

交通部中央氣象局
委託研究計畫期末成果報告

強化地基 GPS 衛星資料處理和天氣預報之應用 (2/3)

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB-105-M-02

執行期間：105 年 3 月 3 日至 105 年 12 月 31 日

計畫主持人：葉大綱教授

執行機構：國立臺北大學

本成果報告包括以下應繳交之附件(或附錄)：

赴國外出差或研習心得報告 1 份

赴大陸地區出差或研習心得報告 1 份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各 1 份

中華民國 105 年 11 月 23 日

政府研究計畫期末報告摘要資料表

計畫中文名稱	強化地基 GPS 衛星資料處理和天氣預報之應用 (2/3)		
計畫編號	MOTC-CWB-105-M-02		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	國立臺北大學		
年度	105	執行期間	105 年 3 月 3 日至 105 年 12 月 31 日
本期經費 (單位：千元)	565 千元		
執行進度	預定 (%)	實際 (%)	比較 (%)
	100%	100%	0%
經費支用	預定(千元)	實際(千元)	支用率 (%)
	565 千元	565 千元	100%
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	葉大綱	蕭棟元	
報告頁數	43 頁	使用語言	中文
中英文關鍵詞	全球定位系統、地基、天頂向總延遲量、可降水量 GPS, ground-based, zenithal total delay, precipitable water vapor		
研究目的	<p>(1) 針對現有作業之地基 GPS 資料處理系統，開發必要的作業維運監控機制，並維運地基 GPS 資料處理備援系統。</p> <p>(2) 備援系統升級至 Bernese 5.2 版。</p> <p>(3) 測站清單更新，並進行測站分級之探討，以提升檔案接收品質。</p> <p>(4) 分析與評估精密單點定位 (Precise Point Positioning, PPP) 技術在即時 GPS 處理應用之可行性。</p> <p>(5) 持續進行 ZTD 和可降水量產品之品管和特性分析，以強化其在天氣監測與分析之應用。</p>		
研究成果	<p>在資料完整度部分，POST 解、DP 解與 NRT 解三種方法若從 105 年 DOY 167 開始統計，可以發現時間延遲兩小時 NRT 的成果，65.3%左右的 GPS 觀測資料已可回傳至計算伺服器進行計算；若分析 DP 的結果，時間延遲兩天之後已可接收到 87.9%左右的 GPS 觀測資料；最後來看 POST 的成果，發現時</p>		

	<p>間延遲兩週之後，GPS 資料的完整度提升至 91.0%，顯示大部分的資料已在兩天內回傳至中央氣象局的資料庫中。但若看今年全年的結果，三種解算機制的資料完整度平均下降 10%，其原因來自於解算清單更新及網路傳輸問題。</p> <p>在解算誤差部分，DP 解與 NRT 解兩種方法若從 105 年 DOY 167 開始統計，以 POST 解作為參考值（真值），可以發現時間延遲兩小時 NRT 的成果解算誤差為 2.5 cm，分析 DP 的結果，時間延遲兩天之後其誤差已提升至 1.5 cm；但若看今年全年的結果，NRT 的解算誤差上升至 3.5 cm，DP 的解算誤差僅些微上升至 2.2 cm，未來仍須設法解決 GPS 資料即時傳輸的問題，方能有效解決此一狀況。</p> <p>若欲提升系統解算時效，可朝向下列方向來進行：</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 調整啟動時間（已完成），由原本的單數小時 25 分提前為單數小時 5 分開始抓取資料，但資料完整度有些微的下降趨勢，顯示測站資料尚未即時回傳至資料庫。 (2) 僅計算測站分級中資料品質較佳且資料較完整的測站，測站計算數可由 147 站下降至 111 站左右。 (3) 嘗試修改資料下載程式，但可行性及效能尚無法評估。 (4) 改以串流方式下載 GPS 資料，目前已有初步成果但仍須 貴局地震測報中心及 TACC 同仁協助。 (5) 改以精密單點定位（Precise Point Positioning, PPP）解算方式取代現行的二次差分定位（Double Difference Positioning, DDP），可解決目前仰賴國外 IGS 測站進行相對定位的不確定性，但在解算即時性的提升上成效有限。
<p>具體落實應用情形</p>	<p>目前中央氣象局 GPS 觀測站共計 168 站，刪除資料無法即時回傳之測站後，剩餘 146 站納入分級統計。</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 刪除測站資訊不完整之測站：GUK2（刪除 1 站，剩餘 145 站） (2) 刪除 NRT 平均誤差大於 5.2 公分之測站：BLOW、FENP、FKDO、FLON、GAIS、MUDA、WANC（刪除 7 站，剩餘 138 站） (3) 刪除資料完整度介於 50%~60% 的綠色測站（考量地理區位保留 5 站）：CLON、DPIN、FKD2、HANS、HOPN、NJOU、PAKU（刪除 7 站，剩餘 131 站） (4) 刪除資料完整度介於 40%~50% 的黃色測站（考量地理區位保留 3 站）：AKND、CHEN、CHIA、GUKN、HSIN、HUAL、KUAN（刪除 7 站，剩餘 124 站） (5) 刪除資料完整度 30% 以下的橘色測站（考量地理區位保留 4

	站)：ANKN、CHIH、CTOU、CWBN、FIVE、GUKW、KASU、NIUT、PENL、SANI、SPAO、SUCH、WAN2 (刪除 13 站，剩餘 111 站)
計畫變更說明	無
落後原因	無
檢討與建議 (變更或落後 之因應對策)	無

一、前言

臺灣為四面環海的海島型國家，終年氣候受海洋影響，平均年雨量高達 2,500 mm 以上（葉俊明，2013）。北回歸線以北係副熱帶季風氣候，北回歸線以南係熱帶季風氣候。受到地形、氣候以及季節變換的影響，臺灣南北的降雨的時間以及空間呈現相當大的差異；夏季降雨主要受到西南季風（south-west monsoon）以及颱風（typhoon）的影響，溫暖的西南季風伴隨著豐富的水氣自臺灣海峽、巴士海峽吹拂而來，使得雨量集中在臺灣中、南部地區以及中央山脈，最大平均降雨在 2,200 mm 以上，此外颱風也會帶來豐沛的降雨量，且颱風中心有登陸的颱風個數與年降雨量具有明顯的相關性；冬季盛行東北季風（north-east monsoon），受迎風面影響，東北部地區較易降雨，但由於雪山山脈將東北季風所帶來的大部分水氣攔截，因此中、南部地區冬天較不易降雨（洪麗娟，2009）。

近年來，由於全球暖化導致氣候變遷，海溫的上升使南、北極的融冰加速融化，同時造成全球海平面上升，發生災害型天氣的機率也增加。除了全球暖化所導致的氣候變遷外，臺灣由於位處副熱帶、熱帶季風氣候交界處，不但四面環海，且地形複雜，來自不同地區的天氣系統在各地所造成的天氣變化也有所不同；同時，受到聖嬰現象（El Niño）的影響，臺灣的氣候也產生了變化。在氣候以及地形條件疊加的影響下，相較於其他國家也更容易引發災害型天氣，在臺灣發生的災害型天氣，包括強風、大雨、豪雨、颱風、閃電、冰雹、焚風、乾旱等（交通部中央氣象局，2015）。受氣候變遷的影響，臺灣冬、春季發生乾旱的情形不但越趨頻繁，降雨量越趨於集中夏季，在短時間內降下暴雨事件的機率也增加不少，颱風所帶來的雨量也越來越驚人，洪患發生的機率也提升許多，若應變不及，可能危害人民的財產及生命安全，而這也促使氣象預報精準確度必須同步提升，時間尺度也必須掌握在 1 至 3 小時內。

此外颱風於每年夏、秋季盛行，經氣象局統計平均每年有 3 至 4 個颱風侵襲臺灣，所造成的經濟與農業損失雖龐大，但另一方面，水庫也需仰賴颱風所帶來大量的雨水挹注。洪麗娟（2009）研究指出，年雨量與每年登陸臺灣的颱風個數

相關係數為 0.695，由此可知颱風降雨確實是臺灣的重要降雨來源之一。事實上，我們需要颱風所帶來的雨水，同時又不希望颱風所帶來的驚人風雨造成重大的損失，我們不但要在颱風來襲時做好防範措施，事前了解颱風可能為各地所帶來的降雨強度，更是有所必要，因此竭盡一切可用之方法及技術來研究及監測地球環境變遷、氣候和氣象之變化，實是當前必要之急。而全球衛星導航系統（Global Navigation Satellite System, GNSS）挾著其不受天候因素的影響、全天候 24 小時觀測以及遍佈陸地及海洋的全球觀測網絡，可說是對地球大氣研究及監測相當有助益的一項利器。

GNSS 發展至今，已在諸多領域中受到廣泛的應用。其中有關氣象科學上的應用，可稱之為 GNSS 氣象學（GNSS Meteorology），其主要目的在於利用地球大氣對於 GNSS 衛星信號所造成延遲效應，反演得到有用的大氣資訊，從而增進大氣科學、氣象學等相關學術研究領域之發展。在大氣層中，氮氣、氧氣與氫氣維持固定的比例，而水氣、二氧化碳等則是變動氣體，隨著位置與時間的不一樣而有不同的量，其中變化最大的是水氣，平均而言其變動量為 1%。水氣主要分布在低層的大氣層中，50%的水氣集中在地表至其上方 2 公里的大氣層之中，75%集中在地表至 4 公里，99.99%集中在地表至對流層頂。水氣在大氣中所佔的比例很小，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（闕珮羽，2011），因此水氣在氣象預報與氣象監測中，扮演了很重要的角色。能夠精準與快速的求取大氣的水氣含量，將會裨益氣象預報與增進對地球水循環的了解。

由於偵測大氣可降水量（Precipitable Water Vapor, PWV）變化對於掌握特定天氣現象具有相當大的幫助，因此對天氣預報來說，大氣降水量的估計具有其重要性。近年來，GNSS 訊號應用越來越廣泛，運用於 PWV 的估算上，將可以彌補探空氣球觀測大氣可降水量時，空間限制及時間解析度上的不足（蔡亦證，2005）。在過去較常使用的氣象觀測方法中，不論是地面氣象觀測儀器或是探空

氣球所量測而得的大氣資料，皆僅是點狀的分佈在大陸及小島上，對於海水分佈占地表面積 70% 的地球來說，這樣的資料顯然不足；且探空氣球受到氣球飛行高度限制，使得飛行限制高度至衛星之間尚存有一段無法測量的區域，而在相關的研究中發現，此段稀薄的中性大氣造成的訊號遲延量，佔整體遲延量約在 6~8% 之間（何人豪，2002）；因此，將此段空氣造成的遲延量彌補以後，整段的遲延量才能拿來做為修正地面氣象模式的依據。

就地基 GNSS 訊號反演技術而言，應用連續觀測的 GNSS 衛星定位觀測資料可以獲得大氣中水氣含量的動態變化，提供高精度、高時空解析度、近即時連續的可降水量變化，可提供服務於氣象學研究，並可大大提高監測突發性天氣的能力；對於改進天氣短期預報，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功用。目前，美國大氣和海洋管理局的地基 GNSS 氣象網每 30 分鐘即可算出測站上空 PWV 的變化結果；而日本由 1000 多個測站所組成的 GNSS 網，也已兼顧地基 GNSS 氣象學的應用，根據評估 PWV 的監測精度優於 2 mm，觀測結果與實際降雨量之間也存在良好的相關性，充分顯示出地基 GNSS 預報天氣的潛力。

中央氣象局在台灣全島已經佈設約 160 座的地面 GPS 連續接收站，且其觀測資料大多已可透過網路即時回傳到資料中心；也就是因為在這樣的時空背景下，我們已經可以輕易的獲得全台灣地區的即時性 GPS 連續觀測資料，使得本研究可以在近即時的條件下，分析台灣地區的對流層水氣含量，進而提高氣象預報更新的頻率，亦應用於長時間之氣候變遷現象之監測、進行全球太空天氣之預報，對於未來對於天氣預報、環境監測及資源災害的監控，亦可提供適當的資訊，供決策者規劃設計之用。

二、研究目的及意義

本研究除了將針對中央氣象局 GPS 自動化計算程序進行分析，進而解析 UCAR 所建立之自動化計算程序之外；也將應用地面 GPS 連續觀測資料來進行

大氣中可降水的研究，進一步提升反演的精度以消除系統誤差。因此，本研究將進一步精進中央氣象局現有之反演架構，提升地面 GPS 連續觀測資料以近即時的方式計算大氣中的可降水量，期望能在氣象預報及民生工程領域能有所貢獻。綜整以上之說明，本年度之主要工作項目如下：

- (1) 針對現有作業之地基 GPS 資料處理系統，開發必要的作業維運監控機制，並維運地基 GPS 資料處理備援系統。
- (2) 備援系統升級至 Bernese 5.2 版。
- (3) 測站清單更新，並進行測站分級之探討，以提升檔案接收品質。
- (4) 分析與評估精密單點定位 (Precise Point Positioning, PPP) 技術在即時 GPS 處理應用之可行性。
- (5) 持續進行 ZTD 和可降水量產品之品管和特性分析，以強化其在天氣監測與分析之應用。

三、研究方法

水氣是大氣層中眾多影響天氣型態的氣體之一，它不論在時間或空間域都是極度多變的，同時它也是天氣的模組與氣象預報工作上最為難以掌握且極具關鍵性的參數。此外，水氣在大氣層中快速游移，並隨著其蒸發與冷凝等過程而影響著大氣中能量的重新分配，其也因此在大氣能量平衡的過程中扮演著重要的角色，它的分佈也高度地關係著大氣的垂直穩定性以及暴風系統的內部結構發展 (Keshin, 2007)。因此，利用台灣地區現有分佈綿密的衛星追蹤站進行對流層濕延遲估計，不僅能夠在時間與空間域獲得極佳的解析度，對於反演大氣中的水氣含量、大氣參數以及氣象預報等工作皆有極大的幫助。現階段利用 GNSS 技術觀測大氣折射資訊相較於以往慣常使用之無線電探空儀或水氣微波輻射儀等氣象觀測設備而言，已可提供高精度、具長期穩定性、可全天候連續操作以及高時間解析力等優勢 (Matthias and Michael, 2003; Rosa and Francesco, 2003)。

整個大氣層質量的 90% 幾乎都集中在對流層中，該層與地面接觸，並從地面

得到輻射熱能，其溫度一般隨高度上升而降低，平均每升高 1 km 降低約 6.5°C ；而在水平方向，每 100 km 溫差一般不會超過 1°C 。在對流層中雖有少量的帶電離子，但對電磁波的傳遞幾乎是沒有什麼影響，所以對流層的大氣實際上是屬於中性的。因此，對於頻率小於 15 GHz 之電磁波而言，對流層乃屬於非色散性介質，亦即電磁波在其中的傳播速度與頻率無關；GPS 之載波頻率分別為 1575.42 MHz (L1) 及 1227.60 MHz (L2)，即意謂 GPS 衛星訊號在對流層中之傳播速度與頻率無關 (Yeh *et al.*, 2010)。

故由對流層延遲量中

$$D_{trop} = C_0(t - t_0) = \int_L [n(s) - 1] ds + [S - G]$$

可知天頂向遲延量為：

$$D_{trop}^Z = \int_H^{\infty} [n(s) - 1] dz = 10^{-6} \int_H^{\infty} N dz$$

其中，H 為測站接收器高度，N 是溫度、壓力和水氣分壓的函數，稱為折射係數。一般折射係數 N 的表示為 (Smith and Weintraub, 1953)：

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 * 10^5 \left(\frac{e}{T^2} \right)$$

P 是總大氣壓(mb)，T 是溫度(K)，e 是水氣分壓(mb)，此式在正常的大氣狀況下精確度約 0.5% (Resch, 1984)。另外考慮非理想氣體影響，比較準確的式子是 (Thayer, 1974)：

$$N = \left(k_1 \frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + \left(k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right) Z_w^{-1}$$

其中 Z_d 和 Z_w 是乾空氣和水氣的空氣壓縮因子 (Owens, 1967)， P_d 和 e 分別為乾空氣和水氣的分壓(mb)，T 是溫度(K)， k_1 、 k_2 、 k_3 為常數，折射係數中等號右邊第一、二項為乾空氣和水氣所引起，第三項為水氣所引起，此式子應用在非非常乾燥的空氣中，精確度可達到 0.018%，在極度潮濕的空氣中，精確度可達到 0.048% (Thayer, 1974)。

此外，大氣層通常符合流體靜力方程式：

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g$$

代入上式積分可得：

$$\int_H^{\infty} \frac{P}{T} dz = \frac{RP_s}{M_d g_m} + \left(1 - \frac{M_w}{M_d}\right) \int_H^{\infty} \frac{e}{T} dz$$

其中， P_s 是地表總大氣壓值(mb)， g_m 是大氣垂直空氣柱質量中心的重力加速度(m/s²)，將上式代入遲延積分可以得到：

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

上式亦可寫為：

$$D_{trop}^Z = D_{trop,h}^Z + D_{trop,w}^Z$$

上式等號右邊第一項(以 $D_{trop,h}^Z$ 表示)可藉著測量地表總大氣壓值得到，稱為流體靜力平衡遲延或稱為乾遲延，等號右邊第二項(以 $D_{trop,w}^Z$ 表示)必須要知道大氣層溫度和水氣壓的剖面資訊才能計算，通常稱為溼遲延。

對流層對於 GNSS 衛星訊號之影響主要是在於訊號傳遞的速度比在真空中要慢，以及訊號之傳播路徑是曲線而非直線，此兩者乃是由傳播路徑上之折射率所引起。前者是由於對流層折射率大於真空折射率，因而造成速度的延遲；後者則是因為大氣層各個高度之折射率不同，而使其傳遞路徑形成彎曲的延遲(Leick, 2004)。綜合此兩項即為一般所稱的對流層延遲效應。上述原因導致增加接收訊號之時間以等效距離表示，即為對流層之延遲量 ΔL_{trop} ，可以方程式表示如下

(Hugentobler *et al.*, 2001)：

$$\Delta L_{trop} = C_0 (t - t_0) = \int_L n(s) ds - G$$

C_0 ：真空中之光速

t ：訊號在大氣中傳遞的時間

t_0 ：相同路徑下，訊號在真空中之傳遞時間

L : 傳播路徑

n : 傳播路徑上之折射率 (為位置 s 的函數)

s : 位置

G : 直線距離

上式可以改寫如下：

$$\Delta L_{trop} = \int_L [n(s) - 1] ds + (S - G)$$

其中 $\int_L [n(s) - 1] ds$ 為速度延遲的影響， $(S - G)$ 則為路徑彎曲的影響；其中 $(S - G)$ 通常在仰角大於 15° 時其延遲量不大於 1 公分 (Bevis *et al.*, 1992)，故通常可不列入考量。而當訊號傳遞路徑沿著天頂向時為直線傳遞，路徑彎曲延遲也就消失。故由上式可得天頂向之對流層延遲量如下：

$$\Delta L_{trop}^Z = \int_H^\infty [n(z) - 1] dz = 10^{-6} \int_H^\infty N dz$$

H : 測站天線高度

N : 折射度 (為溫度、壓力及水氣分壓的函數)

折射係數 N 的表示如下：

$$N = \left(k_1 \frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + \left(k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right) Z_w^{-1}$$

P_d : 乾空氣分壓

e : 水氣分壓

T : 絕對溫度

k_1, k_2, k_3 : 常數

Z_d : 乾空氣壓縮因子

Z_w : 水氣壓縮因子

最終，上式可經推演而得如下式：

$$\Delta L_{trop}^Z = 10^{-6} \left\{ \frac{k_1 R}{g_m M_d} P_s + \int_H^\infty \left[\left(k_2 - k_1 \frac{M_w}{M_d} \right) \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right] dz \right\} = D_{trop,h}^Z + D_{trop,w}^Z$$

R : 莫耳氣體常數

g_m : 大氣垂直空氣柱質量中心

M_d : 乾空氣莫耳質量

M_w : 水氣莫耳質量

P_s : 地表總大氣壓值

其中 $\frac{k_1 R}{g_m M_d} P_s$ (以 ΔL_h^Z 表示) 稱為天頂向流體靜力延遲, 又稱為乾延遲, 可

藉由量測地表總大氣壓而得。而 $\int_H^\infty \left[\left(k_2 - k_1 \frac{M_w}{M_d} \right) \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right] dz$ 一項 (以 ΔL_w^Z 表示)

稱為濕延遲, 必須知道大氣溫度及水氣分壓的資料方能計算。 k_1 、 k_2 、 k_3 對微波波段訊號而言是經驗常數, 根據 Thayer (1974) 提出, $k_1 = 77.604 \pm 0.014$ (k/mbar)、 $k_2 = 64.79 \pm 10$ (k/mbar)、 $k_3 = 377600 \pm 3000$ (k²/mbar), 其中 k_2 、 k_3 的不確定性取決於觀測時的數據 (Davis *et al.*, 1985)。

而對流層天頂方向的延遲量一般定義為最小延遲量的方向(\tilde{Z}), 而由於層狀大氣的假設與地球幾何表面並不平行, 因此對流層天頂方向(\tilde{Z})與測站幾何天頂方向(Z)便不會一致, 且兩者間存在有一交會的角度 β , 如圖 1 所示; 對任一 GNSS 訊號而言, 該訊號與 \tilde{Z} 方向所夾之角度 \tilde{z} 又為映射函數所使用之角度。假設該 GNSS 訊號 (i 衛星到接收儀 k) 的對流層修正延遲量為 $\Delta \rho_k^i(t)$, 則

$$\Delta \rho_k^i(t) = \Delta \rho_{apr,k} \cdot f_{apr}(\tilde{z}_k^i) + \Delta \rho_k(t) \cdot f(\tilde{z}_k^i)$$

其中

$\Delta \rho_{apr,k}$: 利用大氣數學模式計算出之延遲量初始值

$f_{apr}(\tilde{z}_k^i)$: 配合 $\Delta \rho_{apr,k}$ 所使用之映射函數

$\Delta\rho_k(t)$ ：與時間相關之大氣天頂延遲量修正估計參數

$f(\tilde{z}_k^i)$ ：配合 $\Delta\rho_k(t)$ 所使用之映射函數

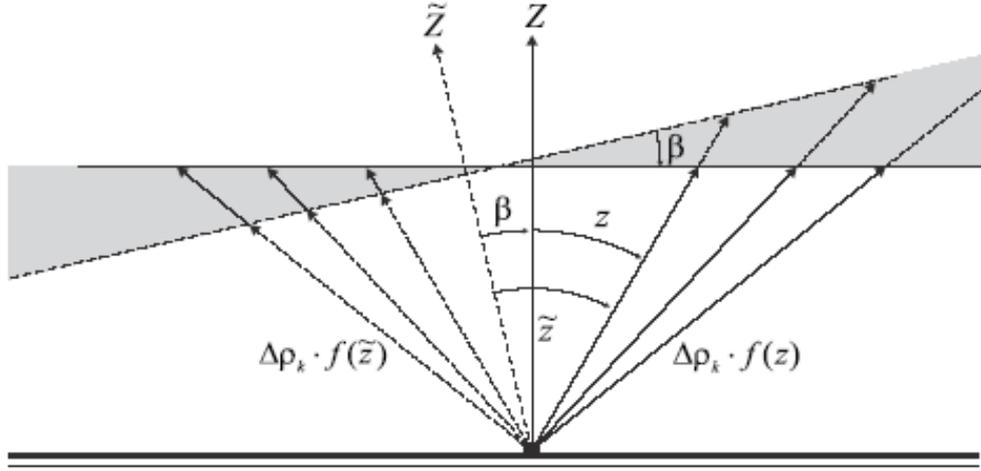


圖 1 對流層與地球幾何天頂方向示意 (Hugentobler *et al.*, 2001)

但是對於絕大部份對流層天頂延遲的情況而言，真正的 \tilde{z} 是無法立即得知的；因此通常以與幾何天頂方向之角度 z 取代之，而上式則改寫為：

$$\Delta\rho_k^i(t) = \Delta\rho_{apr,k} \cdot f_{apr}(z_k^i) + \Delta\rho_k(t) \cdot f(\tilde{z}_k^i)$$

如果對流層天頂方向(\tilde{Z})與測站幾何天頂方向(Z)所夾之角度 β 並不大，則

$$\tilde{z}_k^i = z_k^i + \delta z + z_k^i + x_k \cdot \cos(A_k^i) + y_k \cdot \sin(A_k^i)$$

其中 x_k 與 y_k 是與測站相關的參數， A_k^i 是 i 衛星到 k 接收儀之間訊號的方位角。

$$\begin{aligned} \Delta\rho_k(t) \cdot f(\tilde{z}_k^i) &= \Delta\rho_k(t) \cdot f(z_k^i + \delta z) = \Delta\rho_k(t) \cdot f(z_k^i + x_k \cdot \cos(A_k^i) + y_k \cdot \sin(A_k^i)) \\ &= \Delta\rho_k(t) \cdot f(z_k^i) + \Delta\rho_k(t) \cdot \frac{\partial f}{\partial z} x_k \cdot \cos(A_k^i) + \Delta\rho_k(t) \cdot \frac{\partial f}{\partial z} y_k \cdot \sin(A_k^i) \end{aligned}$$

最後再將泰勒級數展開之結果代入對流層修正延遲量中，則

$$\begin{aligned} \Delta\rho_k^i(t) &= \Delta\rho_{apr,k} \cdot f_{apr}(z_k^i) + \Delta\rho_k(t) \cdot f(z_k^i) + \Delta\rho_k(t) \cdot \frac{\partial f}{\partial z} x_k \cdot \cos(A_k^i) + \Delta\rho_k(t) \cdot \frac{\partial f}{\partial z} y_k \cdot \sin(A_k^i) \\ &= \Delta\rho_{apr,k} \cdot f_{apr}(z_k^i) + \Delta^h \rho_k(t) \cdot f(z_k^i) + \Delta^n \rho_k(t) \cdot \frac{\partial f}{\partial z} \cdot \cos(A_k^i) + \Delta^e \rho_k(t) \cdot \frac{\partial f}{\partial z} \cdot \sin(A_k^i) \end{aligned}$$

其中

$\Delta^h \rho_k(t) = \Delta \rho_k(t)$ ：與時間相關之大氣天頂延遲量修正估計參數

$\Delta^n \rho_k(t) = \Delta \rho_k(t) x_k$ ：南北向梯度參數

$\Delta^e \rho_k(t) = \Delta \rho_k(t) y_k$ ：東西向梯度參數

在上面的分析中已經陳述，對流層對於 GNSS 衛星訊號之影響主要是在於訊號傳遞的速度比在真空中要慢，以及訊號之傳播路徑是曲線而非直線，此兩者乃是由傳播路徑上之折射率所引起。前者是由於對流層折射率大於真空折射率，因而造成速度的延遲；後者則是因為大氣層各個高度之折射率不同，而使其傳遞路徑形成彎曲的延遲。當衛星觀測仰角大於 15 度時，其幾何遲延部份不大於 1 公分通常可以不考慮 (Bevis *et al.*, 1992)，若是更進一步僅考慮天頂方向訊號傳播，則根據司乃耳定律訊號傳播的路徑會呈直線，幾何遲延便可去除，如圖 2 所示。

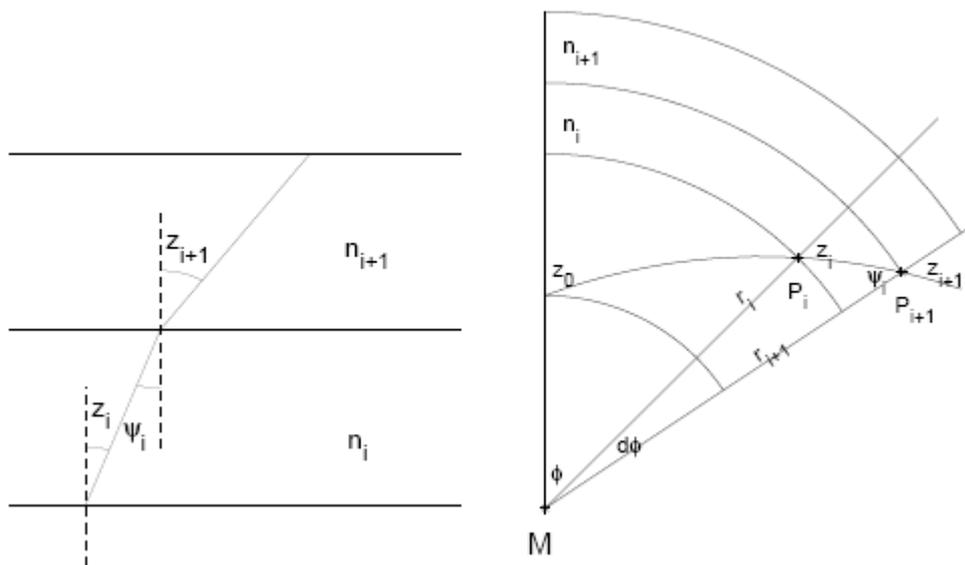


圖 2 司乃耳定律訊號行進路線圖 (Kleijer, 2004)

本研究除了將利用過去已發展並確認反演精度的相對法 (Double Difference Positioning, DDP) 來計算 PWV，並預計同時採用絕對法 (Precise Point Positioning, PPP) 來計算 PWV。其實早在 1997 年，美國太空總署噴射推進實驗室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 的 Zumberge 等人就已提出精密單點定位概念，原理

為利用單台接收儀之雙頻無差分觀測量進行定位，但由於無法如相對差分定位藉由觀測方程式相減而消除系統誤差，故須搭配國際 GNSS 服務網 (International GNSS Service, IGS) 提供之精密星曆產品和衛星時錶資料來消除衛星軌道與衛星時錶誤差，並藉由雙頻觀測量組成無電離層模式來消除電離層延遲誤差，而對流層延遲誤差、固體潮與極潮誤差等可利用模型改正 (Héroux *et al.*, 2001)。下式分別為 PPP 的電碼虛擬距離與載波相位觀測方程式 (Abdel-Salam *et al.*, 2002)：

$$\begin{aligned}
 P(Li) &= \rho + c \times (dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} \\
 &\quad + d_{ion/Li} + d_{mult/P(Li)} + \varepsilon(P(Li)) \\
 \Phi(Li) &= \rho + c \times (dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} \\
 &\quad - d_{ion/Li} + \lambda_i N_i + d_{mult/\Phi(Li)} + \varepsilon(\Phi(Li))
 \end{aligned}$$

其中

$P(Li)$ ：電碼虛擬距離觀測量 (Li 頻率, $i=1,2$) (公尺)

$\Phi(Li)$ ：載波相位觀測量 (Li 頻率, $i=1,2$) (公尺)

ρ ：衛星與接收儀間之真實幾何距離 (公尺)

c ：真空中光速 (公尺/秒)

dt ：衛星時錶誤差 (秒)

dT ：接收儀時錶差 (秒)

d_{orb} ：衛星軌道誤差 (公尺)

d_{trop} ：對流層延遲誤差 (公尺)

$d_{ion/Li}$ ：電離層延遲誤差 (Li 頻率, $i=1,2$) (公尺)

λ_i ：載波之波長 (Li 頻率, $i=1,2$) (公尺)

N_i ：載波之非整數週波未定值 (Li 頻率, $i=1,2$) (Cycle)

$d_{mult/P(Li)}$ 、 $d_{mult/\Phi(Li)}$ ：多路徑效應影響量 (公尺)

$\varepsilon(P(Li))$ 、 $\varepsilon(\Phi(Li))$ ：其他雜訊 (公尺)

IGS 提供之精密星曆及衛星時錶資料對於單點定位有顯著的貢獻，精密星曆根據發佈時間可分為四種不同等級。本研究採用之精密星曆為最終產品，發佈時

間延遲約 12~18 天，衛星軌道誤差小於 3 公分，衛星時錶均方根誤差約為 75 ps (10^{-12} 秒)，衛星與接收儀的時錶標準偏差約為 20 ps。精密單點定位解決相對差分定位精度受限於基線長度之問題，更實現了全球無縫觀測之高精度定位結果。而在實際計算時採用最小二乘法解算 GNSS 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：

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

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。而溼延遲與可降水的關係，可由上式右邊第二項提出表示為：

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

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

其中， k_2' 為常數， $k_2' = k_2 - k_1 \frac{M_w}{M_d}$ 。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：

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

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 GNSS 得到的溼遲延量可轉換成可降水量 PWV(Askne and Nordius, 1987; Bevis *et al.*, 1994)：

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

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：

$$IWV = PWV \times \rho_l$$

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/m^2)；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)。

四、具體成果

4-1 資料完整度統計

在資料完整度的比較上共計有三種成果，分別為 POST 解（兩週後計算）、DP 解（兩天後計算）、NRT 解（兩小時後計算）之資料完整度，我們針對三者的成果繪製圖 3 做進一步分析。

由圖 3 中可以發現 POST 解的資料完整度在前半年的平均值為 75%，而我們在 DOY 121 新增了解算測站的數目，故 DOY 122 以後的資料完整度大多在 90% 以上，兩者的差異主要是來自於評估測站數的不同。而 DP 解與 NRT 解因為強調解算的時效，其完整度受到 GPS 資料即時傳輸的影響變動較大，從圖 3 中可以看到 NRT 的資料完整度在年初時平均來說還有 55%，但從 DOY 098 之後突然下降至 25%，直到 DOY 167 之後才又回覆到過去的水準，其原因目前仍不清楚，

僅能確定該段期間網路傳輸的品質大幅下降。

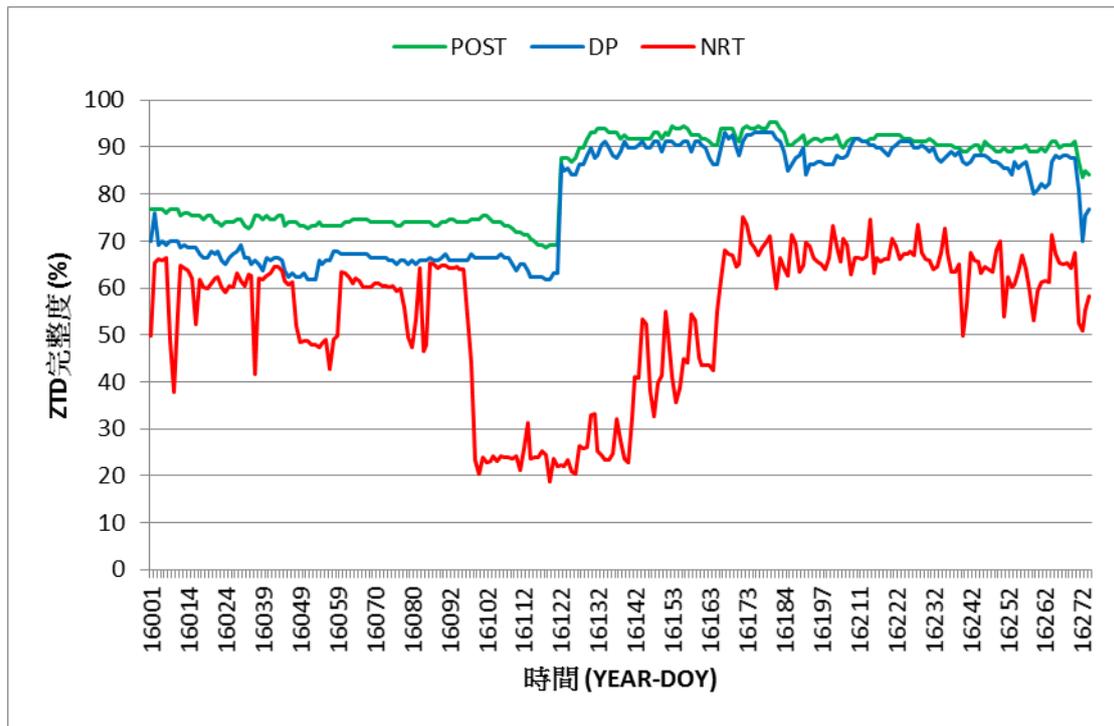


圖 3 POST、DP、NRT 之資料完整度 (DOY 001 開始)

也由於 105 年的資料統計歷經了更新測站清單及網路傳輸不穩的狀況，為了進行後續的測站分級工作，故我們只取 DOY 167 以後網路恢復穩定的資料，並重新繪製資料完整度比較圖如圖 4。其中可以看到 POST 解的完整度仍維持 90% 以上，DP 解的完整度多介於 80~90% 之間，而 NRT 解的完整度則下降為 50~70%。

整體而言，上述三種方法若從 105 年 DOY 167 開始統計，其資料完整度及解算時效統計結果如表 1 所示。可以發現時間延遲兩小時 NRT 的成果，65.3% 左右的 GPS 觀測資料已可回傳至計算伺服器進行計算；若分析 DP 的結果，時間延遲兩天之後已可接收到 87.9% 左右的 GPS 觀測資料；最後來看 POST 的成果，發現時間延遲兩週之後，GPS 資料的完整度提升至 91.0%，顯示大部分的資料已在兩天內回傳至中央氣象局的資料庫中。但若看今年全年的結果，三種解算機制的資料完整度平均下降 10%，其原因來自於解算清單更新及網路傳輸問題。

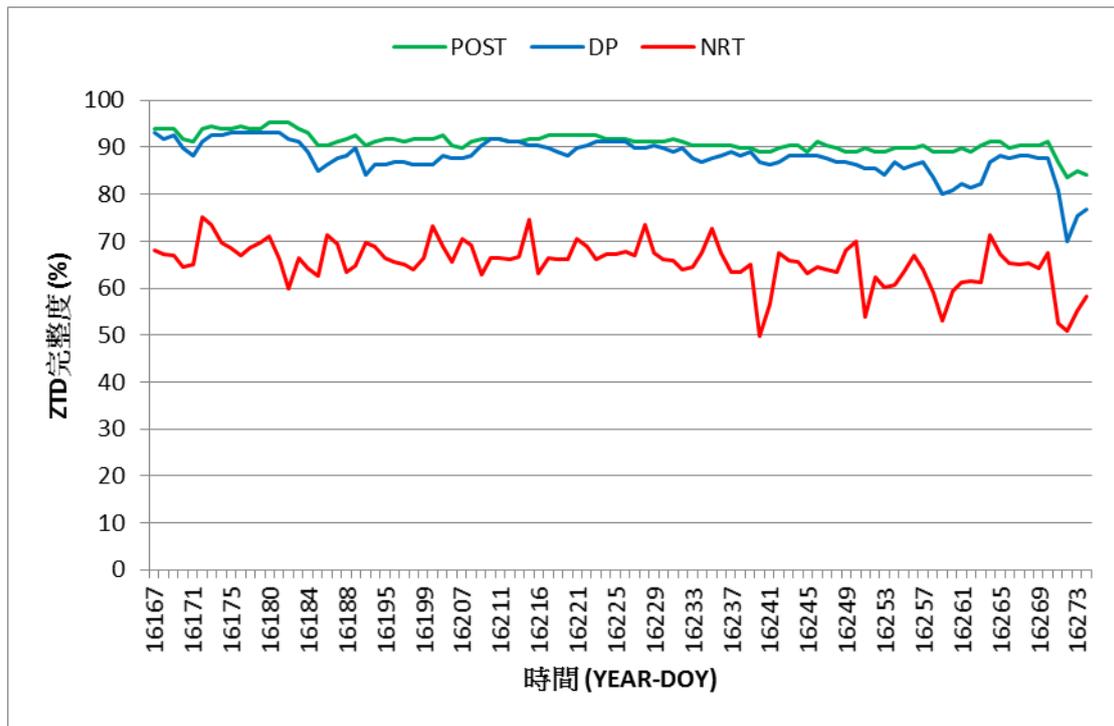


圖 4 POST、DP、NRT 之資料完整度 (DOY 167 開始)

表 1 不同解算機制之資料完整度及解算時效

解算機制	資料完整度 (DOY 001 開始)	資料完整度 (DOY 167 開始)	解算時效
POST 解	83.7%	91.0%	兩週後
DP 解	78.6%	87.9%	兩天後
NRT 解	54.1%	65.3%	兩小時後

至於 DP、NRT 解的完整度空間分布如圖 5 所示，由圖 5 左方的 DP 解中可以明顯的看到，資料遺失較為嚴重的區域在於苗栗山區及臺灣東北角的測站，應與當地 ADSL 數據傳輸的品質有關；隨著資料的解算時效越為急迫（如圖 5 右方的 NRT 解），資料完整度最差的部分在臺灣北海岸，而苗栗及墾丁的資料完整度亦較差，但在網路傳輸環境無法提升的情況下此一狀況似乎很難避免。此外，由圖中亦可看到有 12 處較為異常的紅點，這應該來自於這 12 個測站的網路傳輸問題，將在測站分級中予以剔除。

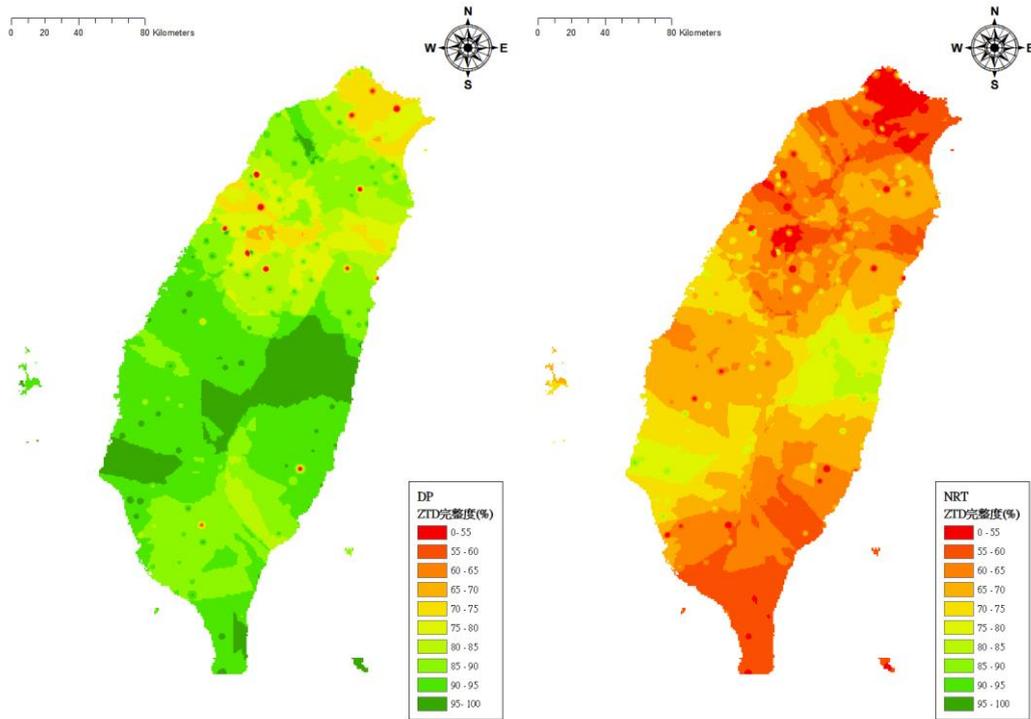


圖 5 DP、NRT 解之資料完整度分布圖 (DOY 167 開始)

4-2 解算誤差統計

在解算誤差的比較上採用 POST 解作為參考值 (真值)，將 DP 與 NRT 解算機制的 ZTD 分別與 POST 解的 ZTD 相減之後，並剔除差異大於 2 倍誤差 (這裡取 5.2 公分) 的測站，即可計算 DP 解 (兩天後計算) 與 NRT 解 (兩小時後計算) 之平均誤差，而上述兩種解算機制分別於 105 年全年及 105 年 DOY 167 開始統計的成果，分別繪製如圖 6~7 做進一步分析。

由圖 6 可以看到，由於年中 DOY 098~166 的網路傳輸不穩定，連帶的使得解算誤差亦有較大的情況，但平均來說，DP 解算精度比 NRT 來得好。若只考量網路恢復穩定 DOY 167 之後的資料 (如圖 7)，雖然也偶有發生誤差較大的現象，但情況已經大幅改善，經瞭解誤差較大仍與該段時間的資料完整度較差有高度相關。

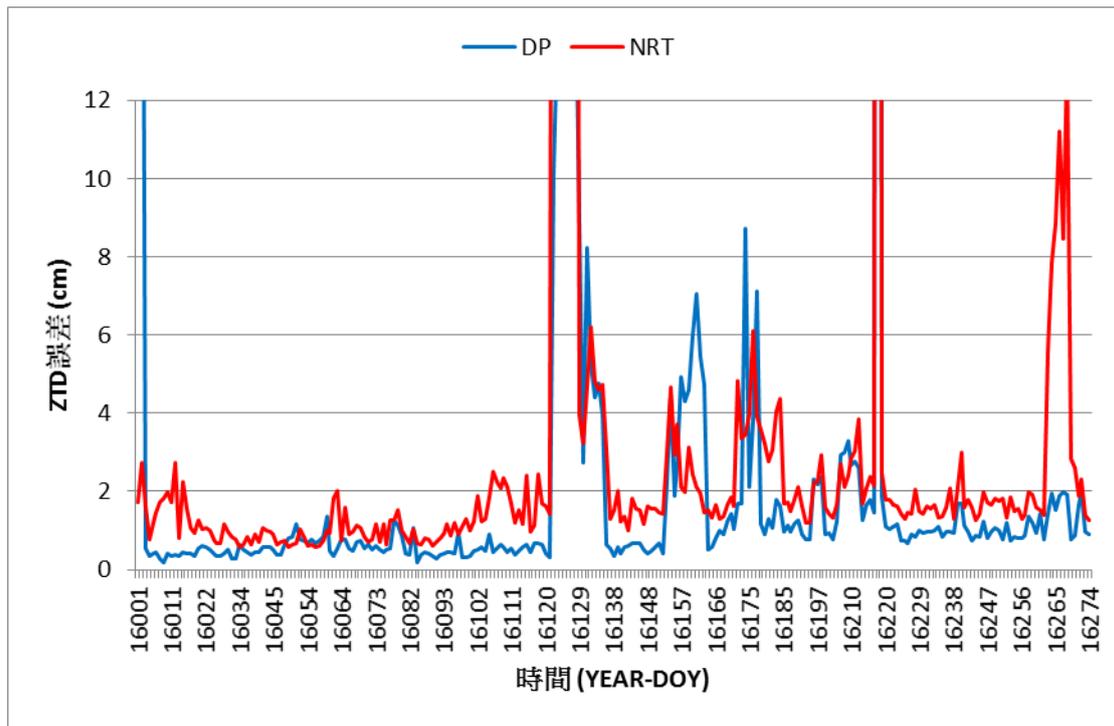


圖 6 DP、NRT 之解算誤差 (DOY 001 開始)

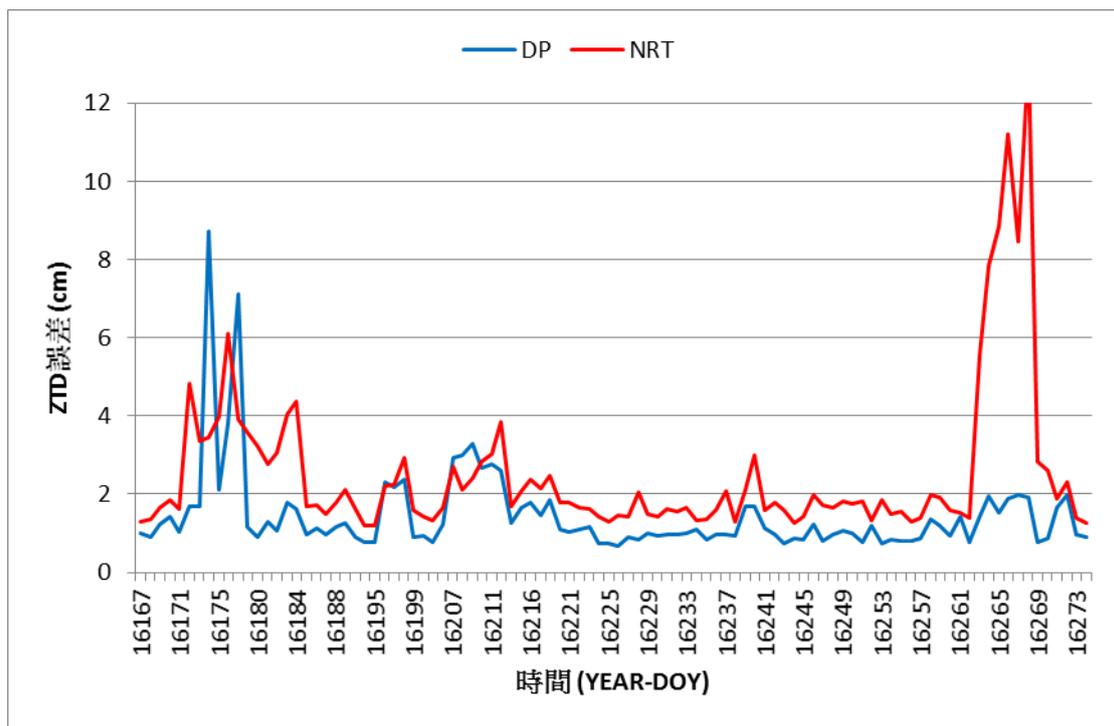


圖 7 DP、NRT 之解算誤差 (DOY 167 開始)

整體而言，上述兩種解算方法若從 105 年 DOY 167 開始統計，以 POST 解作為參考值（真值），其解算誤差及解算時效統計結果如表 2 所示。可以發現時間延遲兩小時 NRT 的成果解算誤差為 2.5 cm，若分析 DP 的結果，時間延遲兩

天之後其誤差已提升至 1.5 cm；但若看今年全年的結果，NRT 的解算誤差上升至 3.5 cm，DP 的解算誤差僅些微上升至 2.2 cm，未來仍須設法解決 GPS 資料即時傳輸的問題，方能有效解決此一狀況。

表 2 不同解算機制之解算誤差及解算時效

解算機制	解算誤差 (DOY 001 開始)	解算誤差 (DOY 167 開始)	解算時效
DP 解	2.2 cm	1.5 cm	兩天後
NRT 解	3.8 cm	2.5 cm	兩小時後

至於 DP、NRT 的解算精度空間分布如圖 8 所示，由圖 8 左方的 DP 解中可以明顯的看到，計算誤差較大的區域在於東南部的測站，其原因有待進一步的分析；而從右方的 NRT 解中可以看到，解算誤差最大的地方都在於墾丁半島，除了當地網路通訊品質較差之外，當地的測站觀測資料也需做進一步的檢視，方能排除此一問題。

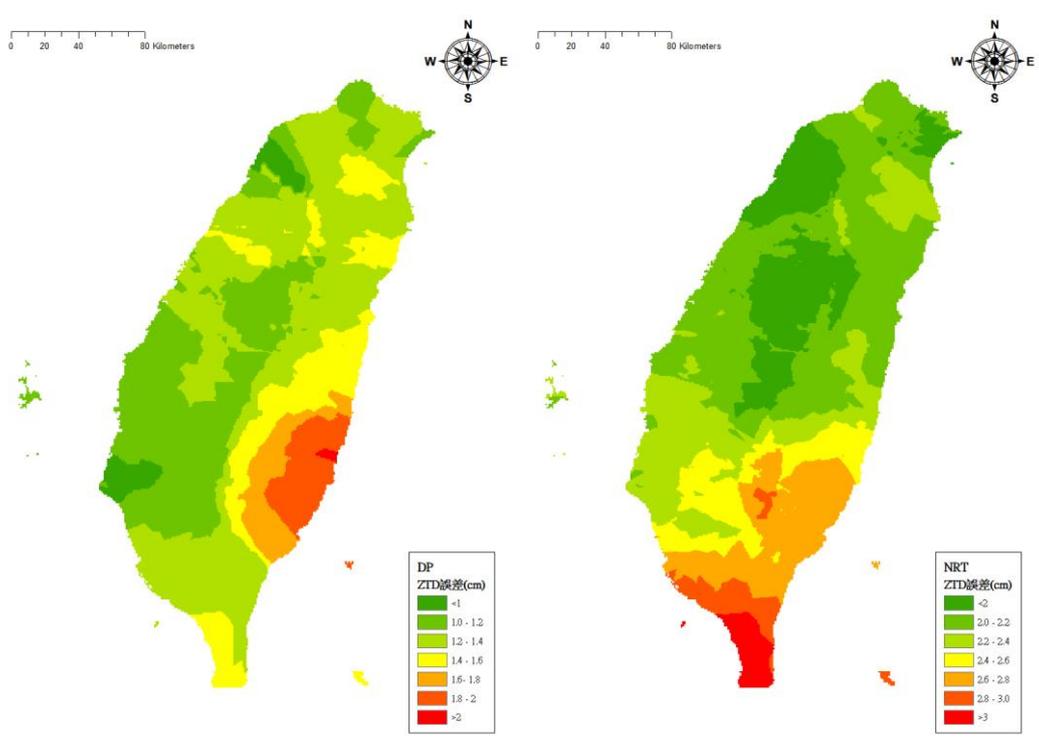


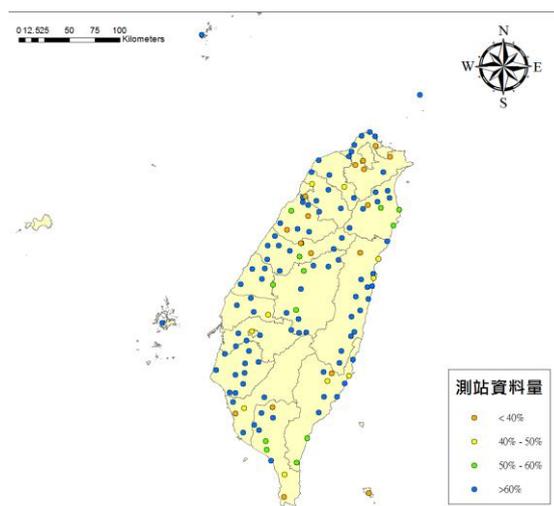
圖 8 DP、NRT 解之解算誤差分布圖 (DOY 167 開始)

4-3 測站分級規劃

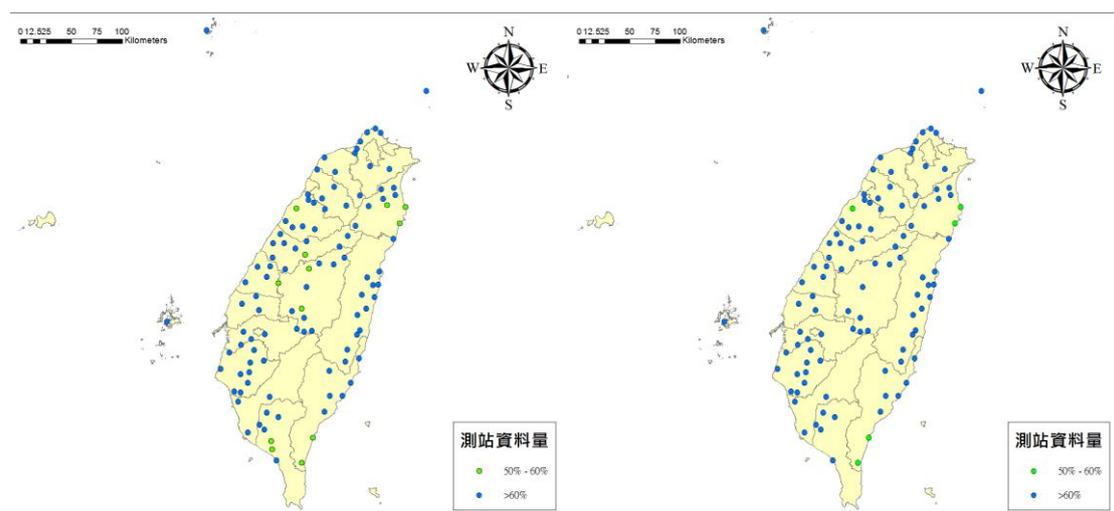
計算清單中共列出 168 站，刪除資料無法即時回傳之測站後，剩餘 146 站納入分級統計。

(1) 刪除測站資訊不完整之測站：GUK2 (刪除 1 站，剩餘 145 站)

(2) 刪除 NRT 平均誤差大於 5.2 公分之測站：BLOW、FENP、FKDO、FLON、GAIS、MUDA、WANC (刪除 7 站，剩餘 138 站)

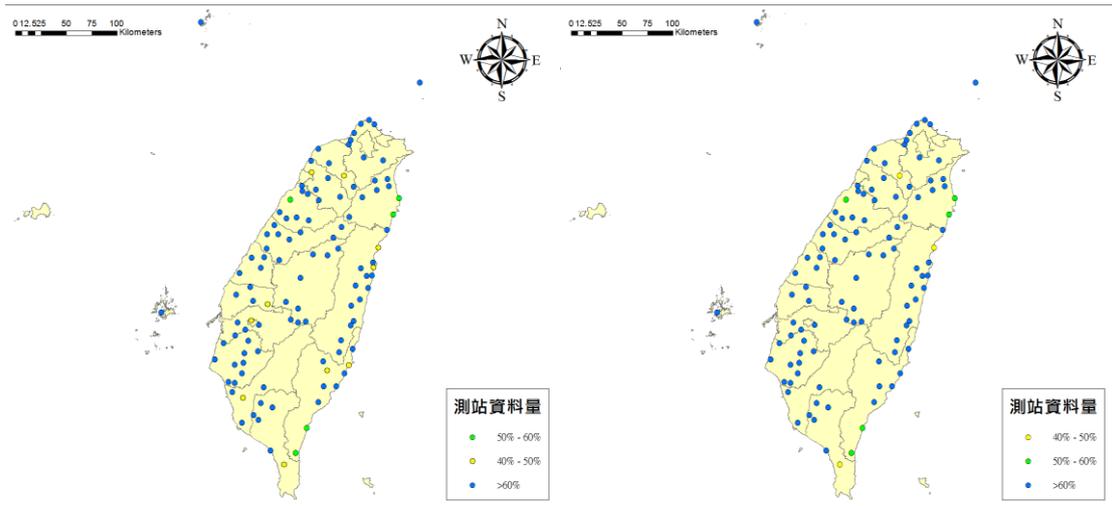


(3) 刪除資料完整度介於 50%~60% 的綠色測站 (考量地理區位保留 5 站)：CLON、DPIN、FKD2、HANS、HOPN、NJOU、PAKU (刪除 7 站，剩餘 131 站)

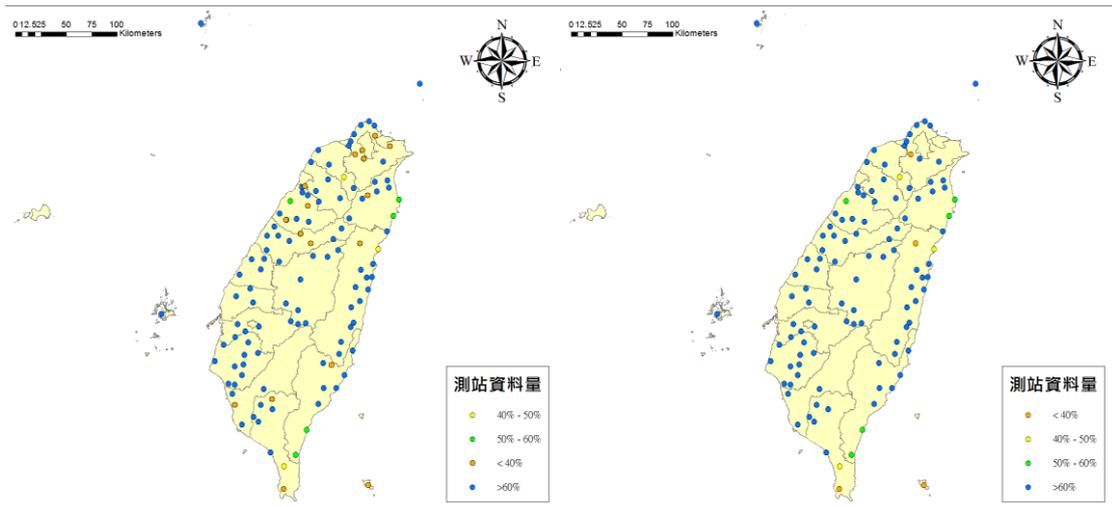


(4) 刪除資料完整度介於 40%~50% 的黃色測站 (考量地理區位保留 3 站)：AKND、CHEN、CHIA、GUKN、HSIN、HUAL、KUAN (刪除 7 站，剩餘

124 站)



(5) 刪除資料完整度 30% 以下的橘色測站 (考量地理區位保留 4 站): ANKN、
 CHIH、CTOU、CWBN、FIVE、GUKW、KASU、NIUT、PENL、SANI、SPAO、
 SUCH、WAN2 (刪除 13 站, 剩餘 111 站)



經由上述的原則刪除測站之後, 以資料完整度為主、解算精度為輔做為門檻, 保留下來的 111 站則如表 3 所示。若僅保留此 111 較差測站, 可將原有的圖 5 重繪成圖 9、圖 8 重繪成圖 10, 即可得到 DP、NRT 解的完整度及解算精度空間分布圖。

表 3 測站分級 NRT 資料接收情況較佳的 111 測站資訊

站碼	站名	緯度(度)	經度(度)	高程(m)	完整度(%)
PAO2	頂埔國小	24.707949	120.923084	85	97.8
PUS2	鳳霞國小	23.970193	120.525768	47	97.5

SUC2	自由國小	24.291492	120.909089	583	95.5
KHLZ	路竹高中	22.855902	120.252948	58	94.5
JSUI	瑞穗	23.491899	121.423798	121	94.5
SSUN	水上	23.414101	120.377701	65	93.4
YSAN	七股鹽山	23.146500	120.085899	54	93.3
TUNM	銅門	23.965200	121.493500	195	93.1
YLSS	三星國中	24.667924	121.653011	123	92.9
MATZ	馬祖	26.169300	119.922997	131	92.6
SAN2	三義 2	24.413628	120.769182	329	91.7
SHUL	水璉國中	23.787600	121.562698	86	90.9
YUL1	玉里 1	23.321381	121.300211	197	90.6
HUYS	惠蓀林場	24.092300	121.029404	869	90.3
SLIN	西林	23.811800	121.441399	203	89.9
NANK	南科	23.101900	120.274300	29	88.7
YUSN	玉山	23.487301	120.959099	3878	88.7
TSHI	金山	25.256901	121.632698	52	88.3
CHUL	初來	23.132299	121.125603	475	86.8
ANK2	檢校中心 2	24.959310	121.525070	45	86.8
YAME	楊梅	24.908400	121.185204	221	85.7
TOFN	永和山水庫	24.662001	120.924797	157	85.5
SANL	杉林溪	23.664499	120.768558	1692	84.9
DNFU	東富	23.684999	121.482300	133	84.6
SGUN	神岡	24.271601	120.691803	208	84.4
NSHE	新社	24.225700	120.800903	488	81.2
NCKU	歸仁	22.938400	120.275803	34	81.0
MFEN	梅峰	24.082100	121.172401	2251	80.5
SLNP	雙連埤	24.753099	121.635597	492	80.5
YENL	東管處	23.903500	121.601799	91	80.5
LIU2	小琉球 2	120.368658	22.346155	68	79.6
TEGS	鐵砧山	24.356199	120.654900	257	79.3
TUNS	東山	23.317200	120.403999	56	79.0
MLO1	美濃 1	22.899957	120.553821	75	78.9
ZEND	仁德	22.943199	120.217499	53	78.6
SONA	松安	24.397800	120.985802	1354	78.6
SFON	新豐	24.932800	121.010101	53	78.5
TSIO	通霄城中	24.472700	120.704102	90	78.4
ILAN	宜蘭	24.764000	121.756599	27	78.1
HUAN	合歡山	24.143400	121.272598	3422	78.1

WFEN	地震教育園區	24.041901	120.699402	116	77.9
LNKO	林口	25.076300	121.378098	285	77.7
THAI	泰崗	24.607100	121.295601	1520	76.7
RENI	仁義潭	23.458900	120.508499	115	76.5
CHUN	春日	23.452801	121.393097	139	76.3
TTUN	臺東體中	22.764500	121.080704	102	76.2
NIPU	寧埔國小	23.243364	121.412117	74	76.1
SAND	三地門	22.717199	120.640602	234	76.0
CLAN	棲蘭	24.602200	121.512001	462	75.7
STA1	獅潭 1	24.635603	120.979258	149	75.6
HNSN	環山	24.337700	121.307999	2003	75.5
KSHI	關西	24.776600	121.176003	168	75.4
ALIS	阿里山	23.508171	120.813296	2438	75.1
NDHU	東華大學	23.897200	121.550797	79	75.1
DANI	大內國小	23.119470	120.361388	45	75.1
HUAP	和平國小	24.309000	121.749397	100	74.7
ICHU	義竹	23.360600	120.279297	35	74.4
SINL	興隆	22.908199	121.254601	124	73.7
NSAN	南山	24.428101	121.382797	1132	73.6
SHLU	望高寮	24.144400	120.578301	327	73.4
SANJ	三芝	25.260700	121.500801	86	73.1
TAN2	淡水古蹟博物館	25.178500	121.431360	68	73.0
PEI1	北門 1	23.293800	120.168503	23	72.8
PLIN	坪林	24.933599	121.713898	274	72.6
SUN1	日月潭 1	23.881243	120.908351	1036	72.5
WUST	烏山頭	23.205200	120.368103	94	72.1
JYAN	佳陽	24.242399	121.226303	343	71.7
KYIN	觀音	25.041000	121.080399	34	71.5
WANS	望鄉	23.607500	120.885101	958	71.2
PLA2	白蘭 2	24.578825	121.086374	1126	71.2
DCHU	東竹	23.213100	121.280502	273	70.3
JWEN	曾文水庫	23.219740	120.497350	172	69.8
SHWA	虎頭埤	23.021400	120.347801	99	69.7
ERLN	二崙	23.797501	120.419502	45	69.0
CHIN	清水	24.271000	120.582100	57	68.8
LTUN	羅東	24.700001	121.771599	29	68.4
BALN	上巴陵	24.699400	121.426102	1715	68.2
SGAN	桂林公園	22.581200	120.349602	47	68.1

HERI	核一廠	25.294399	121.580902	50	67.7
DAHU	大湖	24.422800	120.871803	317	67.2
WIPN	北埔外坪	24.674601	121.058502	235	67.1
HUWE	虎尾	23.729401	120.286598	42	65.3
JLUT	加祿堂	22.329901	120.622704	31	65.2
TATA	塔塔加	23.481400	120.887001	2649	65.0
DSIN	大興	23.631201	121.398003	192	64.8
WDAN	萬丹	22.606001	120.504303	62	64.6
LUKN	鹿港	24.059999	120.435097	24	64.4
PEPU	北埔	24.017799	121.610298	36	63.9
CHUA	彰師大	24.066000	120.557297	109	63.7
WUKU	五股坑	25.117201	121.400597	230	63.4
FUNY	芳苑	23.922300	120.320099	24	63.3
LONT	鹿野龍田	22.906300	121.130501	204	62.5
PANG	澎湖	23.565201	119.563698	28	62.2
DNAN	斗南	23.673800	120.447899	79	61.8
SUAN	蒜頭	23.477501	120.299797	33	61.2
PTUN	六塊厝	22.649799	120.459602	41	60.5
DULI	都歷	23.025600	121.330498	74	60.4
PNCY	彭佳嶼	25.627510	122.079434	124	60.3
LIKN	里港彭厝	22.758600	120.527901	66	60.1
NAAO	南澳	24.449301	121.810204	29	59.4
MIAO	西山	24.583401	120.810204	173	58.0
BIMO	賓茂國中	22.532849	120.967367	54	55.7
SUAO	蘇澳	24.592300	121.866997	22	55.3
DAJN	達仁	22.311300	120.864899	150	52.9
FUSN	奎輝	24.799000	121.331398	364	43.3
DANL	丹路國小	22.204140	120.751911	149	42.1
CHNT	崇德	24.149200	121.661797	40	41.8
HENC	恆春	22.003901	120.746399	44	39.8
BANC	板橋	24.997601	121.442101	29	34.2
LANY	蘭嶼	22.037300	121.558098	346	30.5
SPAO	西寶	24.205000	121.484802	987	28.8

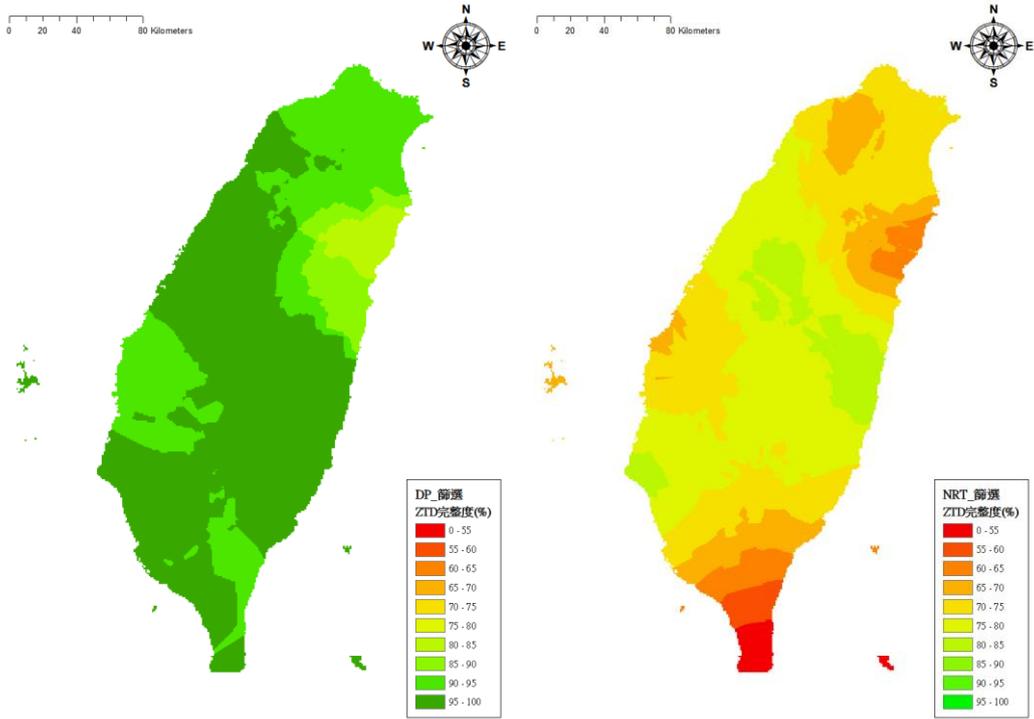


圖 9 DP、NRT 解之資料完整度分布圖 (DOY 167 開始且僅保留 111 測站)

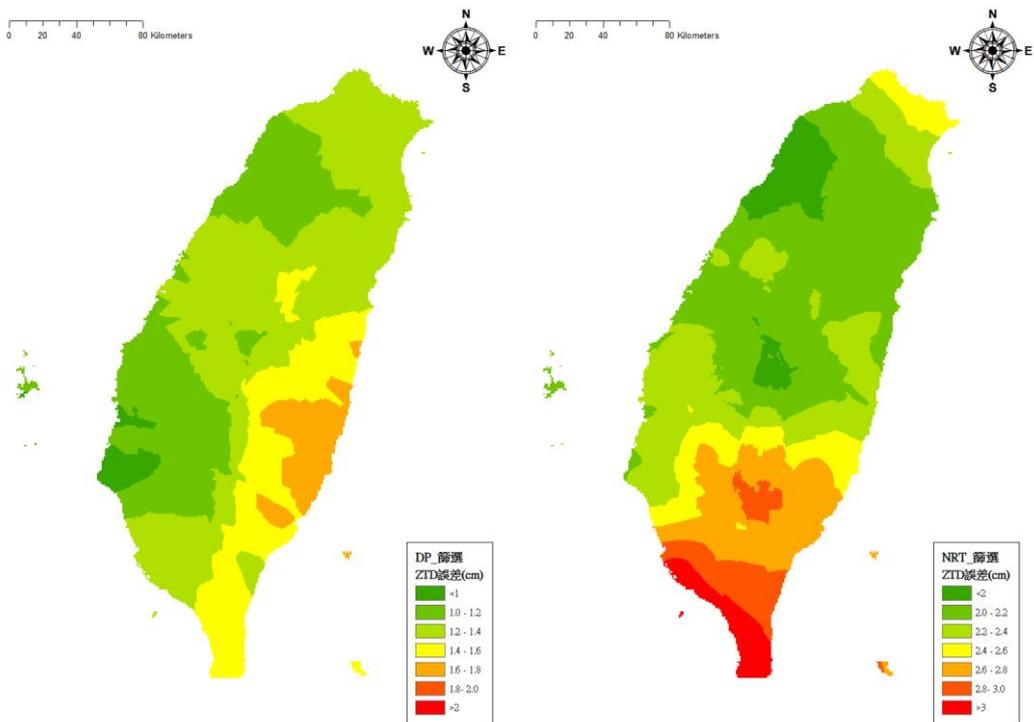


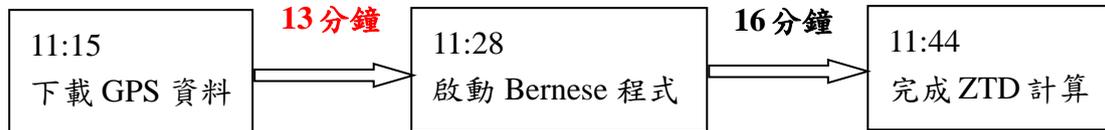
圖 10 DP、NRT 解之解算誤差分布圖 (DOY 167 開始且僅保留 111 測站)

五、未來精進規劃方案

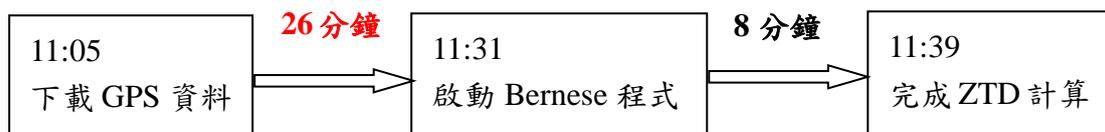
5-1 現況說明

(1) A 時段（早上 8~10 點）

- gd 伺服器

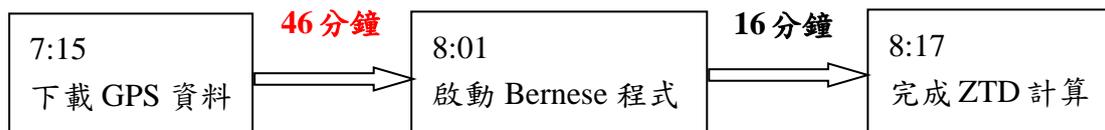


- gd2 伺服器

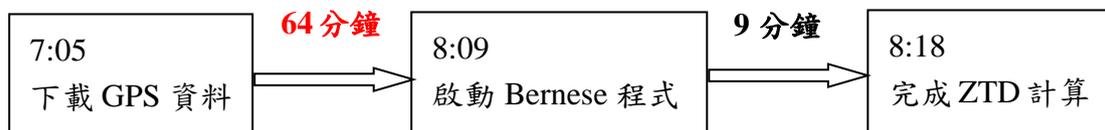


(2) U 時段（凌晨 4~6 點）

- gd 伺服器



- gd2 伺服器



5-2 精進方案

(1) 調整啟動時間（已完成），由原本的單數小時 25 分提前為單數小時 5 分開始

抓取資料，但資料完整度有些微的下降趨勢，顯示測站資料尚未即時回傳至資料庫。

(2) 僅計算測站分級中資料品質較佳且資料較完整的測站，測站計算數可由 147

站下降至 111 站左右。

(3) 嘗試修改資料下載程式，但可行性及效能尚無法評估。

(4) 改以串流方式下載 GPS 資料，目前已有初步成果但仍須 貴局地震測報中心

及 TACC 同仁協助。

- (5) 改以精密單點定位 (Precise Point Positioning, PPP) 解算方式取代現行的二次差分定位 (Double Difference Positioning, DDP)，可解決目前仰賴國外 IGS 測站進行相對定位的不確定性，但在解算即時性的提升上成效有限。

5-3 BKG Ntrip Client 串流說明

BKG Ntrip Client 是用於同時檢索、解碼、轉換和處理即時 GNSS 串流數據的程式，它是在 IAG 歐洲委員會 (EUREF) 和國際 GNSS 服務 (IGS) 的框架內製定的。雖然作為一個即時工具，同時它配備了一些後處理功能，主要有以下功能：

- (1) 取回通過 NTRIP 傳輸協議可用的即時 GNSS 數據流
- (2) 通過 TCP 直接從 IP 地址取回即時 GNSS 數據流，而不使用 NTRIP 傳輸協議
- (3) 從本地 UDP 或 RS232 序列端口取回即時 GNSS 數據流，而不使用 NTRIP 傳輸協議
- (4) 生成高採樣率的 RINEX 觀測和導航檔，支援即時 GNSS 後處理應用
- (5) 通過 IP 端口生成星曆和同步或非同步觀測星曆，以支援即時 GNSS 網絡服務
- (6) 通過 IP 端口為廣播星曆提供軌道和時鐘校正，以支援 RTK 觀測上的即時精確點定位
- (7) 通過 IP 端口通過時期生成同步或非同步的軌道和時鐘校正到廣播星曆，以支援這樣的串流的外部組合，如同時來自各種校正提供者
- (8) 監測即時 GNSS 數據流網絡的性能，以在中斷或損壞的流的情況下生成建議註釋
- (9) 掃描 RTCM 串流的輸入天線訊息以及觀察類型和消息類型及其重複率
- (10) 通過串列通信鏈路將串流送到 GNSS 接收器，作為即時校正使用
- (11) 執行即時精確點定位以確定未知 GNSS 接收機位置
- (12) 同時處理多個廣播校正流以產生，編碼和上傳組合的廣播校正

- (13) 上傳 RTCM 版本 3 格式的廣播星曆流
- (14) 編輯或連接 RINEX 文件或檢查其品質
- (15) 在 Google 地圖或 Open Street Map 的地圖上繪製從 RTCM 流或 RINEX 文件導出的位置
- (16) 從 IP 端口以純 ASCII 格式讀取 GNSS 軌道和時鐘，它們可以由即時 GNSS 引擎產生，並且應參考 IGS 地心固定參考系統。

此外，BNC 可執行以下計算：

- (1) 將 IGS 以地心為中心的地球固定軌道和時鐘轉換為具有徑向，沿軌道和交叉軌道分量的廣播修正
- (2) 將廣播修正作為 RTCM 版本 3 流上傳到 NTRIP 廣播伺服器
- (3) 將軌道和時鐘校正提到特定的參考系統
- (4) 將廣播校正記錄為時鐘 RINEX 文件，以便使用其他工具進行進一步使用

雖然 BNC 解碼用於 GPS、GLONASS 和 Galileo 的 RTCM 訊息，但是其他定位衛星實現的解碼如日本的 QZSS 衛星需遵循的 JAXA 規範，而北斗衛星和 SBAS 則被規範於 BKG、Alberding 和 DLR 之間的協議。簡單來說，BNC 目前已經支援目前地球上所有定位衛星，只是支援較好的還是以 GPS、GLONASS 和 Galileo 系統為主。

圖 11 為連接到 GNSS 接收器的 BNC 的流程圖，該 GNSS 接收器通過串列或 TCP 網路協議提供給觀測者以用於精密單點定位。圖 12 顯示了 RTCM 流到 RINEX 文件的轉換。圖 13 顯示了 BNC 回送即時 GNSS 引擎，之後計算精確的軌道和時鐘的流程圖，在這種情況下使用 BNC 將校正器編碼到 RTCM 版本 3，並將其上傳到 NTRIP 廣播伺服器。圖 14 顯示了 BNC 組合幾個廣播校正流來傳播其校正資料，同時將結果保存在 SP3 和 Clock RINEX 文件中。

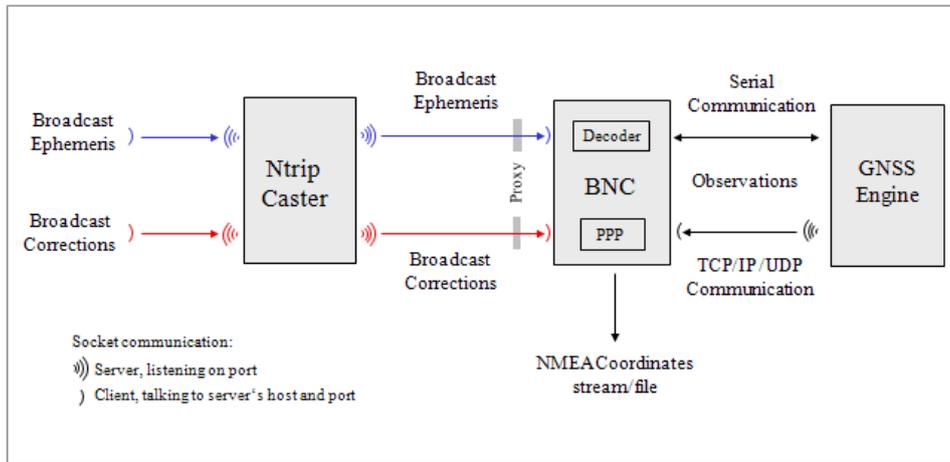


圖 11 BNC 連接到 GNSS 接收機的精確單點定位流程圖

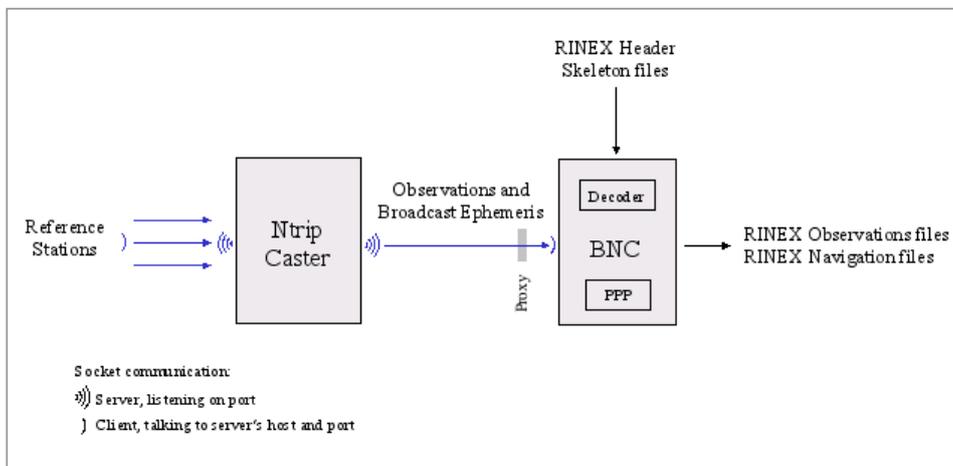


圖 12 BNC 將 RTCM 轉換為 RINEX 批處理的流程圖

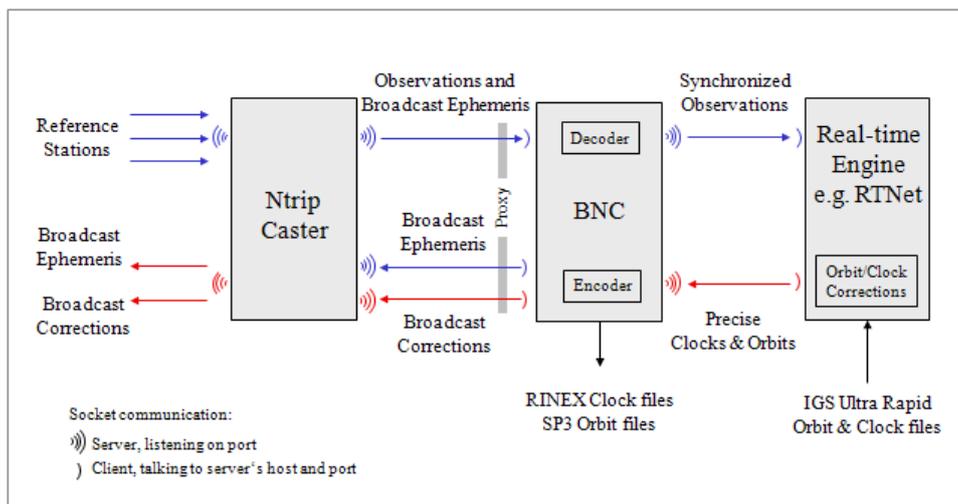


圖 13 BNC 回送即時 GNSS 引擎和上傳編碼的廣播校正流程圖

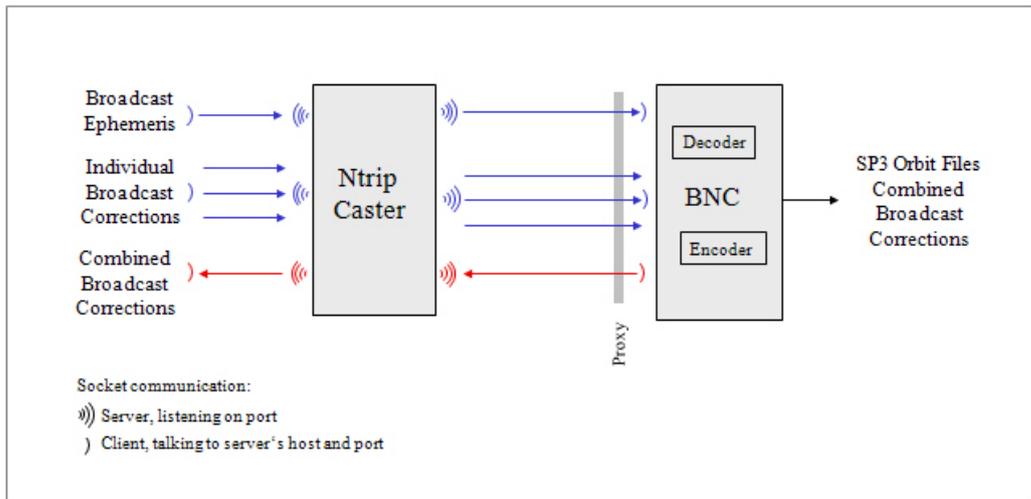


圖 14 BNC 組合廣播校正串流的流程圖

5-4 氣象局串流應用說明

由上節的說明，在氣象局即時 PPP 計算應用會用到圖 12 與圖 14 的流程，主要有兩個部分，如圖 15 所示：

- (1) 用 BNC 把氣象局的 GPS 觀測站的 RTCM 串流轉換為 RINEX 格式檔案
- (2) 用 BNC 下載 BKG 組合廣播校正串流轉換為 RINEX 格式檔案

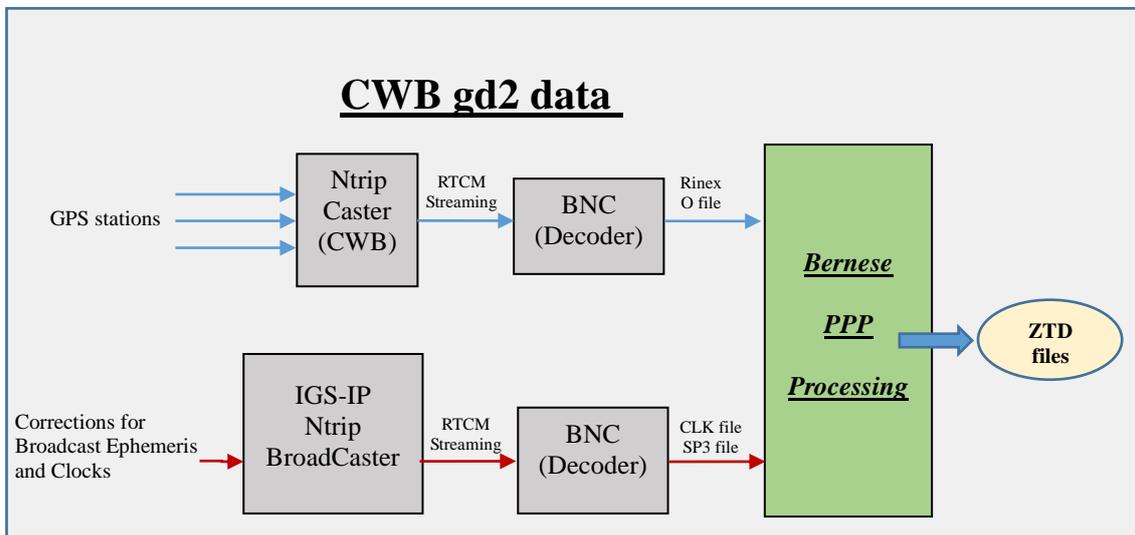


圖 15 氣象局以 BNC 下載 RTCM 和廣播校正串流的流程圖

參考文獻

- 何人豪，2002。GPS 氣象中地面氣象模式之改進，國立中央大學太空科學研究所碩士論文。
- 黃葳芃，2005。投落送資料對颱風路徑模擬評估研究—康森及米雷颱風個案分析，國立臺灣大學大氣科學研究所博士論文。
- 陳登璟，2012。臺灣地區 1950-2010 年極端降雨變化之研究，國立中央大學大氣物理研究所碩士論文。
- 鍾承儒，2012。應用衛星資料估算西行侵台颱風降雨潛勢之研究，國立中央大學大氣物理研究所碩士論文。
- 葉大綱、陳淑菁、王傳盛、洪景山，2013。利用地基 GPS 推求大氣可降水及年變化分析，臺灣地球科學聯合學術研討會，A2-2B-07。
- 葉大綱、陳國華、洪景山、馮欽賜，2014。由溫度、水氣、降雨量分析大臺北地區之熱島效應，103 年天氣分析與預報研討會，A4-5。
- 葉大綱、林承毅、王傳盛，2013。利用水氣微波輻射儀提升 GPS 定位精度之研究，國土測繪與空間資訊，1(1)，16-30。
- 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。
- 龐士鈞、葉大綱、洪景山、馮欽賜，2015。臺北地區土地開發與氣候變遷之關聯性，104 年天氣分析與預報研討會，A4-14。
- 龐士鈞、葉大綱、詹士樑，2016。以 GPS 訊號分析臺灣大氣可降水量之研究，臺灣地球科學聯合學術研討會，GD1/GD4-2B-04。
- 闕珮羽，2011。太陽 11 年週期變化對大氣及海洋動力的影響，國立臺灣大學大氣科學研究所碩士論文。
- Askne, J., H. Nordius, 1987. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data, *Radio science*, 22(3), 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.
- Bevis, M., 1994. GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water, *Journal of Application Meteorology*, 33, 379-386.
- Chen, J. and G. Li, 2013. Diurnal variations of ground-based GPS-PWV under different solar radiation intensity in the Chengdu Plain, *Journal of Geodynamics*, 72, 81–85.
- Choy, S., C. S. Wang, T. K. Yeh, J. Dawson, M. Jia, Y. Kuleshov, 2015. Precipitable water vapor estimates in the Australian region from ground-based GPS observations, *Advances in Meteorology*, 2015, 956481.
- ECMWF, 2014. ERA Interim, Monthly Means of Daily Means, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim_full_moda/.
- Hugentobler, U., S. Schar, P. Fridez, E. Beutler, 2001. *Bernese GPS Software: Version 4.2*, Astronomical Institute, University of Bern.
- Jin, S. G., O. F. Luo, C. Ren, 2010. Effects of physical correlations on long-distance GPS positioning and zenith tropospheric delay estimates, *Advances in Space Research*, 46(2), 190–195.
- Jin, S. G., E. Cardellach, F. Xie, 2014. *GNSS Remote Sensing: Theory, Methods and Applications*, Springer, Netherlands, ISBN: 978-94-007-7481-0.
- Kleijer, F., 2004. *Troposphere Modeling and Filtering for Precise GPS Leveling*, Ph.D Dissertation, Department of Aerospace Engineering, Delft University of Technology.
- Niell, A., 1996. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *Journal of Geophysical Research*, 101, 3227–3246.
- Roman, J. A., R. O. Knuteson, S. A. Ackerman, D. C. Tobin, H. E. Revercomb, 2012.

- Assessment of regional global climate model water vapor bias and trends using Precipitable Water Vapor (PWV) observations from a network of Global Positioning Satellite (GPS) receivers in the U.S. Great Plains and Midwest, *Journal of Climate*, 25, 5471–5493.
- Owens, J. C., 1967. Optical refractive index of air: dependence on pressure, temperature and composition, *Applied Optics*, 6(1), 51-59. Resch, G. M., 1984. Water vapor radiometry in geodetic applications, *Geodetic Refraction*, 53-84.
- Smith, E. K., S. Weintraub, 1953. The constants in the equations for atmospheric refractive index frequency, *Proc. of IEEE*, 41, 1035-1037.
- Thayer, G. D., 1974. An improved equation for the radio refractive index of air, *Radio Sci.*, 9(10).
- Wang, C. S., R. Norman, T. K. Yeh, K. Zhang, S. L. Choy, T. P. Tseng, 2014. Investigation into the atmospheric parameters retrieved from ROPP and CDAAC using GPS radio occultation measurements over the Australian area, *Australian Journal of Earth Sciences*, 61(6), 785-792.
- Yeh, T. K., J. S. Hong, C. S. Wang, T. Y. Hsiao, C. T. Fong, 2014. Applying the water vapor radiometer to verify the precipitable water vapor measured by GPS, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 25(2), 189-201.
- Yeh, T. K. J. S. Hong, C. S. Wang, C. H. Chen, K. H. Chen, C. T. Fong, 2016. Determining the precipitable water vapor with ground-based GPS and comparing its yearly variation to rainfall over Taiwan, *Advances in Space Research*, 57(12), 2496-2507.
- Wei, H., S. G. Jin, X. He, 2012. Effects and disturbances on GPS-derived zenith tropospheric delay during the CONT08 campaign, *Advances in Space Research*, 50(5), 632–641.

附件：出席國際學術會議心得報告及發表之論文

一、參加會議經過

Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 為亞洲地區最大的地球科學研究與應用國際研討會，該研討會自 2003 年成立，其宗旨為藉由地球物理及其應用以提升人類福祉。今年 AOGS 研討會於 7 月 31 日至 8 月 5 日於大陸北京舉行，議題包含水文科學、地理生命科學、地球科學、大氣科學、海洋科學等；每年參與者來自於超過 50 個國家，人數皆超過 2000 人共聚一堂研討最新科學知識。這次第 13 屆的 AOGS 2016 會議地點在北京市的國家會議中心舉行，通過安檢進去會場即可看到 AOGS 會議標示牌。



或許是因為臺灣中央研究院的特聘研究員趙丰博士去年剛當選 AOGS 大會的主席，因此發現本次參與會議的臺灣學者較多，下圖為與大會主席及臺灣學者於大會報到處的合影。第一天的議程吾人參加 SE04：Geodetic Observations And Applications In Earth Sciences And Natural Hazards，並於傍晚參加大會開幕式，由於參加人數眾多，會場幾乎是座無虛席。

今年臺灣亦有多間研究機構到場設立攤位，包括國家太空中心、臺灣地震中心、臺灣颱風洪水研究中心、臺灣海洋科技研究中心共同參與，並以大型海報展示在太空與海洋的科技發展，以及對於地震、颱風、洪水等防救災上的應用系統研發成果。其中，國家太空中心以進行中的四項福爾摩沙衛星計畫表現我國的太空科技能量，臺灣地震中心中心介紹震災模擬及地震預警等防災領域之實際應用成果，臺灣颱風洪水中心則以建置之淹水潛勢預判系統為主要成果，台灣海洋科技研究中心展示其所營運海洋研究船在海洋地震、海嘯等長期觀測成果。



於第三天的會議行程中，下午我們特別撥空會同國家地震中心、國立中正大學、中央氣象局研究人員，一同前往中國國家地震局進行半天的交流，由地震預測研究所任金衛所長親自接待，並舉辦了一個小型的地震觀測研討會。



构造活动与地震形变学术交流报告会

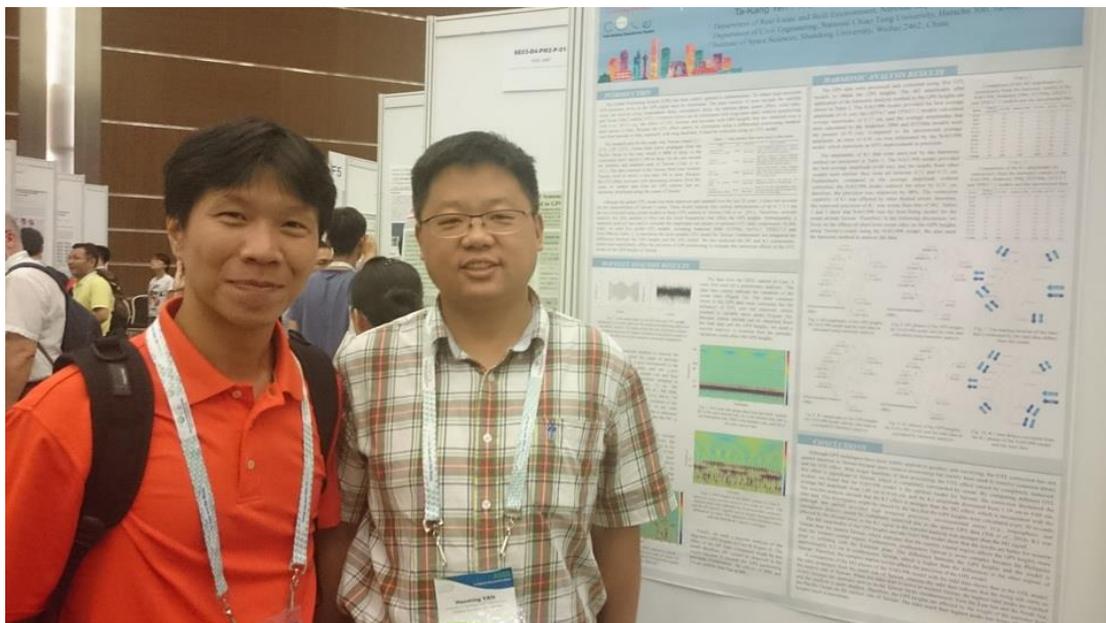
2016年8月3日（星期三），地点：预测所东五楼506会议室

议 程	
14:00~14:10	开 幕（任金卫所长发言）
14:10~16:00	学 术 交 流 报 告 会（主持人：任金卫 所 长）
14:10~14:30	陈朝辉 教授 由地震特性整合探讨大地震预警
14:40~15:00	谢斯特科夫·尼古拉 副教授 Recent crustal motion of Primorsky Krai as seen from GPS observations
15:10~15:30	蔡旻倩 博士 Anomalous high strain accumulation in SW Taiwan: Insight from 2016 Meinong Mw 6.4 earthquake
15:40~16:00	苏小宁 助理研究员 Current crustal deformation in Liupan Shan fault zone, NE Tibetan Plateau
16:30~17:00	参观地震预测重点实验室、中国大陆构造环境监测网络国家数据中心（主持人：张晓东 副所长）

我們並於學術交流報告會結束之後，順道參訪研究所的設備及研究成果，並針對相關的研究細節進行深入討論。綜整以上的參訪心得，中國大陸幅員廣大經費充裕，有許多的年輕科研人員充滿熱情；反觀臺灣方面雖然規模遠不如對岸，但在務實度及細膩度部分略勝一籌。會後孟國杰主任並當面邀請國立中正大學鄭凱謙教授、陳界宏教授及我，於今年下半年訪問四川地震局再次進行交流。



在第四天的議程中，除了正規的口頭發表及各學門特邀專題演講之外，下午吾人參加了海報發表，並於會場上與多國學者進行交談，也遇見多位過去的好友，互相學習、勉勵進而增進彼此的研究能量。



二、與會心得

AOGS 會議第一次於 2004 年在新加坡舉辦，新加坡再連續於 2005 和 2006 年主辦此會議，AOGS 自此以後發展為常態性國際會議，會議每年舉辦一次，開始由亞洲各國輪流主辦。歷經泰國、韓國、印度、台灣、澳洲、日本舉辦之後，今年係第十三次舉辦，第一次由中國大陸主辦，會議主題幾乎涵蓋當代亞太學者在此研究領域之主流研究。在本次會議中使用大地測量技術應用於地球科學的相關研究亦有諸多的成果，促進跨科學之研究及交流是非常重要的，因此能在此研討會中和其他專家學者或人員討論交流，而增加了未來合作和意見交流的機會。

三、發表論文全文或摘要

Study on the relationship between GPS height and ocean tidal loading around Taiwan

Ta-Kang Yeh^{1,*}, Yi-Da Chung², Guochang Xu³, Cheinway Hwang²

1. Department of Real Estate and Built Environment, National Taipei University, New Taipei 237, Taiwan
2. Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University, Hsinchu 300, Taiwan
3. Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 2462, China

Corresponding author:

Ta-Kang Yeh

Department of Real Estate and Built Environment

National Taipei University

No. 151, Daxue Rd., Sanxia Dist., New Taipei 237, Taiwan, ROC

Tel: +886-2-8674-1111 ext. 67430

Fax: +886-2-8671-5308

E-mail: bigsteel@mail.ntpu.edu.tw

Abstract

GPS utilizes static relative positioning to mitigate common errors and has the ability to remove the effects of Ocean Tidal Loading (OTL). OTL effects cannot be completely removed by increasing the baseline length during GPS data processing and must be corrected with OTL models. In this study, we collected GPS data from ten stations that are located along the coast of Taiwan. The periodic effect of OTL is discussed through a wavelet analysis and a harmonic analysis. We found that in the tidal data, the periodic M2 signal was stronger than the K1 signal, which was not the case for the GPS height data. This result indicated that the common errors were not completely removed from the GPS heights and that the corresponding period was approximately one day, which might result in a stronger K1 signal. Finally, we analyzed the tidal data and the M2 amplitudes and phases of the GPS heights using a harmonic analysis and compared the results with the OTL model. The comparison indicated that the best agreement occurred in southwestern Taiwan and that the poorest agreement occurred in southeastern Taiwan with a maximum error of 0.3 cm. The phase results showed that the OTL model overlapped with the tidal data in the open ocean around central Taiwan, and both the GPS heights and the heights from the OTL model were 1.5 to 2 hours earlier than the tidal data. A GPS monitoring network has been established along the coasts of Taiwan to study the sea surface height and crustal deformation. Because Taiwan is surrounded by the ocean, the OTL effect is significant and must be corrected to obtain accurate GPS positions.

Keywords: GPS, ocean tidal loading, tide gauge, Taiwan.

INTRODUCTION

The Global Positioning System (GPS) has been widely applied to infrastructure. To obtain high precision GPS positions, errors in the GPS signal must be eliminated. The main sources of error include the satellite clock, the receiver clock, tropospheric delay, ionospheric delay, the antenna phase center offset, solid tides, and Ocean Tidal Loading (OTL). Common errors can be eliminated with long-term static relative positioning (Yeh *et al.*, 2013), e.g., the effects of OTL increase and decrease with GPS heights that are obtained over a short period of time. Because the OTL effect cannot be eliminated using a differential positioning method over short periods of time, especially with long baselines, it must be corrected using an OTL model.

The research area for this study was Taiwan Island (21°-25°N, 120°-122°E). Ocean tidal waves propagate from the Pacific Ocean to the east, which is 4000 m deep, to the continental shelf, which is 200 m deep, via the seas around the northern and southern ends of Taiwan (Chen *et al.*, 2011). The tides continue to the Taiwan Strait near western Taiwan, most of which is less than 100 m deep. Because the OTL effect increases with decreasing distance from the coast, we studied data from ten GPS stations that are uniformly distributed along the coasts of Taiwan.

Although the global OTL model has been improved and updated over the last 20 years, it does not account for the characteristics of Taiwan's coasts. These results indicate that vertical deformations of up to ±3.5 cm are not corrected using global models at these GPS stations in Taiwan (Yeh *et al.*, 2011). Therefore, wavelet analysis was first adopted to filter out the fixed frequencies that affect the GPS heights. Subsequently, a harmonic analysis was used to calculate the amplitudes and phases of selected OTL tidal components. In this study, we used five global OTL models, including Andersen 2006, EOT08a, GOT4.7, TPXO7.2 and NAO.99b (see Table 1), to determine the most suitable OTL model for Taiwan. Furthermore, we compared the differences between the GPS heights and the OTL model. We also analyzed the M2 and K1 components, which most significantly affect the precision of GPS positioning, to evaluate the correction effects of the OTL model on the GPS heights in Taiwan.

WAVELET ANALYSIS RESULTS

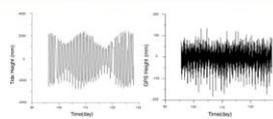


Fig. 1. Tide gauge data (a on the left) and GPS height variations (b on the right) for the original month-long data from the SHJU station. The plots on the left and right have similar variations because the higher resolution calculation results in several GPS errors that cannot be corrected completely.

We used the wavelet method to convert the gauge data to determine the types of periodic signals (Figure 2). The x-axis corresponds to the timespan of the tidal data, and the y-axis corresponds to time. The deeper red and blue colors indicate that the maximum variation in tidal height is approximately ±3 m. We determined that the periods of M2, K1, MF, MM, and SA are approximately 12 h, 24 h, 360 h, 720 h and 8736 h, respectively. The variation of the ocean tides is the sum of all of the tidal components. The tidal difference that is indicated by the variation in colors indicates that the M2 is more variable than K1.

Figure 3 shows the results of the wavelet analysis. The deeper the red-blue colors, the stronger the variation in the GPS heights at the corresponding time. The wavelet analyses of M2 and K1 indicated that their periods were correlated, which can result in feedback effects during the analysis. This difference might be caused by the calculation of GPS heights that include a common error with a 1 day period that cannot be removed with short-term data.

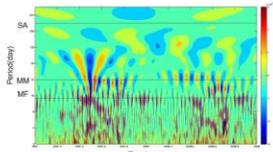


Fig. 4. GPS heights at the SHJU station in Case B analyzed using wavelet analysis on a scale of 1 hour. SA is the semi-annual tide. The effects of long-term signals cannot be clearly observed.

Table 1. Tidal models that were used in this study.

Model	Year	Description	Type of solution
Andersen 2006	Global	0.5 by 0.5 Long wavelength adjustment of TPXO7.2 using TPXO7.2 data. Average global error had been removed.	Global
EOT08a	Global	0.5 by 0.5 10-day data from different satellite missions. The tide solution are given as a 10 x 10 degree grid.	Global
GOT4.7	Global	0.5 by 0.5 Based on the EOT08a model, including some land and regional hydrodynamic models. The tide solution are given as a 10 x 10 degree grid.	Global
TPXO7.2	Global	0.5 by 0.5 Based on TPXO7.2 has separate the regional components in a 10 x 10 degree grid.	Global
NAO.99b	Global	0.5 by 0.5 Based on the same hydrodynamic model as the Andersen model but incorporate the TPXO7.2 solution data.	Global

The data from the SHJU station in Case A were first used for a preliminary analysis. The tidal data clearly indicate the variation of the ocean tides (Figure 1a). The most common errors in the GPS data were corrected, but the influence of OTL was not removed, which resulted in variable wave peaks (Figure 1b). Because similar periods can be observed from the tidal data and the GPS heights, we used a wavelet analysis to examine how the periodic variations could affect the GPS heights.

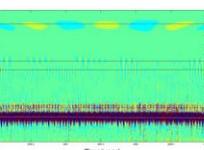


Fig. 2. Two-year tide gauge data from the SHJU station. M2 is the semi-diurnal tide, K1 is the diurnal tide, MF is the fortnightly tide, MM is the monthly tide, and SA is the semi-annual tide.

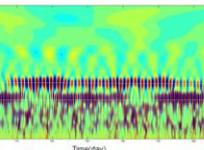


Fig. 3. GPS heights at the SHJU station in Case A analyzed using wavelet analysis at a scale of 1 hour. The dashed white line indicates the fixed periodic variation, and the M2 and K1 signals can be clearly distinguished by differences in color. The variations of the red-blue colors indicate that the K1 signal is stronger.

Finally, we used a wavelet analysis of the long-term GPS heights in Case B (Figure 4). The effect of the MF tidal component might be too small, therefore, MF cannot be observed in the results because it exceeds the GPS positioning precision. Furthermore, the effects of MM and SA are smaller than that of MF.

HARMONIC ANALYSIS RESULTS

The GPS data were processed and corrected using five OTL models to obtain the GPS heights. The M2 amplitudes after application of the harmonic analysis method to the GPS heights are shown in Table 2. The NAO.99b model provided the best average amplitude (0.16 cm); the GOT4.7 and TPXO7.2 models calculated average amplitudes of 0.17 cm, and the average amplitudes that were calculated by the Andersen 2006 and EOT08a models were the poorest (0.19 cm). Compared to the uncorrected average amplitude, an error of 0.91 cm was eliminated by the NAO.99b model, which represents an 85% improvement in precision.

The amplitudes of K1 that were analyzed by the harmonic method are presented in Table 3. The NAO.99b model provided the best average amplitude (0.68 cm), and the results from other models were similar; they were all between 0.71 and 0.72 cm. Furthermore, compared to the average amplitude without correction, the NAO.99b model reduced the error by 0.51 cm; therefore, the precision was improved by 48%. The correction capability of K1 was affected by other diurnal errors; therefore, the improved precision of K1 was worse than that of M2. Tables 2 and 3 show that NAO.99b was the best-fitting model for the ocean around Taiwan. Therefore, in the following discussion, we focus on the effects of short-term ocean tides on the GPS heights along Taiwan's coasts using the NAO.99b model. We also used the harmonic method to analyze the data.

Table 2. Comparison of the M2 amplitudes (in centimeters) from the harmonic results of the NAO.99b, Andersen 2006, EOT08a, GOT4.7, and TPXO7.2 models and the uncorrected data.

Station	NAO.99b	Andersen 2006	EOT08a	GOT4.7	TPXO7.2
KYIN	1.0	0.1	0.1	0.1	0.1
HSU	1.0	0.1	0.1	0.1	0.1
TEOS	1.5	0.2	0.2	0.2	0.2
TSYU	1.1	0.1	0.1	0.1	0.1
HWYU	0.9	0.0	0.1	0.1	0.1
HSUN	0.8	0.0	0.1	0.1	0.1
HSAL	1.2	0.1	0.1	0.1	0.1
HSUI	1.1	0.0	0.1	0.1	0.1
TYTU	0.7	0.3	0.3	0.3	0.3
Average	0.97	0.08	0.09	0.09	0.07

Table 3. Comparison of the K1 amplitudes (in centimeters) from the harmonic results of the NAO.99b, Andersen 2006, EOT08a, GOT4.7, and TPXO7.2 models and the uncorrected data.

Station	NAO.99b	Andersen 2006	EOT08a	GOT4.7	TPXO7.2
KYIN	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9
HSU	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0
TEOS	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0
TSYU	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7
HWYU	1.0	0.2	0.6	0.6	0.6
HSUN	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6
HSAL	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1
HSUI	1.1	0.9	0.9	0.9	0.9
TYTU	0.9	0.2	0.2	0.2	0.2
Average	0.99	0.68	0.72	0.72	0.71



Fig. 5. M2 amplitudes of the GPS heights, the NAO.99b model and the tidal data as calculated using harmonic analysis.



Fig. 6. M2 phases of the GPS heights, the NAO.99b model and the tidal data as calculated using harmonic analysis.

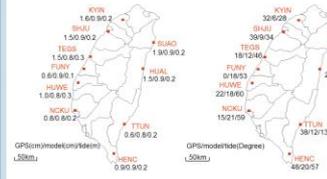


Fig. 7. The starting location of the tides that is indicated by the tidal data differs from the model.

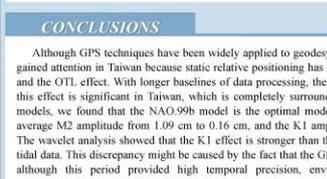


Fig. 8. K1 amplitudes of the GPS heights, the NAO.99b model and the tidal data as calculated using harmonic analysis.

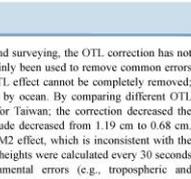


Fig. 9. K1 phases of the GPS heights, the NAO.99b model and the tidal data as calculated using harmonic analysis.

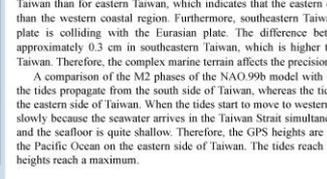


Fig. 10. K1 time delays converted from the K1 phases of the NAO.99b model and the tidal data.

CONCLUSIONS

Although GPS techniques have been widely applied to geodesy and surveying, the OTL correction has not gained attention in Taiwan because static relative positioning has mainly been used to remove common errors and the OTL effect. With longer baselines of data processing, the OTL effect cannot be completely removed; this effect is significant in Taiwan, which is completely surrounded by ocean. By comparing different OTL models, we found that the NAO.99b model is the optimal model for Taiwan; the correction decreased the average M2 amplitude from 1.09 cm to 0.16 cm, and the K1 amplitude decreased from 1.19 cm to 0.68 cm. The wavelet analysis showed that the K1 effect is stronger than the M2 effect, which is inconsistent with the tidal data. This discrepancy might be caused by the fact that the GPS heights were calculated every 30 seconds; although this period provided high temporal precision, environmental errors (e.g., tropospheric and ionospheric delays) cannot be completely removed due to the sparse GPS data (Yeh *et al.*, 2014). K1 was affected by the diurnal error, so the K1 signal in the wavelet analysis was stronger than the M2 signal. The M2 amplitudes of the GPS heights and the NAO.99b model show that the results are better for western Taiwan than for eastern Taiwan, which indicates that the eastern coastal region affects the GPS heights more than the western coastal region. Furthermore, southeastern Taiwan is more complex because the Philippine plate is colliding with the Eurasian plate. The difference between the GPS heights and the model is approximately 0.3 cm in southeastern Taiwan, which is higher than the differences in the other regions of Taiwan. Therefore, the complex marine terrain affects the precision of the OTL model. A comparison of the M2 phases of the NAO.99b model with the tidal data shows that in the OTL model, the tides propagate from the south side of Taiwan, whereas the tidal data indicate that the rising tide starts on the eastern side of Taiwan. When the tides start to move to western Taiwan, the highest tidal peaks are reached slowly because the seawater arrives in the Taiwan Strait simultaneously from the East Sea and the South Sea, and the seafloor is quite shallow. Therefore, the GPS heights are affected by the weight of the seawater from the Pacific Ocean on the eastern side of Taiwan. The tides reach their highest peaks two hours after the GPS heights reach a maximum.

四、建議

GPS 的應用已經從單純的定位及導航跳脫至整個地球科學，近四十年來隨著 GPS 技術精度的提高，其衍生而來的民生用途亦漸漸的廣泛起來，而隨著多國皆欲發展各自的導航星系，Multi-GNSS 似乎正在流行並取代 GPS 一詞。Multi-GNSS 對於遙測大氣含水量、測量電離層全電子含量亦將是我國未來衛星計畫的重點項目。目前許多先進國家都挹注大量人力和經費進行相關的研究工作。國內運用 GPS 技術之相關研究人員，更應規劃整合人力資源朝更高更遠的目標邁進。將來可以和各國先進研究單位及公司多合作，以期能將學術應用於地球工程產業的發展。科技的研發不能只偏重於高科技，如我國過去太注重半導體及光電產業的發展，只重視量產而輕忽研發，造成生產過剩及重大虧損；地球環境的變遷目前已經逐漸被全世界所重視，將來應重視地球系統這樣的學科及相關技術才能對下一代所生存的環境負擔起一些應負的責任。

五、攜回資料名稱及內容

大會議程：AOGS 13th Annual Meeting。