

利用GPS訊號延遲量反演對流層可降水之研究

許家維¹、葉大綱¹、洪景山²、蔡雅婷²
清雲科技大學空間資訊與防災科技研究所¹
中央氣象局氣象資訊中心²

摘要

水氣對於地球上來說是原本存在的物理現象，也是大家生活中常常接觸的部份之一，對於氣候上的變遷水氣是扮演一種能量傳遞方式，相較於整個大氣層中與其他的氣體做比較時，在呈現上會屬於比較不穩定的狀態，並且對人類的生活帶來許多的影響。因此，若能在快速的時效下獲得大氣中水氣含量資訊，對於天氣狀態的研究與分析以及氣象的預報會有相當的幫助。本研究是以地面GPS接收訊號來計算對流層天頂向的濕延遲量，藉以觀察天頂向濕延遲量與地面可降雨量之間的關係。資料計算使用Bernese 5.0軟體來處理GPS觀測資料，並利用水氣微波輻射儀所觀測到的濕延遲量來驗證本研究計算之成果。研究成果顯示，水氣微波輻射儀及GPS訊號值呈現一致的趨勢，以北港站為例，兩者的相關係數達0.96，平均誤差為-0.83 mm；而墾丁站的相關係數達0.91，平均誤差為4.84 mm。配合地面上雨量數據呈現出，在延遲量較高的形況下通常即有降雨的跡象，藉由數據上的統計分析了解天氣的狀態，希望對氣象的預報上提供參考的數據。

關鍵字：全球定位系統、水氣微波輻射儀、對流層、濕延遲、降雨量。

一、前言

隨著科技的進步，全球定位系統GPS已被廣泛的應用在生活及工程當中，尤其在許多需要精密定位的領域上，其基本原理方式是以電磁波傳遞的時間（相位或距離）計算真實的位置。然而地球上的大氣層會影響電磁波的傳遞路徑，如何準確的估計電磁波傳遞時間，經過地球大氣層時產生的誤差時間，也是國際上相關領域、學者共同努力克服的課題之一。GPS定位的精度是需要克服很多因素才有可能獲得，這些因素大部分都有其相對應的處理方式及對策，唯獨大氣影響因子部分，特別是水氣的部分比較難以分析固定特性，再加上台灣地區是處在四面環海，也是世界上最大的季風區內，因此氣候上深受季風的影響，台灣地區平均降水量（約2500 mm）在世界平均值（約834 mm）（姜善鑫，1994；Raudkivi,1979）之上，大氣層中水氣的含量多且變化大，因此對天氣所造成的影響量是不可忽略。

對流層所集中的水份大概佔全體水氣的99.99%，大部分的水氣(50%)是分布在低層的大氣層中，以地表起算至上方兩公里的大氣層範圍之內，兩

至四公里所集中水氣約佔總水氣25%，其他水氣則分布在4到10公里這個範圍之中。雖然水氣對整個大氣範圍所佔有的比例並沒有很大，但由於水可以在自然界中三態並存，並藉由這些三態相位的改變形成了各種天氣現象，水三態的變化中會釋放或吸收能量，其中水氣的蒸發與凝結能夠吸收或釋放潛熱，這些熱量的傳輸，是颱風、雷雨等的能量所在，因此水氣在氣象預報與氣象監測中，扮演了很重要的角色（楊承益，2008）。

本文研究主要目的是使用GPS追蹤網，利用GPS訊號來得知對流層的天頂濕延遲量，並將GPS信號得到的天頂濕延遲量與可降雨量作分析比較，利用水氣微波輻射儀(Water Vapor Radiometer, WVR)所量測的天頂濕延遲量來驗證GPS訊號所求得天頂濕延遲量的正確性，未來希望可以對於氣象預報及防災方面有明顯的幫助。

二、研究方法

2-1 GPS計算原理

對流層對於GPS衛星訊號之影響主要是因大氣

中的介質使訊號傳遞速度比真空中要慢，傳播路徑呈現曲線狀態，前者是對流層折射率大於真空的折射率造成速度的延遲；後者則是因不同大氣層產生的折射率，使傳遞路徑形成彎曲的延遲，當衛星觀測仰角大於 15 度時，其幾何延遲部份不大於 1 公分 (Bevis et al., 1992)，根據司乃耳定律 (Snell's law) 訊號傳播的路徑會呈直線，幾何延遲便可去除，如圖 1 所示。

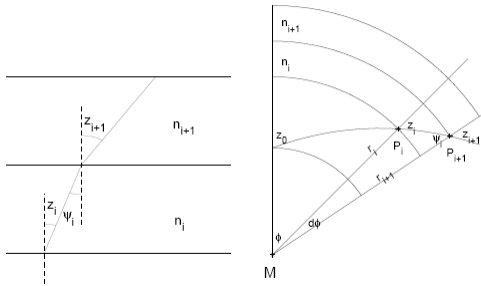


圖 1 Snell's Law (Kleijer, 2004)

本研究採用最小二乘法解算 GPS 觀測資料，並估計天頂向延遲量。以載波相位觀測方程式計算待測站座標 (X_j, Y_j, Z_j) 時，先將 $D_{trop,h}^Z$ 以模式求得的延遲量代入；且已知電離層延遲量的大小與載波頻率的平方成反比，故可利用雙頻載波無電離層線性組合，消除電離層延遲量。接著使用最小二乘法計算座標，當測站座標已知，衛星位置由精密星曆可知，則測站至衛星的幾何距離即為已知值，可表示如下式 (Wang et al., 2008)：

$$D_{ij}^{pq}(t) = \frac{f}{c} \left\langle \begin{matrix} D_{i,trop}^Z(t) [M(\theta_i^p) & M(\theta_i^q)] \\ D_{j,trop}^Z(t) [M(\theta_j^p) & M(\theta_j^q)] \end{matrix} \right\rangle$$

θ_i^p ：為測站 i 觀測衛星 p 的仰角

θ_i^q ：為測站 i 觀測衛星 q 的仰角

θ_j^p ：為測站 j 觀測衛星 p 的仰角

θ_j^q ：為測站 j 觀測衛星 q 的仰角

$M(\theta)$ ：映射函數，只要觀測仰角已知，映射函數即為一常數 $D_{trop}^Z(t)$ ；接收站天頂向對流層大氣延遲量式中欲求解的未知數有 i、j 兩站天頂向對流層延遲量，但求解時可觀測到的衛星顆數不只有兩顆，因為

觀測量大於未知數數量，此處採用最小二乘法進行參數求解。而溼延延與可降水的關係，可由上式右邊第二項提出表示為：

$$D_{trop,w}^Z = 10^{-6} \int_H^\infty k_2 \left[k_1 \frac{M_w}{M_d} \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right] dz$$

$$D_{trop,w}^Z = 10^{-6} k_2' + \frac{k_3}{T_m} \int_H^\infty \frac{e}{T} dz$$

$$k_2' = k_2 \left[k_1 \frac{M_w}{M_d} \right]$$

其中， k_2' 為常數。我們定義可降水為一大氣垂直空氣柱中液態水的總量，通常以高度為其單位，即：

$$PW = \frac{1}{\rho_l} \int_H^\infty \rho_w dz = \frac{1}{\rho_l R_w} \int_H^\infty \frac{e}{T} dz$$

ρ_w 是水氣密度， ρ_l 是液態水密度， R_w 是水氣的氣體常數 ($R_w = R/M_w$)。由 GPS 得到的溼延延量可轉換成可降水量 PW (Askne and Nordius, 1987; Bevis et al., 1994)：

$$PW = \Pi \times D_{trop,w}^Z$$

其中 Π 為轉換因子，而沿天頂向積分，大氣垂直總水氣含量 (Integrated Water Vapor, IWV) 即為可降水乘上液態水的密度：

$$IWV = PW \times \rho_l$$

IWV 的意義為單位底面積的大氣垂直空氣柱中，含有多少單位重量的水 (kg/m²)；而 PW 的意義為一單位面積大氣垂直空氣柱中含有多少單位高度的水氣 (mm)。

2-2 WVR 觀測原理

WVR 原理是量測大氣中水氣輻射的亮溫 (熱發散的強度)，通常使用接近 22.2GHz 水氣吸收頻段。該儀器使用兩個以上的波段來量測大氣中水氣和液態水量值。一般對於使用 WVR 觀測濕延延的公式如下：

$$\Delta L_v = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i$$

其中， a_i 是迴歸的係數， X_i 是綜合 WVR 觀測亮溫及其它可能的氣象變數 (如地表壓力及溫度... 等等)。WVR 的頻率及反演大氣參數在 ZWD 估計方面，都能夠最佳化，理論上精度大約在 2 mm 等級 (England, 1992; Elgered, 1993)。為了達到較高的精度，使用 WVR 修正天頂延遲量可使量測精度標準差從 20 mm 減到 7 mm。許多已被發展的精細模型，都

是利用 WVR 來獲得水平梯度或濕遲延梯度變化率。另外 WVR 被著重在直接修正 GPS 衛星的斜向濕遲延量，而不再使用內插的方式。這個方式所改善的精度，在近 15 年當中，對 22-850 公里的基線而言，GPS 由垂直坐標 2 cm 進步到 1 mm (Ware, 1985; Alber, 1997)。許多最近的結果已經驗證，使用較高等級的 WVR 修正斜向濕遲延效能高於僅做天頂濕遲延修正。

地面 WVR 站快速掃描的能力，已允許在小於 10 分鐘之內，連續量測 5 顆 GPS 衛星的斜向濕遲延量。這種方式已有報告指出在 43 公里基線觀測 11 天的垂直坐標方面可達到 1.2 mm 等級的精度 (Alber, 1997)，在這個實驗是使用直徑 85 公分的 choke ring 的天線盤，多路徑效應降到最低。這樣的結果是令人感到振奮的，不過這樣等級精度的成果需要去確認，尤其是在大氣中含水氣量極高的台灣。

本研究使用的水氣微波輻射儀為 WVP-1500，屬於被動式水氣微波輻射儀，如圖 2，擁有介於 22 GHz – 30 GHz 之間的 5 個觀測波段（具備升級至 12 波段的能力），可觀測至 10 公里高的水氣剖面，單筆觀測時間（cycle time）不大於 10 秒；同時整套設備亦具有量測地表溫度、壓力、相對濕度的功能。



圖 2 WVP-1500 水氣微波輻射儀

三、案例介紹與資料處理

本研究衛星資料計算方式，除了台灣的衛星站另外又另外選了日本的 TSKB 來當主站，會選擇日本當主站主要原因是讓主站跟移動站的基線變長，因兩地的環境大氣條件不相關，因此藉由長基線的計算可求得絕對的對流層濕遲延量。衛星資料利用 Bernese 5.0

來做計算，其中衛星軌道誤差及衛星時錶誤差是利用 IGS 網站所提供的精密星曆做計算，電離層延遲誤差是以 L3 線性組合加以修正。為了提高定位精度本研究海潮負載的模式是參考瑞典 Onsala 天文台網頁所提供的海潮負載資料進行修正，本研究選用 NAO.99b 模式加以修正。所計算的固定坐標反算 ZWD 以 1 小時為單位，故一天有 24 筆資料，再匯入 Excel 來做整理。

WVR 資料主要是由內政部衛星測量中心提供，資料內容包含時間，地表溫度、壓力、相對濕度等資料 如圖 3。每筆資料接收時間並沒有固定，大部分單筆時間都小於 10 秒，所以兩個月的 WVR 資料量是非常多的，為了整理本研究的 WVR 的資料，使用中央大學所提供的軟體，以 Fortran 撰寫的程式進行資料處理，整理完成的 WVR 資料會產生*.met，在*.met 檔案中會有一欄 ZW_delay 參圖 4，再將資料輸入至 Excel 來做整理，資料內容會有地表溫度、壓力、相對濕度及 WVR 量測到的延遲量，吾人只需要 WVR 量測到的延遲量來驗證 GPS 所估計的延遲訊號。

圖 3 WVR 的原始資料圖

圖 4 Fortran 程式整理完成 WVR 資料

四、案例成果與分析

本章節主要是介紹研究案例與資料處理的方法，本研究以北港及墾丁為案例，透過 GPS 及地面氣象站的降雨資料與 WVR 站的資料作分析，案例時間為 2008 年 5、6 月，參考圖 5、6，由圖中我們可以發現，計算出來的天頂向延遲量趨勢非常一致，其相關係數 PKGM 站有 0.96，平均偏差在 -0.83 公分圖 5，圖 6 KDMN 站相關係數有 0.91，平均偏差在 4.84 公分，KDMN 站幾個 PWV 延遲量超過 70mm 部份，當細部分析時發現到，累積雨量較明顯處都發生在高延遲量之後，證明 GPS 可顯示發生強降雨前的變化量，換言之可能提前知道降雨現象，圖 7 的時間是 6 月 5 號早上 8 點及 13 點時間。

另外我們用整體數據分析彼此之關係發現，當 PWV 延遲量大小平均維持在 50~60 mm 一段時間且向上攀升時，也容易發生降雨現象。一天之中日夜溫差大約 5°C 之間，由於 KDMN 站因儀器故障無法顯示兩站之間溫度的變異量，由 PKGM 數據上可得知在水氣是隨著溫度在變化如圖 8 所示(時間 5 月 31~6 月 2 號)，當溫度上升延遲量有上升現象，經降雨過後延遲量有減少趨勢。

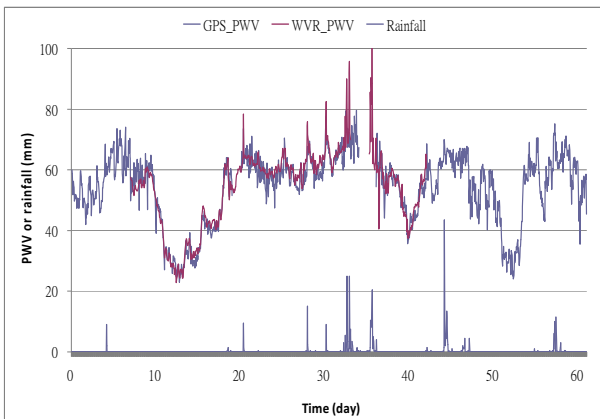


圖 5 五、六月份北港站 GPS 及 WVR 趨勢圖

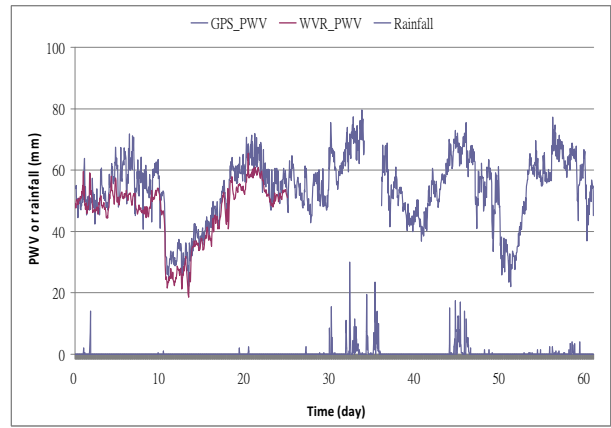


圖 6 五、六月份高雄站 GPS 及 WVR 趨勢圖

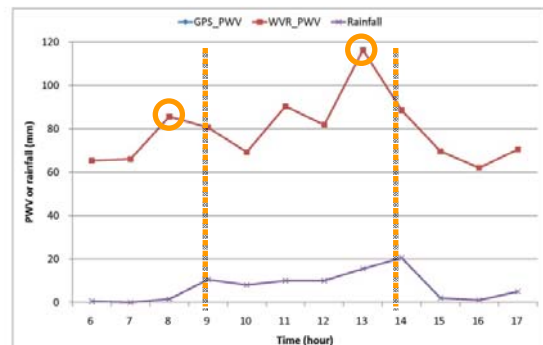


圖 7 延遲量與降雨量的關係

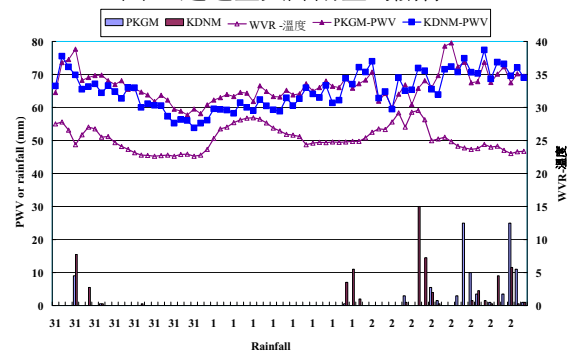


圖 8 降雨量與溫度及延遲量關係

五、結論與建議

本研究數據是以 2008 年 5、6 月之 GPS 與 WVR 的觀測資料，以 GPS 所計算的 PWV 及 WVR 所量測的 PWV 觀測資料來求解北港(PKGM)站及墾丁(KDMN)站 對流層可降水量，兩者之相關係數約為 0.91~0.96 之間圖 4、圖 5，證明 GPS 在氣象應用上有顯著效果，由數據上顯示水氣微波輻射儀(WVR)在降雨時所量測到延遲量可當作真值參考數據，但由於儀器本身結構關係，有可能容易造成數據上的誤判，因此可能需要配合其它方式所計算出的可降水量當推斷驗證值。藉由 GPS 訊號及水氣微波輻射儀(WVR)

的比對數據，以統計量化方式分析數據，了解天氣的狀態，希望對氣象的預報上提供參考的數據。

六、參考文獻

姜善鑫，1994。台灣水資源的危機，台灣地區氣候變遷因素及影響研討會論文集，台大全球變遷研究中心：90-103。

楊承益，2008。分析以全球定位系統即時估計可降水之可行性，國立中央大學碩士論文。

Alber, C., R. Ware, C. Rocken, F. Solheim, 1997. GPS surveying with 1 mm precision using corrections for atmospheric slant path delay, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1859-1862.

Askne, J., H. Nordius, 1987. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data, *Radio science*, 22(3), 379-386.

Bevis, M., 1994. GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water, *Journal of Application Meteorology*, 33, 379-386.

Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, R. H. Ware, 1992. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system, *J. Geophys. Res.*, 97, 15784-15801.

Kleijer, F., 2004. Troposphere Modeling and Filtering for Precise GPS Leveling, Ph.D Dissertation, Department of Aerospace Engineering, Delft University of Technology.

England, M., R. Ferrare, S. H. Melfi, D. Whiteman, T. Clark, 1992. Atmospheric water vapor measurements: Comparison of microwave radiometry and lidar, *J. Geophys. Res.*, 97(D1), 899-911 the global positioning system, *J. Geophys. Res.*, 97, 15784-15801.

Wang, C. S., Y. A. Liou, T. K. Yeh, 2008. Impact of surface meteorological measurements on GPS height determination, *Geophysical Research Letters*, 35(23), L23809, doi: 10.1029/2008GL035929.