

應用GPS精密求定大氣可降水及服務網之建立

葉大綱¹、陳博隆²、張味新¹、洪景山³
國立台北大學 不動產與城鄉環境學系¹
清雲科技大學 空間資訊與防災科技研究所²
中央氣象局 氣象資訊中心³

摘 要

應用地面GPS資料來進行大氣中可降水的研究，即是利用遙測方式來反演氣候資訊的一種方式。就目前的技術看來，其計算精度已相當接近利用探空氣球或水氣微波輻射儀的直接量測精度，但其範圍遠不及空中福衛三號的全球量測資料；但是就長期上來看，卻是一種較為經濟（地面GPS接收站多為現有且多功能，福衛三號所費不貲且有其壽命限制）、近即時（觀測資料皆可近即時獲得）且全面性（台灣本島及離島皆已覆蓋高密度的GPS連續接收站）的觀測方式。本研究即是以地面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所計算之成果。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。未來將進一步建構台灣地區近即時性的對流層延遲及水氣含量服務網，以提供給相關領域的研究者使用，未來亦可應用於環境監控及天氣預報上，提供民生及科學研究等各領域之應用服務。

關鍵字：全球定位系統、對流層、可降水、濕延遲、服務網。

一、前言

近年來各行各業都對氣象預報業務，特別是對突發性天氣預報提出越來越高的要求。利用連續觀測的GPS衛星定位信號可以獲得大氣對流層中水汽含量的動態變化，得到高精度、高時空解析度、準即時且連續的全國可降水汽量變化圖像用於服務於氣象學研究，以提高突發性天氣預報的能力。與傳統用於氣象觀測的水汽輻射計（WVR）和無線電探空儀相比，WVR價格昂貴，不可能廣泛佈點，探空儀時空解析度很低，採樣率一般一天只有兩次。地基GPS技術設備價格低廉，便於密佈，且可提供準即時、連續、地面覆蓋率廣的高精度大氣之可降水量（Perceptible Water Vapor, PWV）的變化圖像之能力，對改進天氣短期預報，特別是雷暴雨天氣的預報和數值天氣預報模型具有極重要的作用。因此形成了一門新的學科：

GPS氣象學（包括結合低軌道衛星LEO對GPS衛星的掩星資料，提供大氣中分層水汽量的變化，GPS氣象學演然而生）。目前，美國大氣和海洋管理局（NOAA）的地基GPS氣象網（NOAA GPS PW Network）每30鐘可自動估算網站上空可降水汽量的變化結果。日本全國1000多個測站組成的GPS網，目前已兼顧地基GPS氣象學的應用。

GPS雖提供了精確的載波相位觀測量供高精度之測量及導航等各方面的應用，然而，高精度之GPS受到大氣的影響而產生之誤差也逐漸受到重視，其可區分為電離層延遲與對流層延遲，在電離層延遲方面已可藉由雙頻觀測或同步觀測差分等法顯著減弱其所造成之觀測誤差；至於對流層延遲方面則可區分為由於乾空氣之溫度及壓力變動，致使乾空氣折射率發生變化所造成的乾分量，以及信號傳遞路徑上不均勻分佈之水汽折射所致的濕分量。前者可藉由量測的地

面壓力資料精確算得；後者卻因大氣中之水分子分佈不均且極為不穩定，故難以由地面氣象資料有效地模組及修正。儘管對流層濕延遲遠小於對流層乾延遲，但對流層濕延遲的不確定性卻對於高精度之 GPS 應用形成難以預估的不確定因素。目前精確求解對流層延遲除提升 GPS 定位精度外，亦可利用濕分量反演大氣中的水汽含量，提供氣象預報作業上作近即時性的應用（蔡亦證，2005）。

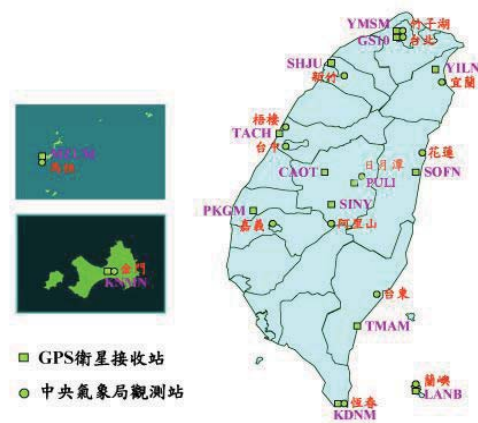


圖 1 衛星站與氣象站分佈圖

二、資料處理

2-1 GPS資料方面

GPS 衛星資料是利用 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精密星曆，電離層延遲誤差是用 L3 的觀測量加以修正。因為是進行長基線的解算，為了提高定位精度使用海潮負載修正，本研究海潮負載的模式主要是參考瑞典天文台的網頁。所計算的固定坐標返算 ZWD 以每 1 小時為單位，故一天有 24 筆資料。GPS 解算中所使用之相關資料有：GPS 觀測資料、GPS 星曆、海潮覆載修正。

(1) 衛星追蹤站包含 GS10、MZUM、TACH、TMAM、LANB、KDNM、SHJU、SINY、CAOT、PKGM、KMMN、YILN、SOFN、PULI 及 YMSM 等 15 個 GPS 衛星站，在本案例期間因為 PULI 沒資料所以只使用 14 個 GPS 衛星站。選擇的中央氣象局氣象站包含竹子湖、馬祖、金門、花蓮、宜蘭、恆春、嘉義、梧棲、臺中、新竹、臺北、臺東、阿里山及蘭嶼等 14 個氣象站，其中以 PKGM 及 YMSM 有水氣微波輻射儀的資料。圖 1 為本研究衛星站與氣象站分佈圖。首先將 GPS 原始資料轉換成儒略日，除了選擇台灣的衛星站當主站，也選擇了日本的 TSKB 當主站。原因是讓主站與移動站的基線變長，加上兩地的大氣環境不同，因此可藉由長基線的計算求得對流層的絕對溼度。

(2) 星曆為衛星運行軌道的參數，於精準定位中須知曉衛星於太空中準確的位置方能求精確出地面測站位置。星曆依不同的準確度而有不同的取得延遲(latency)。而本研究中的衛星軌道誤差及衛星時錶誤差是利用精密星曆求解。而 GPS 衛星資料是利用 Bernese 5.0 來做計算，電離層延遲誤差是用 L3 的觀測量加以修正。

(3) 因為是進行長基線的解算，為了提高定位精度使用海潮覆載修正，本研究海潮覆載的模式主要是參瑞典天文台的網頁，在瑞典天文台的網頁裡提供 GOT00.2、GOT4.7、GOT99.2b、Andersen 2006、EOT08a、FES94.1、FES95.2、FES98、FES99、FES2004、CSR3.0、CSR4.0、NAO99.b、TPXO.5、TPXO.6.2、TPXO.7.0、TPXO.7.1 及 Schwiderski 共 18 種海潮覆載修改模式，比較不同海潮覆載改正模式中發現，使用 NAO.99b、CSR4.0、Schwiderski 與 TPXO.6.2 等海潮覆載模型對各測站之 NEh 方向作改正，皆有明顯提升 GPS 定位精度，其中以 NAO.99b 模式為最佳(張名漢，2007)，故本研究選用 NAO.99b 模式加以修正。所計算的固定坐標返算 ZWD 以 1 小時為單位，故一天有 24 筆資料，再匯入 Excel 來做整理。

2-2 氣象資料方面

氣象資料包含降雨量及濕度資料。本案例氣象資

料購買於中央氣象局，氣象資料是逐時資料，1 天有 24 筆，匯入 Excel 來做整理，以每 1 小時的降雨量來做加總並換算成 GPS 時間，而 GPS 資料時間與降雨量資料的時間相差 8 小時，所以整理時記得統一時間。

在降雨量資料方面（如圖 2），圖片最左邊的那排是代表站名及日期，以 46692020060601 為例，46692 代表台北站，20060601 代表 2006 年 6 月 1 日，第一筆資料就是當日第一小時的降雨量，數據 0 代表沒降雨，T 代表有雨跡，有數字則代表有降雨。

Station ID	Date	Precip	Precip	Precip	Precip	Precip	Precip	Precip	Precip	Precip	Precip	Precip	Precip	Precip	Precip	Precip	Precip	Precip	Precip	Precip
46692020060601	2006/06/01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060602	2006/06/02	0.0	0.0	T	T	T	2.6	2.6	7.7	2.4	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060603	2006/06/03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060604	2006/06/04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060605	2006/06/05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060606	2006/06/06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060607	2006/06/07	2.0	1.0	1.8	2.5	4.0	4.5	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060608	2006/06/08	0.5	T	T	T	T	0.1	0.1	T	T	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060609	2006/06/09	27.5	12.0	23.5	3.5	3.5	23.0	16.0	10.5	T	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060610	2006/06/10	4.5	3.5	2.0	2.0	7.5	0.5	0.5	7.0	4.1	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060611	2006/06/11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060612	2006/06/12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060613	2006/06/13	0.0	T	T	0.0	0.0	0.0	0.0	T	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060614	2006/06/14	0.0	T	T	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060615	2006/06/15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060616	2006/06/16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060617	2006/06/17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060618	2006/06/18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060619	2006/06/19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060620	2006/06/20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060621	2006/06/21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060622	2006/06/22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060623	2006/06/23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060624	2006/06/24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060625	2006/06/25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060626	2006/06/26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060627	2006/06/27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060628	2006/06/28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060629	2006/06/29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46692020060630	2006/06/30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

圖 2 降雨量資料圖

2-3 WVR資料方面

WVR 資料主要是由內政部提供，WVR 的原始資料包含日期、時間，地表溫度、壓力、相對濕度等資料，WVR 觀測資料每筆小於 10 秒，所以 WVR 一天的資料量非常的多。為了整理本研究中 WVR 的資料，本人以 Fortran 程式語言撰寫程式來整理 WVR 資料，使用這個程式會產生 met 檔，在 met 檔案中會有一欄 ZW_delay，將這欄資料輸入至 Excel 來做整理並分析比較。

三、案例分析

3-1 梅雨期間

每年五、六月是台灣的梅雨季，梅雨的雨量，大約占了全年降雨量的四分之一，是台灣的主要水源之

一。但有時過多的降雨量卻造成災害。梅雨特性年年不同，連氣象人員也承認，梅雨降雨可預報度很低，常常要看老天爺臉色。所以本研究選擇梅雨期間，探討梅雨期間雨量與 GPS 延遲量關係之變化。

本案例時間為 2006 年 6 月 1 日至 2006 年 6 月 14 日，圖 4.1 為六月份各地之降雨量與氣溫圖。圖中直長條代表每日之降雨量，點實線代表每日氣溫之平均，實線代表該日平均氣溫之氣候平均。可看出台灣地區 6 月 1 日至 12 日各地多有明顯的持續性降雨，圖中又可發現中、南部地區有超大豪雨或大豪雨發生，部份地區因連日大雨或豪雨而導致災情。此期間又以 9 日及 10 日降雨最為顯著，13 日起鋒面逐漸北移，台灣地區轉為由太平洋高壓控制的夏日天氣型態，導致白天氣溫偏高，降雨系統則以午後發展的熱對流為主（中央氣象局，2006）。

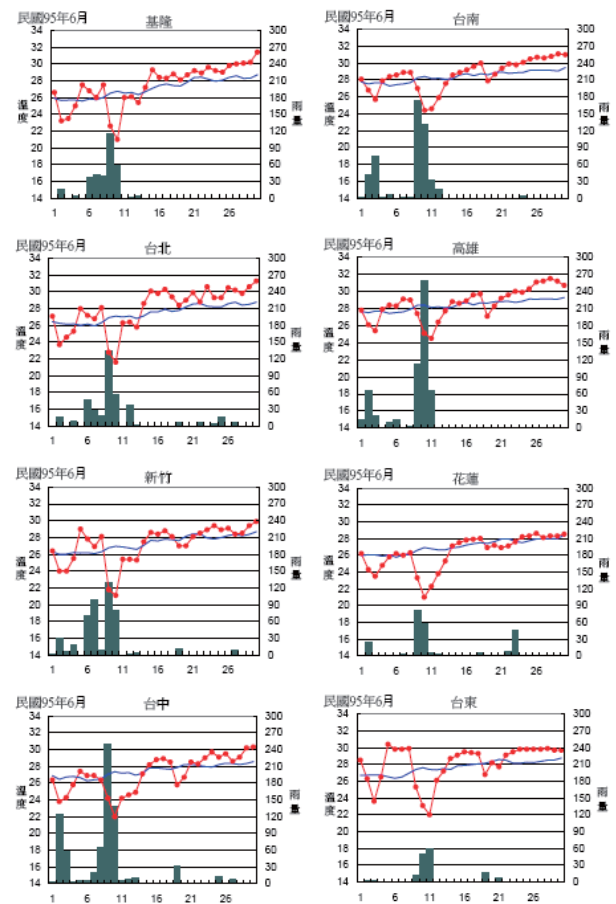


圖 3 六月份主要氣象站降雨量與氣溫圖

由圖 4 中，左邊的 Y 軸為濕延遲量，右邊的 Y 軸

為降雨量或濕度，X 軸為儒略日，圖中紅色的線代表 WVR 量測的濕延遲量，綠色的線代表 GPS 所計算的濕延遲量，藍色的線代表降雨量，灰色的線代表濕度。可以發現 WVR 所量測到的濕延遲與使用 Bernese5.0 所計算出的天頂向濕延遲量（ZWD）趨勢很一致，幾乎在同一線上。再利用 GPS 所量測的濕延遲量減去 WVR 所觀測的濕延遲量取絕對值後平均而得，而計算出的 ZWD 有 1.19 cm 的偏移量，將降雨量與延遲量互相比較，可以發現在降雨發生時延遲量明顯升高，而在降雨過後濕延遲量有明顯下降，利用 Excel 中內建的 CORREL 函數求取 GPS 與 WVR 及 GPS 與降雨量的相關係數，GPS 與 WVR 相關係數為 0.96，由相關係數可以發現 GPS 所計算的濕延遲量與 WVR 量測的濕延遲量是高相關的，然而 GPS 所計算的濕延遲量與降雨量相關性並沒有很相關，可能由於不同的降雨因素，包含地形、氣候等等所造成。

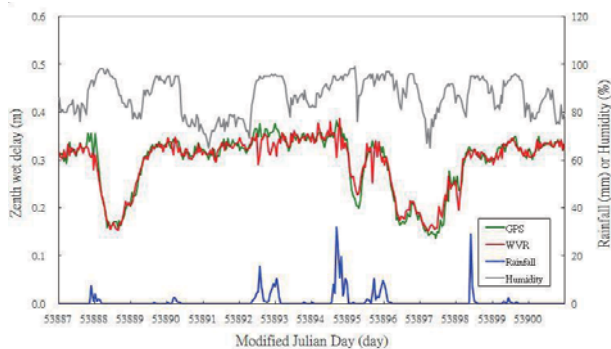


圖 4 YMSM 站與竹子湖氣象站和 WVR 之折線圖

由圖 5 中，可以發現 PKGM 站使用 WVR 所量測到的濕延遲與使用 Bernese5.0 所計算出的天頂向濕延遲量趨勢很一致，有 1.42 cm 的平均偏差，將濕延遲量與降雨量做比較，可發現當降雨來時，濕延遲量會上升，而降雨過後濕延遲量也跟著下降，在 PKGM 站 WVR 與 GPS 所計算出的濕延遲量其相關係數為 0.77，雖紅線 WVR 與綠線 GPS 所測之曲線一致，但圖中圈起來的地方卻不穩合，看藍線降雨量，實際在下雨，GPS 所測之綠線也跟著上升，但紅線 WVR 卻下降，顯示證明 GPS 比 WVR 可靠。這也是造成相關係數只達到 0.77 的主要原因之一。

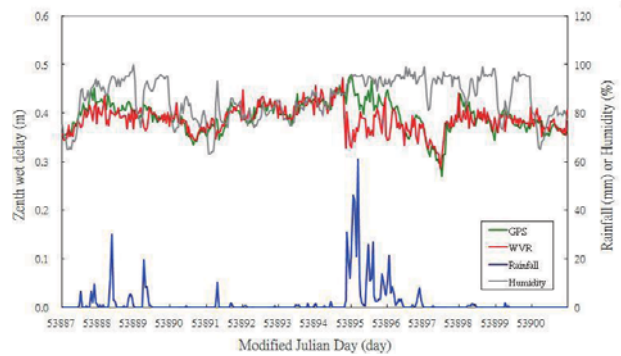


圖 5 PKGM 站與嘉義氣象站和 WVR 之折線圖

3-2 颱風期間

本案例研究時間為 2006 年 8 月 3 日至 8 月 13 日，在 2006 年 8 月份總共出現 7 個颱風，本案例以寶發和桑美颱風作為案例。首先介紹寶發颱風（如圖 6），寶發颱風為編號 0609 的輕度颱風，生成地點台灣東方海面上，颱風近中心最大風速為 23.0 m/s，登陸地段在台東成功附近，台灣中央氣象局於 8 月 7 日晚上 8 時 30 分發出海上颱風警報，在 8 月 8 日下午 2 時 30 分發布針對綠島、蘭嶼、台東、恆春半島、屏東地區的陸上颱風警報，晚上範圍擴大至高雄、台南與澎湖地區；寶發為花蓮帶來間歇性大雨（山區累積雨量約 250 毫米），於台東市區則有少量水淹及膝情況，造成農作物損失。陸上颱風警報於 8 日上午 11 點半解除並在下午 2 時解除海上颱風警報。

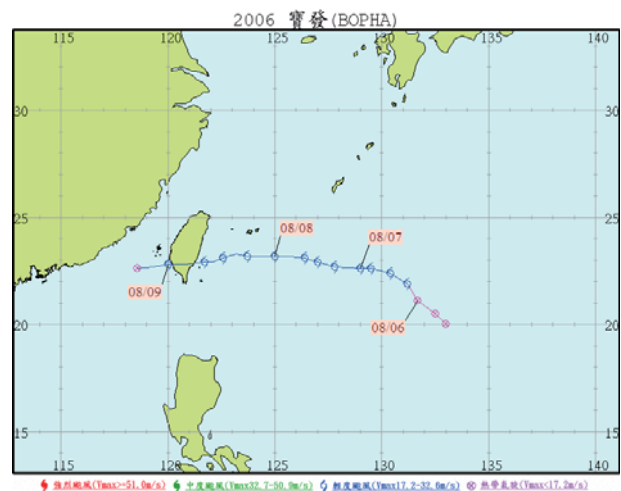


圖 6 寶發颱風路徑圖（中央氣象局，2006）

再來要介紹的是中度颱風桑美(如圖 7)，桑美颱風為編號 0608 的中度颱風，生成地點關島東南方海面，颱風近中心最大風速為 48.0 m/s，台灣中央氣象局於 2006 年 8 月 9 日 2 時 30 分發佈海上颱風警報，並於同日早上 11 時 30 分發出針對台灣北部與東北部之陸上颱風警報。傍晚擴大範圍，包括苗栗以北、宜蘭以北、馬祖，但因桑美快速移動，預測帶來的風雨威脅時間不長，而且雲團緊密且集中在暴風圈內，只有掠過圈內的台灣北端 8 月 10 日早上有較大強風陣雨而已，於下午 2 點半解除本島陸上颱風警報，只剩馬祖。在晚上 11 時 30 分解除所有警報，17 時左右由馬祖北方進入大陸福建。

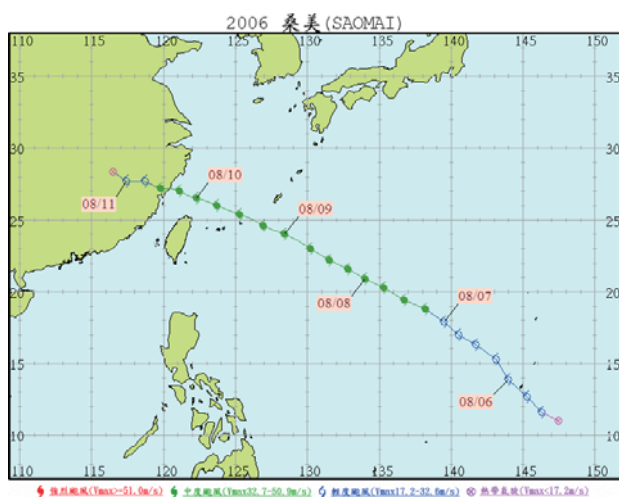


圖 7 桑美颱風路徑圖 (中央氣象局, 2006)

2006 年 8 月 3 日到 2006 年 8 月 13 日，本案例所使用的資料，有 GPS 衛星連續觀測資料、降雨量、濕度及水氣微波輻射儀的資料，在本案例因為 SOFN 及 LNAB 站在這段期間無資料，所以使用衛星追蹤站包含 GS10、MZUM、TACH、TMAM、KDNM、SHJU、SINY、CAOT、PKGM、KMNM、YILN、PULI 及 YMSM 等 13 個 GPS 衛星站，選擇的中央氣象局氣象站包含竹子湖、馬祖、金門、宜蘭、恆春、嘉義、梧棲、臺中、新竹、臺北、臺東、阿里山及日月潭等 13 個氣象站，其中以 PKGM 及 YMSM 有水氣微波輻射儀的資料。在成果說明主要是以颱風的路徑選站做說

明，分別為有 WVR 測站之 YMSM、PKGM 及 GS10、TMAM、YILN 共 5 個站。

由圖 8 中，可以看到與案例一類似的情況，使用 Bernese 5.0 所計算出的天頂向濕延遲量 (ZWD) 與 WVR 所量測之濕延遲趨勢很一致，但是跟案例一一樣會有偏移量，其偏移量為 2.47 cm，其相關係數為 0.93，在案例 2 中 YMSM 站，看它的降雨量與延遲量很明顯的看的出來颱風來時延遲量偏高，颱風過後延遲量就變低，在 53957 日累積雨量偏高，其主要原因為陽明山站受到颱風外圍鋒面的影響再加上地形的關係，所以累積雨量偏高。而與案例一 YMSM 站之偏移量數值相比，本案例偏移量數值偏高，其原因可能是因為颱風期間天氣變化量比較劇烈，造成精度較差。

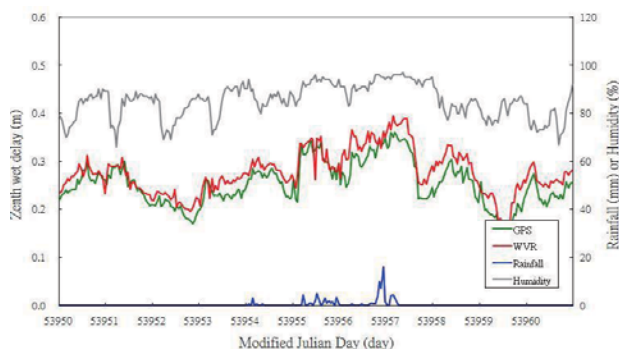


圖 8 YMSM 與竹子湖氣象站和 WVR 之折線圖

由圖 9 中，因為颱風的關係，導致 WVR 儀器發生故障，但還是可以看出在儀器故障前，53955 日之前使用 Bernese 5.0 所計算出的天頂向濕延遲量 (ZWD) 趨勢很一致，53950 日有明顯降雨而 GPS 所測得濕延遲量也有明顯上升的現象，在 53955 日之後因 WVR 儀器故障造成趨勢呈現不一致。本文取 53955 日前之數據做取用，所算之平均偏移量為 2.67 cm，其相關係數為 0.85，但都還算高相關。

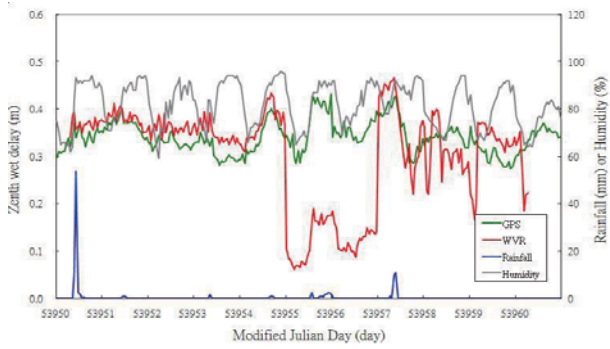


圖9 PKGM 與嘉義氣象站和WVR 之折線圖

四、結論與建議

- (1) 此研究將天頂向延遲量以每小時為一單位，故一天有 24 筆資料，經過演算法，WVR 與 GPS 所計算出來的 ZWD 趨勢非常一致，其相關係數很高。
- (2) 梅雨季 YMSM 站相關係數為 0.96，而計算出的 ZWD 偏移量為 1.19 cm；PKGM 站相關係數為 0.77，而計算出的 ZWD 偏移量為 1.42 cm。
- (3) 颱風季 YMSM 站相關係數為 0.93，而計算出的 ZWD 偏移量為 2.47 cm；PKGM 站相關係數為 0.85，而計算出的 ZWD 偏移量為 2.67 cm。
- (4) 長時間來看 YMSM 站相關係數為 0.94，而計算出的 ZWD 偏移量為 1.26 cm；PKGM 站相關係數為 0.91，而計算出的 ZWD 偏移量為 1.89 cm。
- (5) 在天氣變化極端劇烈的時候，可發現 GPS 所測得 ZWD 較 WVR 精準，如颱風時，降雨量與 GPS 所測之 ZWD 線幅度一致，但反觀 WVR 線卻沒跟著降雨量上升。
- (6) 目前用長基線相對定位來求解，故意不消對流層誤差，但訊號仍受電離層誤差之影響，未來採不需要主站，可改採精密單點定位方式來進行解算。

參考文獻

- 中央氣象局，2006。<http://www.cwb.gov.tw/>。
- 王傳盛，2009。對流層延遲效應與全球定位系統高成

- 定位之研究。國立中央大學博士論文。
- 張名漢，2007。應用海潮負載改正提昇 GPS 定位精度之研究，清雲科技大學空間資訊與防災科技研究所碩士論文，中壢。
- 蔡亦證，2005。近即時估計台灣 GPS 追蹤站網之對流層延遲效應，國立宜蘭大學土木工程學系碩士論文。
- 劉智中，2008。福衛三號低層大氣溫度資料分析，國立中央大學太空科學研究所碩士論文。