

GPS 無差分精密單點定位(PPP)技術應用於台灣 地區颱風之天頂對流層延遲量變化分析之研究 -以 2007 年聖帕颱風為例

The Study of the Variations of ZTD During the Passage of Typhoon SEPAT in
Taiwan Region using GPS Precise Point Positioning Technique

彭微之¹ 葉燕樺² 江凱偉³ 陳國華⁴ 陳鶴欽⁵
Wei-Chih Peng Yen-Hua Yeh Kai-Wei Chiang Kwo-Hwa Chen He-Chin Chen

摘 要

颱風是自然界最具破壞力的天氣系統，也是影響台灣最重要的災變天氣。目前應用 GPS 於氣象變化相關的研究亦因為全球氣候變遷日益趨於活躍且致命而受到更多的注意。分布全球的 IGS 之 GPS 觀測站可提供全球尺度的觀測資料，而 GPS 可提供的氣象參數主要以對流層為主。精密單點定位(Precise point positioning, PPP)技術是 GPS 研究領域的新興焦點之一，本研究藉由成大自行研發中的 PPP 軟體解算內政部國土測繪中心之五個 e-GPS 觀測站，於 2007 年聖帕颱風登陸台灣地區期間所蒐集的資料，以分析天頂對流層延遲變化量與颱風路徑之相關性。

關鍵字：精密單點定位、e-GPS、對流層延遲。

Abstract

Typhoons are the most serious weather systems in the nature and they are also the most devastating weather systems affecting Taiwan annually. Recently, the studies concerning the use of GPS as an alternative meteorological sensor have become extremely active due to the devastating impact of the global climate changes. Those well distributed GPS ground stations around the globe

¹ 國立成功大學測量及空間資訊學系 碩士生

² 國立成功大學測量及空間資訊學系 學士生

³ 國立成功大學測量及空間資訊學系 助理教授

⁴ 國立台北大學不動產與城鄉環境學系 助理教授

⁵ 內政部國土測繪中心 專員

can provide globally scaled observations for scientific studies. The primary meteorological parameter provided by GPS is the tropospheric path delay at zenith. The PPP technique is one of the most significant research topics in GNSS research communities. Therefore, the objective of this research is to use the measurements collected during 2007 SEPAT at five e-GPS sites provided by the Land Survey and Mapping Center, Ministry of the Interior, Taiwan, with a PPP software being developed at NCKU to analyze the correlation between the variations of the zenith tropospheric delays estimated by PPP and the path of typhoon SEPAT.

Keyword: Precise Point Positioning (PPP), e-GPS, Zenith Tropospheric Delays

一、前言

臺灣位於西太平洋地區，而該地區為全球颱風發生頻率最高之處，因此颱風所帶來的豪雨往往為臺灣地區造成嚴重的氣象災害，平均每年約有四至五個颱風會影響台灣，帶來巨大甚至具破壞性的強風及降雨量，打擊農業生產經濟並且影響土地資源利用，年年經濟損失甚者超越二十億台幣。因此，本文以颱風所帶來的影響，用 PPP 技術來討論台灣地區於颱風侵襲路徑上之天頂對流層延遲量變化分析的研究。

天頂對流層延遲量可分成兩個部份所組成：乾延遲量與濕延遲量。約 80~90%的總延遲量是來自乾延遲量所造成，可由對流層模型估算而得，誤差在 1%左右；而濕延遲量約佔總延遲量的 10~20%(Rizos, 2000)。在使用對流層改正模型後，濕延遲改正對公分等級的定位來說，影響量是相當大的，因此濕延遲量在本文視為未知參數。

二、精密單點定位(PPP)數學模式

基於傳統的動態 GPS 單點定位精度僅能達到公尺等級，很難滿足高精度定位的要求，因此差分 GPS(Differential GPS, DGPS)的作法因應而生，由於差分 GPS 定位方式可以消除或消弭大部分的接收機鐘差、衛星鐘差、對流層延遲……等影響，並可以達到公分以下等級的高精度，因此差分 GPS 在動態導航及精密靜態定位領域獲得相當肯定(楊名與江凱偉，2007)。不過，它需要建立基準站和移動站，且受限於基準站與移動站的作業距離影響，導致產生精度不均勻的現象，直接影響 GPS 定位的作業效率與精度。

精密單點定位(Precise Point Positioning, PPP)是利用高精度的 GPS 衛星星曆和衛星鐘差，以及單台接收機的雙頻載波相位觀測值進行定位，此一觀念最初是由美國太空總署之噴射推進實驗室(Jet Propulsion Laboratory, JPL) Zumberg 等人(1997)提出，並在他們所開發的數據處理軟體上予以實現。而 PPP 定位方法僅利用單台接收機即可在全球範圍內進行靜態或動態定位作業，再利用國際 GNSS 服務組織

(International GNSS Service, IGS)所提供的精密星曆，實現了全球都可以使用之高精度定位結果(Gao and Shen, 2001)。因此，精密單點定位在高精度的測量工程和動態的導航定位上均具有無可限量的應用前景。隨著 Galileo 和 GLONASS 等其他全球導航定位系統的相繼投入，可以預見精密單點定位在未來的 GPS 導航定位領域上，將可帶來一次新的技術革命。

精密單點定位的數學模式可表示如下(Teunissen, 1998)：

$$P(L_i) = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} + d_{ion/Li} + d_{mult/P(Li)} + \varepsilon(P(L_i)) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Phi(L_i) = & \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} - d_{ion/Li} + \lambda_i N_i + \lambda_i (\phi_r(t_0, L_i)) \\ & - \phi_s(t_0, L_i) + d_{mult/\phi(Li)} + \varepsilon(\Phi(L_i)) \end{aligned} \quad (2)$$

式中各符號分別為：

$P(L_i)$	在 L_i 波段(頻道)量測到之虛擬距離 (m)；
$\Phi(L_i)$	在 L_i 波段頻道量測到之載波相位 (m)；
ρ	真實的幾何距離 (m)；
c	光速 (m/s)；
dt	衛星時錶差 (s)；
dT	接收機時錶差 (s)；
d_{orb}	軌道誤差 (m)；
d_{trop}	對流層延遲 (m)；
$d_{ion/Li}$	在 L_i 波段(頻道)的電離層延遲 (m)；
λ_i	L_i 載波之波長 (m)；
N_i	L_i 載波之整數週波位定值 (cycle)；
$\phi_r(t_0, Li)$	接收機振盪器之初始相位；
$\phi_s(t_0, Li)$	衛星振盪器之初始相位；
$d_{mult/P(Li)}$	虛擬距離之多路徑效應 (m)；
$d_{mult/\phi(Li)}$	載波相位之多路徑效應 (m)
$\varepsilon(.)$	觀測量雜訊 (m)。

如果將原始相位和整數相位整合在一起，則第(2)式可以改寫成：

$$\Phi(L_i) = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} - d_{ion/Li} + \lambda_i N_i + d_{mult/\phi(Li)} + \varepsilon(\Phi(L_i)) \quad (3)$$

此時 N_i 不再是整數的形式，而無電離層組合另可由雙頻接收器來組成，其虛擬距離 (P_{IF}) 及載波相位 (Φ_{IF}) 可表示如下：

$$P_{IF} = \frac{f_1^2 \cdot P(L1) - f_2^2 \cdot P(L2)}{f_1^2 - f_2^2}$$

$$= \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} + d_{mult/P(L1+L2)} + \varepsilon(P(L1 + L2)) \quad (4)$$

$$\Phi_{IF} = \frac{f_1^2 \cdot \Phi(L1) - f_2^2 \cdot \Phi(L2)}{f_1^2 - f_2^2}$$

$$= \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} + \frac{cf_1N_1 - cf_2N_2}{f_1^2 - f_2^2} + d_{mult/P(L1+L2)} + \varepsilon(\Phi(L1 + L2)) \quad (5)$$

Gao and Shen (2001) 曾利用電碼的平均值和載波相位觀測量而提出了一個新的組合，如下式：

$$P_{IF,Li} = 0.5(P_{SM}(Li) + \Phi(Li)) \quad (6)$$

$$= \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} + 0.5\lambda_i N_i + 0.5d_{mult/P(Li)} + 0.5\varepsilon(P(Li))$$

其中之 $P_{SM,(Li)}(n) = \frac{1}{m}P_{Li}(n) + (1 - \frac{1}{m})(P_{SM,Li}(n-1) + \Phi_{Li}(n) - \Phi_{Li}(n-1))$

$$= \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} + d_{mult} + 0.5\lambda_i N_i + \varepsilon(P_{SM,Li}(n)) \quad (7)$$

式中，

- P_{SM} 平滑後的電碼觀測量
- m 平滑過程所使用之時刻數
- n 目前時刻之指標
- $n-1$ 前一個時刻之指標

由(5)和(7)可知道時錶差和軌道誤差仍然存在，因此加入 IGS (International GNSS Service) 所提供的精密軌道和時鐘改正後，(5)和(7)可以改成如下：

$$\tilde{P}_{SM,Li}(n) = \rho - c \cdot dT + d_{trop} + 0.5\lambda_i N_i + \varepsilon(P_{SM,Li}(n)) \quad (8)$$

$$\tilde{\Phi}(n) = \rho - c \cdot dT + d_{trop} + a_1\lambda_1 N_1 + a_2\lambda_2 N_2 + \varepsilon(\Phi(L1 + L2)) \quad (9)$$

由上式可知，軌道誤差、鐘錶誤差與多路徑效應已被移除，方程式(8)和(9)是由卡加立大學所發展的觀測模型，此模型可以估計位置、接收機時鐘和 L1 和 L2 頻率的周波未定值(Gao and Shen, 2001)。除此之外，本研究亦使用了相對論效應、Sagnac 效應、固體潮、大洋負荷、衛星天線位移改正及對流層等改正模型；亦使用 Neil 模型作為對流層模型的映射函數(Parkinson and Spilker, 1996)。圖 1 所示即為本研究所採 GPS 精密單點定位之處理策略。

而天頂對流層延遲量可以被模式化如下：

$$d_{trop} = m_h(e) \cdot D_{hz} + m_w(e) \cdot D_{wz} + m_g(e) \cdot [G_N \cdot \cos(a) + G_E \cdot \sin(a)] \quad (10)$$

D_{hz}	天頂乾對流層延遲	
D_{wz}	天頂濕對流層延遲	
G_N	向北的水平延遲梯度	
G_E	向東的水平延遲梯度	
m_h	乾分量的映射函數	
m_w	濕分量的映射函數	
m_g	梯度映射函數	
a	方位角	
e	仰角	
$m_g(e) = \frac{1}{\sin(e) \cdot \tan(e) + 0.0032}$		(11)

以上對流層梯度的估計量都要帶入計算求得水平大氣變化量。本文使用 Niell 映射函數 (NMFs) 來估算對流層延遲量，而式 (11) 為本文為所使用的梯度函數；在此研究剛開始會使用已知的資料剔除乾分量，而濕分量部分和一些乾分量的殘差將會被估算出來。

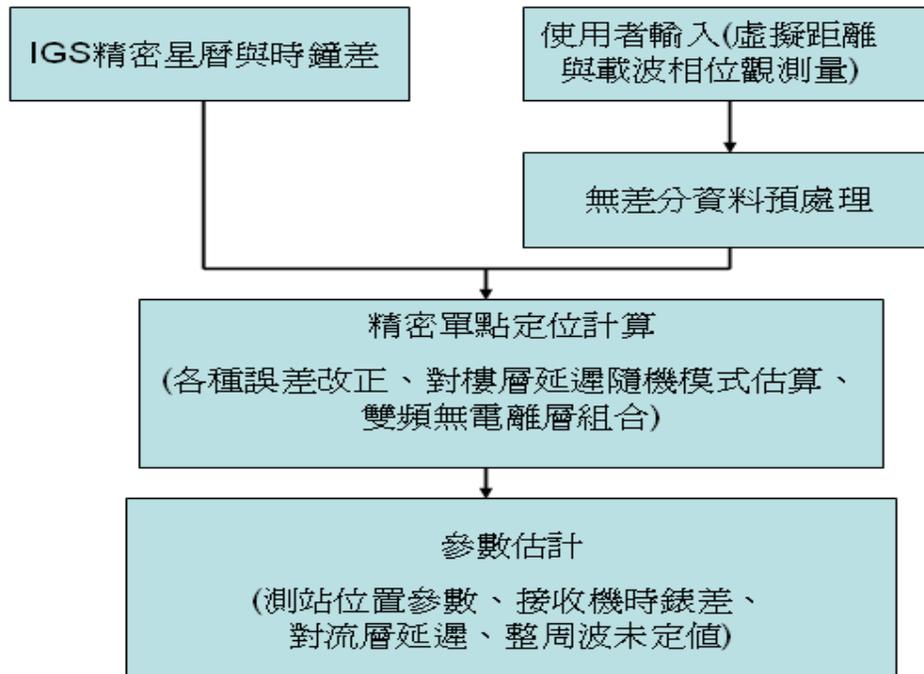


圖 1、PPP 資料處理策略

GPS 精密單點定位技術相較於傳統差分定位技術具有顯著的優勢。第一，過去許多 GPS 用戶需要通過高精度靜態數據處理軟體，併同 IGS 永久追蹤站進行較長時間的聯測才能獲取高精度的 ITRF(International Terrestrial Reference frame)起算坐標；且對許多具有需求的人來說，能夠熟悉高精度軟體的處理並非易事；而現在商用軟體通常僅能處理數十公里以內的基線，故採用精密單點定位當可解決上述問題(Kouba and Héroux, 2000)。IGS 有許多不同的數據處理中心，每天處理全球幾十個甚至幾百個 GPS 追蹤站的數據，計算並發佈高精度的衛星軌道和衛星鐘錶產品。用戶可以直接利用 IGS 的產品，而精密單點定位技術也就可以得到在 ITRF 框架下的高精度成果。

第二，採用精密單點定位可以大幅降低用戶購買接收機的成本，因為精密單點定位技術只需要單台接收機就可以實現高精度的靜態或動態定位。且在未來若搭配 Galileo 與現有正在進行現代化的俄國 GLONASS，太空中就多了可以提供精密單點定位運用的衛星，將大量提升精密單點定位的精度和可靠性。此外，由於精密單點定位可利用無差分模型，故沒有衛星間求差之問題，所以在多系統組合定位中，處理比二次差分模型簡單，也由於沒有觀測值間求差，模型中可保留所有的訊息，這對於從事大氣、氣象和潮汐等相關領域之研究具有優勢(Gao and Shen, 2001)。表 1 所示即為 IGS 服務所提供之產品內容。

表 1、IGS 之產品（摘自 <http://igs.cb.jpl.nasa.gov/network/netindex.html>）

產品型態	精度	時間延遲	更新時間	取樣間隔
廣播星曆 (Broadcast)	~260 cm/~7ns	Real time	--	daily
最快速星曆 (Ultra-rapid)	~25 cm/~5ns	Real time	twice daily	15 min/15 min
快速星曆 (Rapid)	5 c /0.2ns	17 hours	daily	15 min/5 min
最終星曆 (Final)	< 5 cm/0.1ns	~13 days	weekly	15 min/55 min

三、研究方法與步驟

e - GPS 為內政部國土測繪中心建構之高精度電子化全球衛星即時動態定位系統，基本定義為架構於網際網路通訊及無線數據傳輸技術之 GPS 即時動態定位系統，其中字母“e”係具有「電子化」及「網路化」之含意。

透過即時傳輸全國各地衛星基準站每天 24 小時 1Hz 之連續性衛星觀測資料，並經由控制及計算中心對於各基準站觀測資料進行整合計算處理。目前在臺灣本島（含綠島、蘭嶼）及澎湖、金門、馬祖地區，只要可以同時接收 5 顆以上 GPS 衛星訊號，都可以利用 GPRS 無線上網的方式，在極短的時間內，獲得高精度的定位坐標成果。另外，由於其具有空間位置資訊服務（Location Based Service, LBS）之多功能、多目標等特性，在今日一切講求行動化、高效率的應用與加值的普遍需求下，特別是針對 21 世紀三大產業之一的「空間資訊」這塊領域，將扮演重要的角色，也將直接導引國內各項與空間資訊相關的基礎建設及民生產業進入行動 e 化的時代。

e-GPS 的特性

- (一) 採用網路傳輸技術”即時”結合多個基準站觀測資料，建構區域性定位誤差改正模型，提供 RTK 使用者更準確、可靠的定位誤差修正資訊，有效擴展 RTK 的作業距離。
- (二) 採用行動式 (Mobile) 通訊技術取代傳統無線電數據機，傳輸 RTK 定位所需的定位資訊。
- (三) 建置 24 小時連續觀測的固定式基準站，RTK 使用者不須自行架設主站，可大幅節省作業時間、提升產能及降低作業成本等經濟效益。
- (四) 各基準站長期連續的觀測資料經過嚴密的基線計算及網形平差分析，可提升基準站間之相對精度。

e-GPS 的優點

- (一) 可擴大有效作業範圍，提高定位精度及可靠度。
- (二) 測量誤差及初始化時間不因距離增長而增加。
- (三) 使用者無須架設區域性主站。
- (四) 單人單機即可作業。
- (五) 可縮短作業時間，增加產能，降低作業成本。
- (六) 所有使用者皆在同一框架下進行即時定位。
- (七) 可提供全面性的定位成果品質監控。

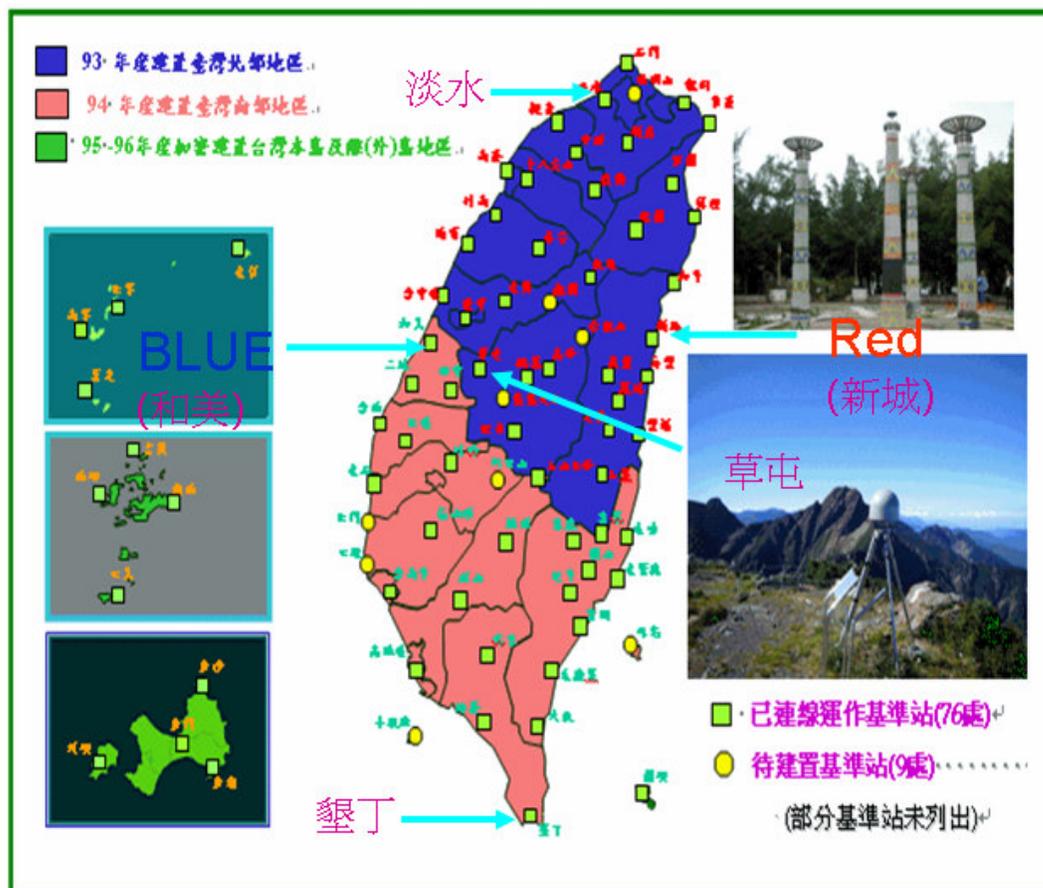
本研究將利用精密單點定位技術處理內政部國土測繪中心佈設之五個台灣 e-GPS 觀測站於 2007 年聖帕颱風 (SEPAT) 侵襲台灣期間之觀測資料。內政部國土測繪中心之 e-GPS 觀測站全區分布圖如圖 3 所示，本研究之資料處理流程如圖 4 所示。各步驟之研究內容可區分如下：

1. 資料蒐集：與國土測繪中心洽談蒐集颱風登陸前三天至颱風離台後三天之基準站觀測資料。
2. 參數估算：分別利用精密單點定位技術與差分技術進行各點位座標之解算，

並利用精密單點定位技術估算各點位的對流層延遲量。

3. 精度分析:分別將精密單點定位技術與差分技術所得之點位座標與已知座標相比較以獲得相關之精度分析指標。

卡加大學實驗結果得知(Abdel-salam, 2005), 利用精密單點定位技術所解算天頂對流層延遲量與水汽輻射計(water vapor radiometer,WVR)比較之下, 兩者的差異只在公分等級, 因此利用精密單點定位所得的結果是理想的; 而在點位的精度分析上, 由於本文著重在局部趨勢變化的情況, 故單一點位的精度差異並不是那麼重要。



e-GPS 衛星定位基準站分布略圖

圖 3、e-GPS 衛星定位基準站分布圖 (摘自內政部國土測繪中心網站)

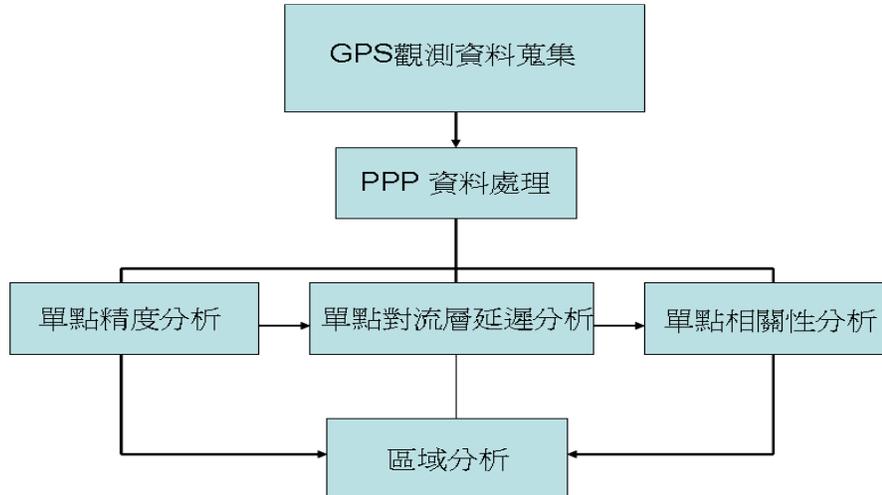


圖 4、本研究之資料處理流程

四、成果分析

本研究所探討的颱風資料為 2007 年聖帕颱風，時間為 2007 年 08 月 17~19 日，此颱風在秀姑巒溪附近河口登陸，並在濁水溪口附近離開，颱風半徑約為 250 公里，因此本研究採用了新城、墾丁、和美、淡水和草屯等五個站，分別代表了台灣的東南西北中部，利用這五個 GPS 站探討颱風路徑與對流層延遲變化的相關性。圖 5 所示為聖帕颱風侵台之軌跡。

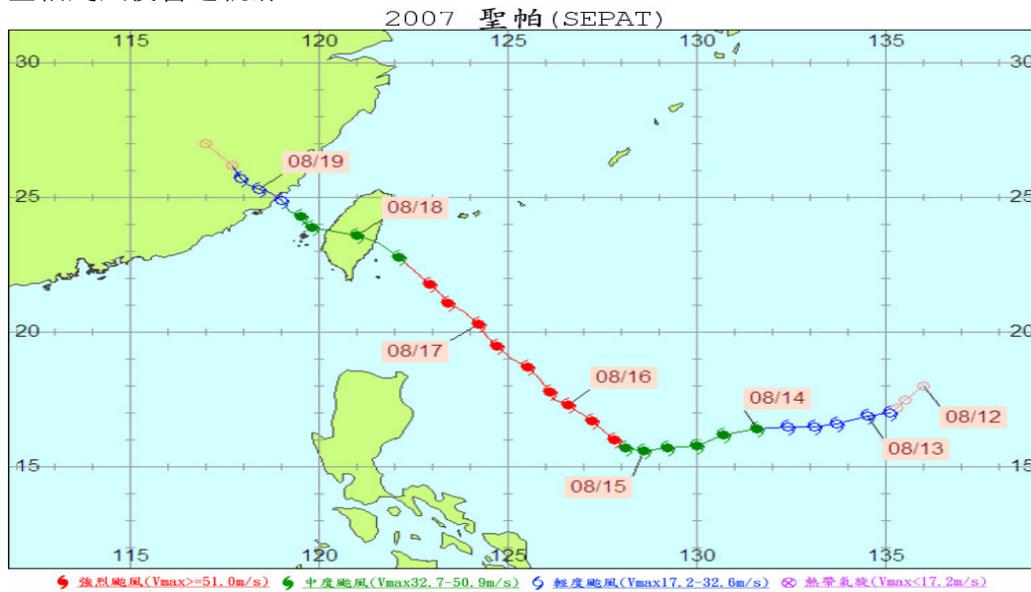


圖 5、2007 年聖帕颱風軌跡路徑圖 (摘自中央氣象局網頁)

經由本系自行開發中的精密單點定位軟體解算後，可以得到各站連續的對流層延遲變化量。圖 6 至圖 10 分別表示在颱風登陸前、後 72 小時(2007/08/17~2007/08/19)之對流層延遲變化量。圖 11 為登陸、離台前、後之對流層延遲變化量(每一個值減去新城站與和美站第一筆的值)。

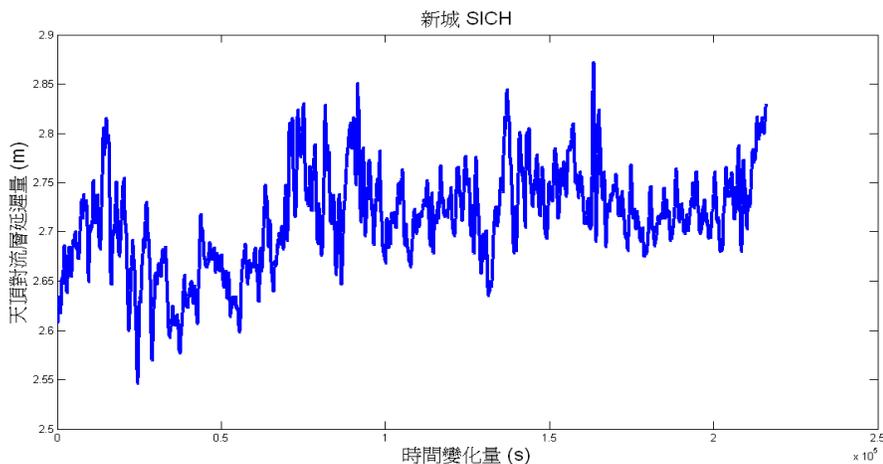


圖 6、花蓮新城站(SICH)對流層延遲變化量(東部站)

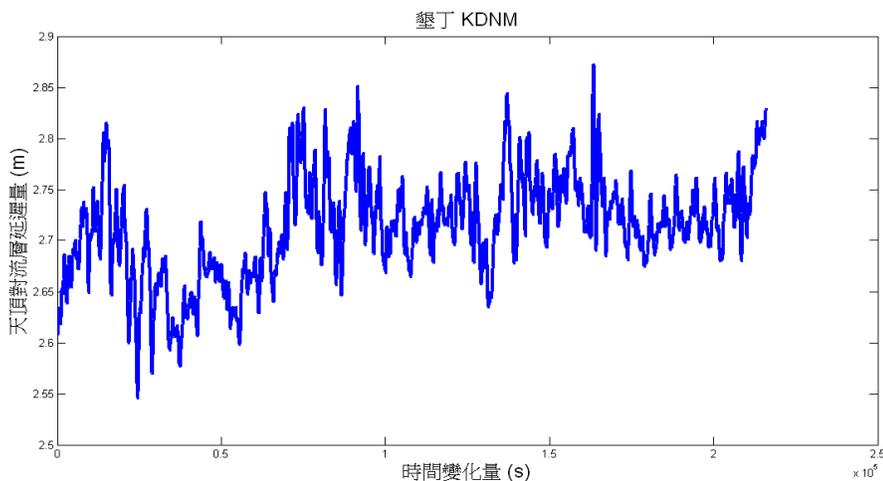


圖 7、屏東墾丁站(KDNM)對流層延遲變化量(南部站)

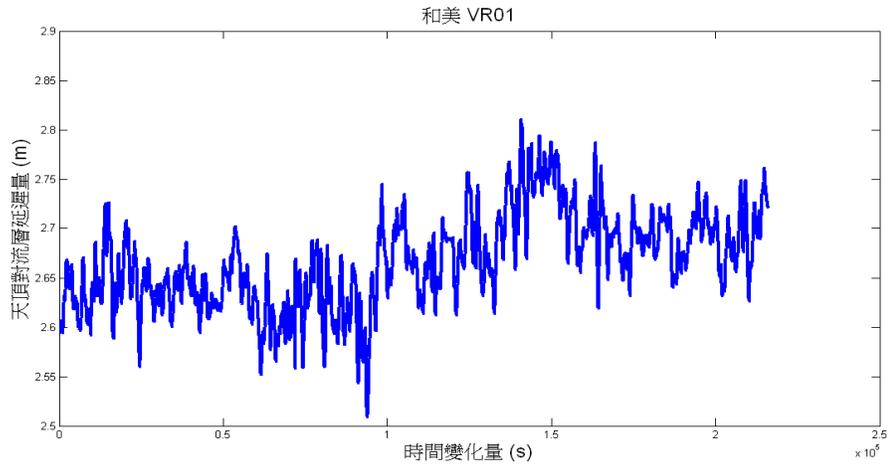


圖 8、彰化和美站 (VR01) 對流層延遲變化量 (西部站)

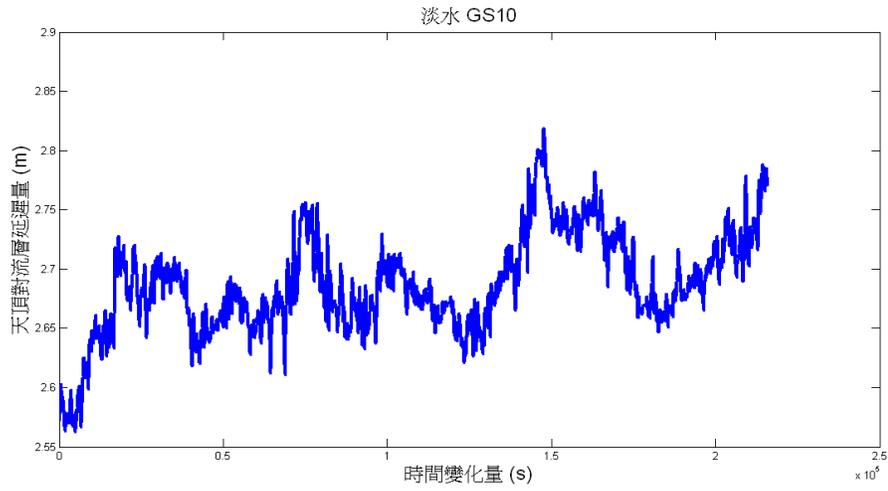


圖 9、台北淡水站 (GS10) 對流層延遲變化量 (北部站)

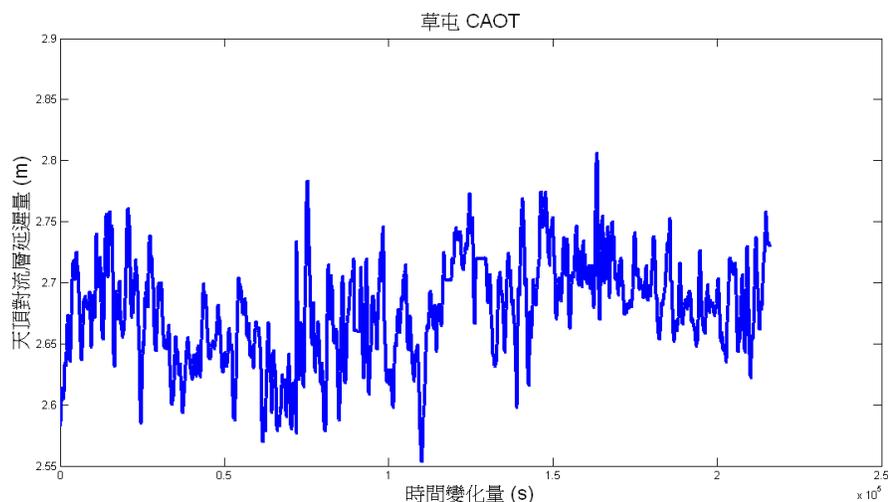


圖 10、南投草屯站(CAOT)對流層延遲變化量(中部站)

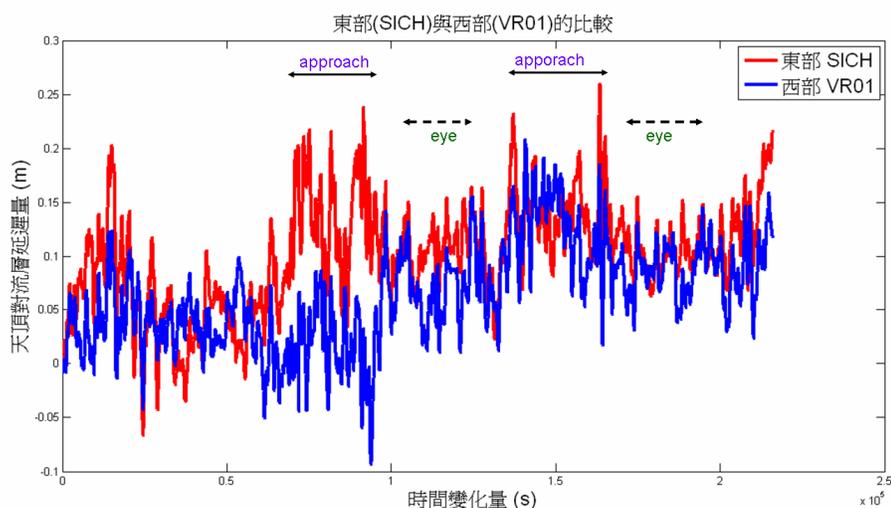


圖 11、東部(SICH)與西部(VR01)對流層變化量的比較

由圖 6 至圖 11 可看出，東部、中部和西部的對流程延遲變化量因颱風行徑路線的時間差而有所不同，颱風首先登陸台灣東半部，因此新城站(SICH)對流層延遲變化的時間要比其他四站都還要來得快；而中部草屯站(CAOT)對流層延遲變化量在颱風通過東部後也逐漸上升；當颱風逐漸往西半部移動時，我們也發現西部和美站(VR01)的對流層延遲變化也在上升，由圖 11 可以明顯看到當颱風經過東半部，它的變化時間點會較快亦較大，而西半部會比較慢一點。由於南部墾丁站(KDNM)和北部淡水站

(GS10)與颱風距離較遠，只有外圍的氣流影響，因此其對流層變化量較不比颱風所經過的站變化明顯。

以下如圖所示為颱風路徑與對流層延遲量之時間序列關係圖，圖 12a~12e 為 2007 年 08 月 17 日全台對流層延遲量分布圖，圖 13a~13g 為 2007 年 08 月 18 日，圖 14a~14d 為 2007 年 08 月 19 日。由以下的圖可以發現數個重要的氣象現象。當颱風靠近台灣本島的時候，各地方的對流層延遲量均普遍上升，並在當地產生豪雨，符合颱風過境時產生的地形雨現象；當颱風眼接觸到陸地的時候，可以發現在其籠罩的地區呈現無風無雨的狀態，此時對流層的延遲量偏低，符合氣象學的特性；當颱風準備離開陸地的時候，颱風外圍環流與強大的西南氣流結合，造成西南部地區有重大的豪雨出現，此時西南地區的對流層延遲量也明顯看出有上升之情形。以下圓形為颱風之範圍。

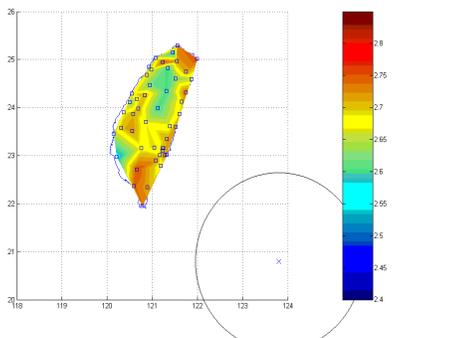


圖 12a、96.08.17 11:00 對流層延遲量分布圖

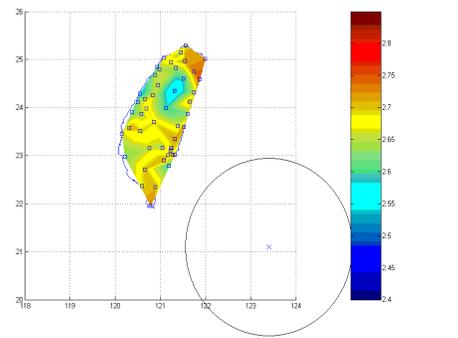


圖 12b、96.08.17 14:00 對流層延遲量分布圖

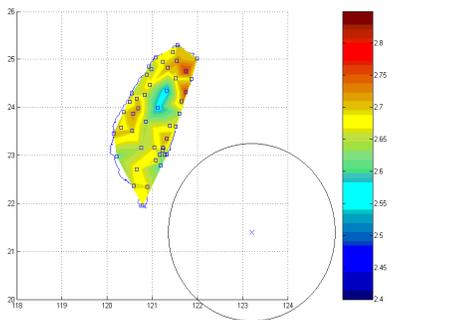


圖 12c、96.08.17 17:00 對流層延遲量分布圖

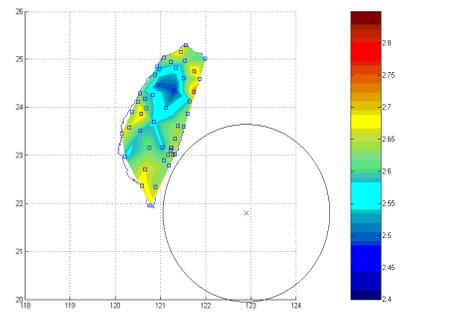


圖 12d、96.08.17 20:00 對流層延遲量分布圖

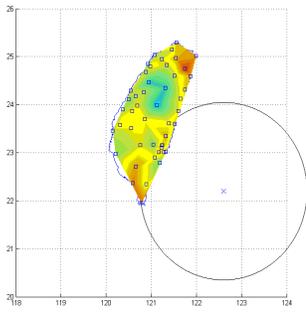


圖 12e、96.08.17 23:00 對流層延遲分布圖

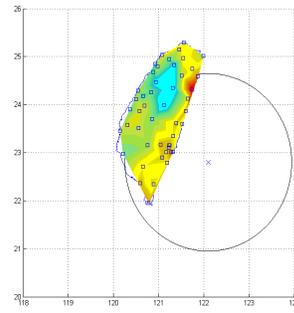


圖 13a、96.08.18 02:00 對流層延遲量分布圖

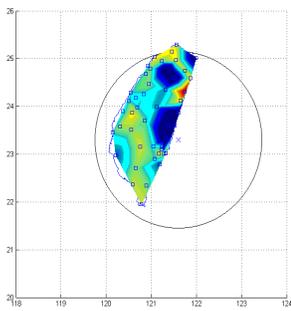


圖 13b、96.08.18 05:00 對流層延遲量分布圖

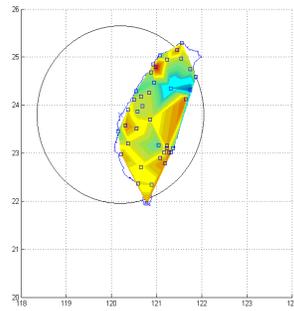


圖 13c、96.08.18 11:00 對流層延遲量分布圖

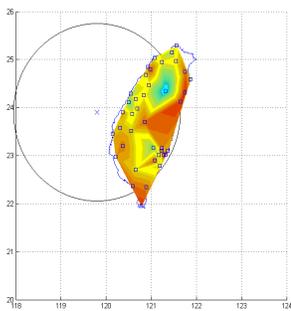


圖 13d、96.08.18 14:00 對流層延遲分布圖

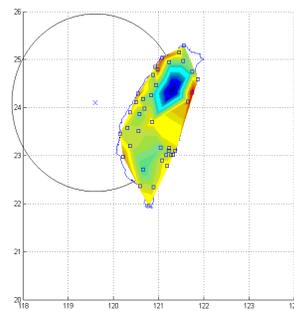


圖 13e、96.08.18 17:00 對流層延遲量分布圖

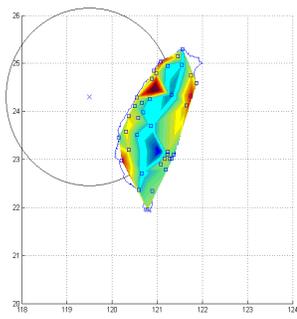


圖 13f、96.08.18 20:00 對流層延遲量分布圖

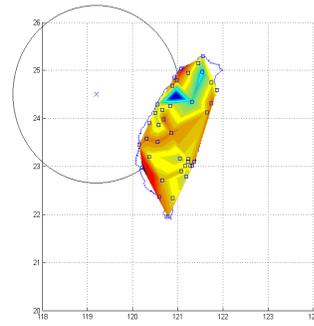


圖 13g、96.08.18 23:00 對流層延遲量分布圖

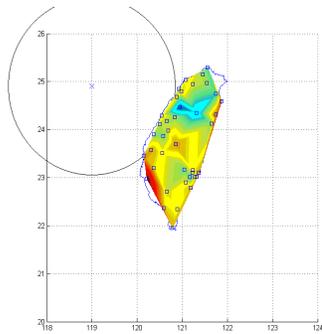


圖 14a、96.08.19 02:00 對流層延遲量分布圖

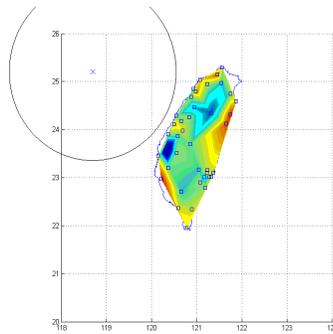


圖 14b、96.08.19 05:00 對流層延遲量分布圖

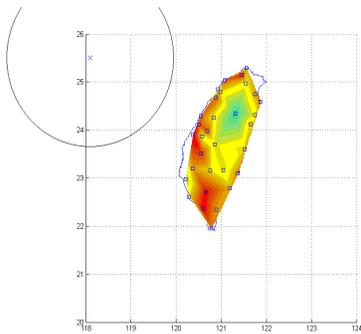


圖 14c、96.08.19 11:00 對流層延遲量分布圖

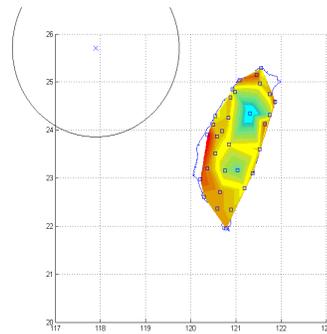


圖 14d、96.08.19 14:00 對流層延遲量分布圖

五、討論與未來展望

傳統 GPS 單點定位精度僅能達到公尺級，難以滿足高精度定位要求，因此衍生有差分 GPS 之作法，雖然差分 GPS 可以消除大部分的誤差，並達到公分等級的精度，但是受限於須建立基準站和作業距離的影響，而有精度不均的情形發生。

利用精密單點定位不但可以節省購置成本，達到有效的測量應用。藉由本研究之成果，吾人可以利用 GPS 資料來探討颱風在台灣所帶來的影響及週遭環流的效應，亦驗證天頂對流層延遲量與颱風於台灣之時空相關性。然而，若能加以分析三維座標、濕對流層延遲之變化與落雨量、颱風移動軌跡之相關性，並將點位的三維坐標變化量及濕對流層延遲量進行區域的變化趨勢與梯度計算，並進行與颱風移動軌跡相關性之深入探討，吾人相信此作法必定可以更準確地以後處理方式來推算颱風行徑路徑。

致謝

感謝內政部國土測繪中心提供 e-GPS 觀測站的相關資料與成功大學工學院明日之星研究計畫之經費資助，在此致上十二萬分的謝意。

參考文獻

- 楊名與江凱偉，2007，全球導航衛星系統(GNSS)資料聯合處理技術期末報告(95 年度)，內政部土地測量局，台南，共 175 頁。
- Abdel-salam, M.A. 2005, Precise Point Positioning Using Un-Differenced Code and Carrier Phase Observations, Ph.D. thesis, September 2005, UCGE Report 20229.
- Gao, Y. and X. Shen, 2001, Improving Ambiguity Convergence in Carrier Phase-Based Precise Point Positioning, *ION GPS*, Salt Lake City, UT, pp. 1532-1539.
- Kouba, J And P. Héroux, 2000, Precise Point Positioning Using IGS Orbit Products, *GPS Solutions*, Vol. 5, No. 2, Fall, pp. 12-28.
- Parkinson, B. W., and J. J. Spilker, 1996, Global Positioning System: Theory and Applications, Vol. I, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Washington, D. C.
- Zumberge J. F., M. B. Hefflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins and F. H. Webb, 1997, Precise Point Positioning For The Efficient And Robust Analysis Of GPS Data From Large Networks, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, pp. 5005-5017.
- Teunissen, P. J. G., 1998, Minimal detectable biases of GPS data, *Journal of Geodesy*, vol. 72, pp. 236-244.
- Rizos, C., 2000. GPS survey technology: Why doesn't every Surveyor own a kit? *Surveying World*, 8(4), 26-29.