時重要之角色。目前，我們已運用 WVR 觀測資料當約制，進一步探討 GPS 估計大氣中水汽含量的技術 (劉及楊，1999)。除了配合中華衛星三號觀測水汽含量之任務，以為驗證用，同時提供天氣分析模式起始與約制之即時水汽含量分佈，用來結合數值氣象預報模式，增進氣象預報能力。

本文已說明了 WVR 觀測 WD 動態的能力，因此吾人可以進一步應用 WVR 提供即時 WD 絕對變化量，回饋 GPS 精密測量方面之應用，尤其是對於基線短於 500 公里、基線兩端大氣相關性無法完全去除之資料處理。

誌 謝

本研究在國科會太空計畫室建教合作計畫 NSC87-NSPO(A)-PC-FA07-05 支持下完成，特此申謝。作者並感謝美國 Radiometrics 公司提供水汽微波輻射計，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，作者同時感謝審查者提供寶貴意見。

參考文獻

- 郭隆晨、余水倍、陳春盛，1998。對流層折射影響高程 GPS 測量之對策，第三屆國際 GPS 衛星科技研討會論文集，台南，11 月 10~11 日。
- 陳春盛、郭隆晨、余水倍，1996。改善對流層折射率誤差造成 GPS 高程偏差之對策，測量工程，第三十八卷，第四期：3-13。
- 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（修改審查中）。
- 劉說安、楊名，1999。GPS 估算可降水量：WVR 約束法，大氣科學（付梓中）。
- Alber, C., Ware, R., Rocken, C. and Solheim, F., 1997. GPS surveying with 1mm precision using corrections for atmospheric slant path delay, *Geophys. Res. Lett.*, 24: 1859-1862.
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A. and Ware, R. H., 1992. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 97: 15787-15801.
- Braasch, M. S., 1994. Isolation of GPS multipath and receiver tracking errors, *Navigation*, 41: 415-434.
- Davis, J. L., Herring, T. A., Shapiro, L. L., Rogers, A. E. and Elgered, G., 1985. Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length, *Radio Sci.*, 20, 1593-1607.
- Dixon, T., 1991. An introduction to the Global Positioning System and some tectonic applications, *Rev. Geophys.*, 29: 249-276.
- Duan, J., Bevis, M., Fang, P., Bock, Y., Chiswell, S., Businger, S., Rocken, C., Solheim, F., VanHove, T., Ware, R., McClusky, S., Herring, T. A. and King, R. W., 1996. GPS meteorology: direct estimate of the absolute value of precipitable water, *J. Appl. Meteor.* 35: 830-838.
- Haines, B. J., and Bar-Sever, Y. E., 1998. Monitoring the TOPEX microwave radiometer with GPS: stability of columnar water vapor measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 25: 3563-3566.
- Han, Y., and Westwater, E. R., 1995. Remote sensing of tropospheric water vapor and cloud liquid water by integrated ground-based sensors, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 12: 1050-1059.
- Hecht, E., 1987. *Optics*, 2nd ed., Addison-Wesley Publishing Company.
- Liou, Y.-A. and Lin, S.-G., 1998. Ground-based GPS sensing of atmospheric integrated water vapor, *Weather Analysis and Forecasting Workshop*, Taipei, Feb. 23~25.
- Rabin, R. M., McMurdie, L. A., Hyden, C. M. and Wade, G. S., 1992. Layered precipitable water from the infrared VAS sounder during a return-flow event over the Gulf of Mexico, *J. App. Meteor.*, 31: 819-829.
- Resch, G. M., 1984. Water vapor radiometry in geodetic applications, in *Geodetic Refraction*, edited by Brunner, F. K., Springer-Verlag, New York: 53-84.
- Rocken, Ware, R., VanHove, T., Solheim, F., Alber, C., Johnson, J., Bevis, M. and Businger, S., 1993. Sensing atmospheric water vapor with the Global Positioning System, *Geophys. Res. Lett.*, 20: 2631-2634.
- Saastamoinen, J., 1972. Atmospheric correction for troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, in *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, *Geophys. Monogr. Ser.*, 15, edited by Henriksen, S. W., *et al.*, AGU, Washington, D.C: 247-251.
- Schroeder, J. A., and Westwater, E. R., 1991. Users' guide to WPL microwave radiative transfer

- software, NOAA Technical Memorandum, ERL WPL-213: 1-84.
- Smith, E. K., and Weintraub, S., 1953. The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies, *Proc. IRE*, 41: 1035-1037.
- Snider, J. B., and Hazen, D. A., 1998. Surface-based radiometric observations of water vapor and cloud liquid in the temperate zone and in the tropics, *Radio Sci.*, 33: 421-432.
- Solheim, F., Godwin, J. R., Westwater, E. R., Han, Y., Keihm, S. J., Marsh, K. and Ware, R., 1998. Radiometric profiling of temperature, water vapor and cloud liquid water using various inversion methods, *Radio Sci.*, 33: 393-404.
- Thayer, D., 1974. An improved equation for the radio refractive index of air, *Radio Sci.*, 9: 803-807.
- Westwater, E. R., 1978. The accuracy of water vapor and cloud liquid determinations by dual-frequency ground-based microwave radiometry, *Radio Sci.*, 13: 677-685.

Spatial Variation in Atmospheric Wet Delay Observed by a Ground-Based Dual-Channel Radiometer

Yuei-An Liou¹

Abstract

A ground-based water vapor radiometer (WVR) was utilized to investigate the influence of water vapor on the propagation of Global Positioning System (GPS) signals through the atmosphere. The influence is in general characterized as so-called "wet delay" (WD). WD were inferred from brightness temperatures at 23.8 and 31.4GHz observed by WVR installed at Taipei weather station from March 18 to 25, 1998, and the corresponding opacity depths. During the field campaign, the WVR was initially installed due east, while it was turned to north periodically. An elevation mirror is used to guide atmospheric emission to the antenna. It is designed to rotate perpendicularly to the WVR itself so that elevation angles can be automatically adjusted to scan the atmosphere every 15° at angles between 15° and 165°. In order to derive retrieval coefficients, radiosonde data collected at Taipei weather station in each March starting from 1988 to 1997 were used. WD from WVR measurements varies from 14.8cm for clear sky to 40.8cm for rainy/cloudy conditions at zenith. WD observations at angles from 15° to 165° indicate that stratified atmosphere becomes an less appropriate assumption with viewing angles departing from zenith. The deviation is increased to as much as 8.3cm at angle of 165°.

Keywords: Wet delay, brightness temperature, optical depth.

¹ Associate Professor, Center for Space and Remote Sensing Research, and Institute of Space Sciences, National Central University