

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 (3/3)

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB-106-M-02

執行期間：106 年 1 月 1 日至 106 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 106 年 12 月 12 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 (3/3)		
計畫編號	MOTC-CWB-106-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	106	執行期間	106 年 1 月 1 日至 106 年 12 月 31 日
本期經費 (單位：千元)	505 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 (%)
	505 千元	505 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	48 頁	使用語言	中文
中英文關鍵詞	全球定位系統、地基、訊號延遲、可降水量 GPS, ground-based, signal delay, precipitable water vapor		
研究目的	<ol style="list-style-type: none"> 1. 針對中央氣象局現有之即時地基 GPS 觀測處理系統進行必要的作業維運與技術轉移，以強化作業維運的能力。本年度除了將持續進行系統的基本維運之外，也將提供適當的教育訓練，讓後端資料的應用研究人員，亦可初步瞭解系統之運作狀況，並開發系統運作的即時預警機制，當系統計算發生問題時可以即時進行狀況排除。 2. 校驗、分析與改進全臺地基 GPS 觀測導出之天頂角延遲量的品質，以改進可降水量產品的品質以及資料同化效能，並進而改善模式的短期定量降水預報。本年的工作將持續利用 POST 解的成果當作參考真值，並持續評估 NRT 與 DP 解的資料完整度及解算誤差，並以 GIS 呈現其空間之分配情形，藉以提供前端的資料管理者後續維護之參考，此一資料亦可提供後端資料同化的研究同仁資料使用之建議。 3. 分析與評估精密單點定位技術，以因應測站數目增加後所導致的運算瓶頸。在過去的計畫中，已完成利用相對法靜 		

	<p>態相對定位來處理地基 GNSS 的水氣反演及精度驗證，但改用絕對法 PPP 精密單點定位來計算時，獲得的大氣中可降水量其穩定度仍有加強的空間；雖然採用絕對法可以獲得絕對量的水氣值，但其精度及可靠度不佳仍是必須加以克服的問題。後續將進一步提升 PPP 解算的穩定性，此一作法在長期而言亦可提高解算的效率。</p> <p>4. 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。此一部份將分為兩個方面來進行，其一為納入測站分級制度，以上一年度挑選的 111 個測站進行計算、統計與分析，如此可以是先剔除解算誤差較大或資料穩定度較差的測站，同時亦可節省即時處理的電腦計算時間；其二為改採資料串流的方式取代現有的 ftp 資料下載，初期可採用兩者並行的模式進行，待其穩定之後再做模式切換。</p> <p>5. 本年度研究成果需於國際研討會或國際期刊發表論文，並協助中央氣象局收集國際上 GPS 資料處理最新的發展概況。</p>
研究成果	<p>1. 在資料完整度的部分，可以發現 2017 年的成果，時間延遲兩小時 NRT 的成果，78.4% 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 79.5% 左右的 GPS 觀測資料，其中可以發現 2017 全年比起上半年的完整度 86.8% 下降 7%，主要是因為下半年 IGS 站的資料有問題，導致連續兩週的 DP 解算錯誤；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 93.7%，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。</p> <p>2. 在解算誤差的部分，以 POST 解作為參考值（真值），可以發現 2017 年的成果，時間延遲兩小時 NRT 的解算誤差為 2.9 cm，若分析 DP 的結果，時間延遲兩天之後其誤差已提升至 1.3 cm，相較於 2016 年皆有顯著的提升，但皆略遜於 2017 上半年的表現。</p> <p>3. 在資料品質敏感度測試的部分，先以後處理的 POST 解成果為基礎，接下來挑選並刪除 2017 年被評定為誤差過大的七個測站，完成之後再重新解算一次 POST 解，並評估刪除測站前與刪除測站後之差異。發現每日的平均差異均介於 0.1 至 0.2 cm 之間，發現兩者的差異不大，各測站的 ZTD 解算成果平均差異為 0.13 cm，故推論資料品質較差的測站納入計算，對於其他測站的解算成果影響不大。</p>

具體落實應用情形	<ol style="list-style-type: none"> 1. 已完成資料轉檔程式之平行化處理：隨著計算測站數持續增加，原使用一隻程式批次化處理進行資料轉檔，每次所需的時間最長需等候 70 分鐘；現改採十隻程式平行化運作，已大幅提昇資料轉檔之效能。 2. 已完成新增測站成果彙整檔：配合中央氣象局與香港天文台之互惠合作，協助修正程式每日自動提供 20 個測站的成果彙整檔，方便雙方之計算成果互惠交流。 3. 新增日本 Geonet 測站納入系統進行計算：由於日本 Geonet 測站的資料提供格式更改，造成 NRT 解算日本站資料時無法成功轉換為 RINEX 檔，導致日本 Geonet 測站的成果無法求解。因為 UCAR 的版本寫的很複雜，修正改為接收新格式的資料困難度高，目前已完成新版的 GetgeonetRnxNrt.pl 程式，已確認可以轉出正確的 RINEX 檔。 4. 已邀請澳洲地球科學研究中心 Dr. Michael Moore 與 Dr. Carl Wang 來訪：為期一週的時間，分別赴中央氣象局進行專題演講、國立交通大學進行專題演講、中央研究院進行學術座談、國立臺北大學進行學術座談。 5. 資料串流及精密單點定位解算進度：目前 6g 伺服器的軟體系統已重新架設完成，包含 Bernese 5.2 升級版、TEQC、BNC 等相關軟體，皆已架設完成並進入測試階段，感謝氣象局地震中心和資訊中心的幫忙，Ntrip Caster 和 IGS-IP Ntrip BroadCater 目前已經可以順利連線，初期因為 6g 伺服器只能安裝 32 位元的程式，幾乎所有的程式都需要自己重新編譯，所以花了不少時間在系統安裝和程式編譯部分，另一方面系統效率亦不佳，希望未來可有較新的 64 位元的系統可使用以減少相關困擾。
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 130 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-ZWD 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) 針對中央氣象局現有之即時地基 GPS 觀測處理系統進行必要的作業維運與技術轉移，以強化作業維運的能力。本年度除了將持續進行系統的基本維運之外，也將提供適當的教育訓練，讓後端資料的應用研究人員，亦可初步瞭解系統之運作狀況，並開發系統運作的即時預警機制，當系統計算發生問題時可以即時進行狀況排除。
- (2) 校驗、分析與改進全臺地基 GPS 觀測導出之天頂角延遲量的品質，以改進可降水量產品的品質以及資料同化效能，並進而改善模式的短期定量降水預報。本年的工作將持續利用 POST 解的成果當作參考真值，並持續評估 NRT 與 DP 解的資料完整度及解算誤差，並以 GIS 呈現其空間之分配情形，藉以提供前端的資料管理者（例如地震測報中心）後續維護之參考，此一資料亦可提供後端資料同化的研究同仁（例如氣象資訊中心）資料使用之建議。
- (3) 分析與評估精密單點定位（Precise Point Positioning, PPP）技術，以因應測站數目增加後所導致的運算瓶頸。在過去的計畫中，已完成利用相對法靜態相對定位來處理地基 GNSS 的水氣反演及精度驗證，但改用絕對法 PPP 精密單點定位來計算時，獲得的大氣中可降水量其穩定度仍有加強的空間；雖然採用絕對法可以獲得絕對量的水氣值，但其精度及可靠度不佳仍是必須加以克服的問題。後續將進一步提升 PPP 解算的穩定性，此一作法在長期而言亦可提高解算的效率。
- (4) 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。此一部份將分為兩個方面來進行，其一為納入測站分級制度，以上一年度挑選的 111 個測站進行計算、統計與分析，如此可以是先剔除解算誤差較大或資料穩定度較差的測站，同時亦可節省即時處理的電腦計算時

間；其二為改採資料串流的方式取代現有的 ftp 資料下載，初期可採用兩者並行的模式進行，待其穩定之後再做模式切換。

- (5) 本年度研究成果需於國際研討會或國際期刊發表論文，並協助中央氣象局收集國際上 GPS 資料處理最新的發展概況。

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/s^2)，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 $\int_H^\infty \left[\left(k_2 - k_1 \frac{M_w}{M_d} \right) \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right] d_z$ 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

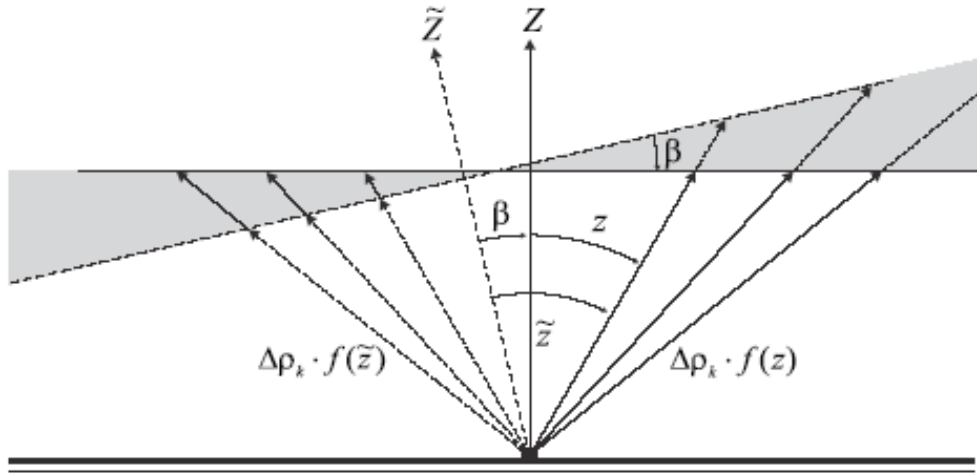


圖 1 對流層與地球幾何天頂方向示意 (Hugentobler *et al.*, 2001)

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

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

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

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

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。

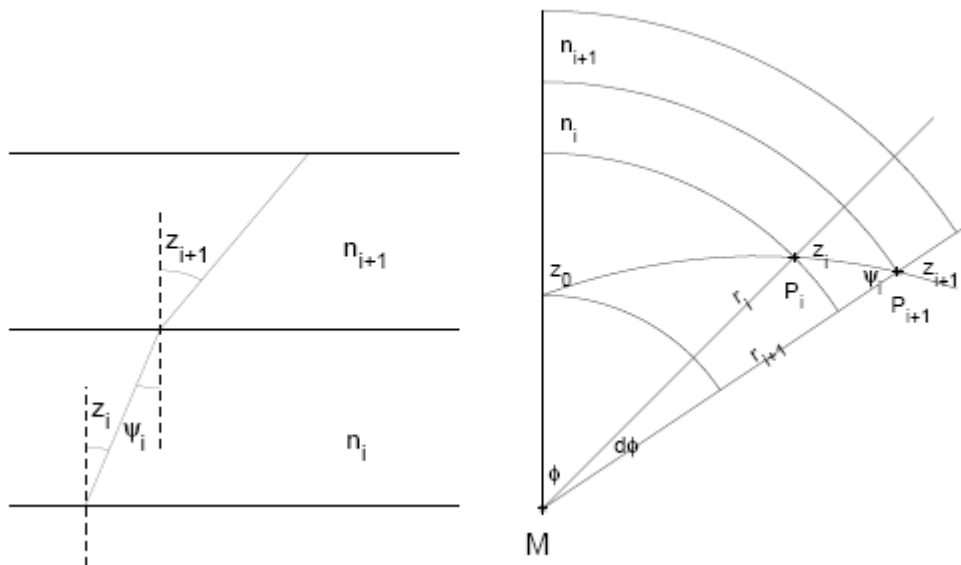


圖 2 司乃耳定律訊號行進路線圖 (Kleijer, 2004)

本研究除了將利用過去已發展並確認反演精度的相對法來計算 PWV，並預計同時採用絕對法 (精密單點定位，簡稱 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，並估計天頂向遲延量。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 $D_{trop,h}^Z$ 以模式求得的遲延量代入；且已知電離層遲延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，消除電離層遲延量。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遲延量

式中欲求解的未知數有 i, j 兩站天頂向對流層遲延量，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。而溼遲延與可降水的關係，可由上式右邊第二項提出表示為：

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

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

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。在資料完整度的部分，由圖中可以發現 POST 解在 2017 年的平均值為 93.7%，DP 解在 2017 年的平均值為 79.5%，上述兩者的資料完整度都相當穩定；而 NRT 解在 2017 年的平均值為 78.4%，其數值表現也相當優異，但偶而因為網路品質或快速星曆問題使得資料完整度大幅下滑，在 2017 年共計有 15 天的資料完整度低於 60%。

接下來再將 2016 年的資料完整度繪製圖 4 來進行比較，由圖中可以看到 POST 解在 2016 年的平均值為 83.7%，DP 解在 2016 年的平均值為 78.6%，發現 2017 年的資料完整度已有明顯提升，應與網路傳輸品質改善有關；而 NRT 解在 2016 年的平均值為 54.1%，遠低於 2017 年的 82.2%，顯示今年在近即時的成果較為完整，其原因可能來自於本計畫於 2016 年底，將資料轉檔程式由單一運作

調整為 10 隻程式平行運算提升運算效能有關。

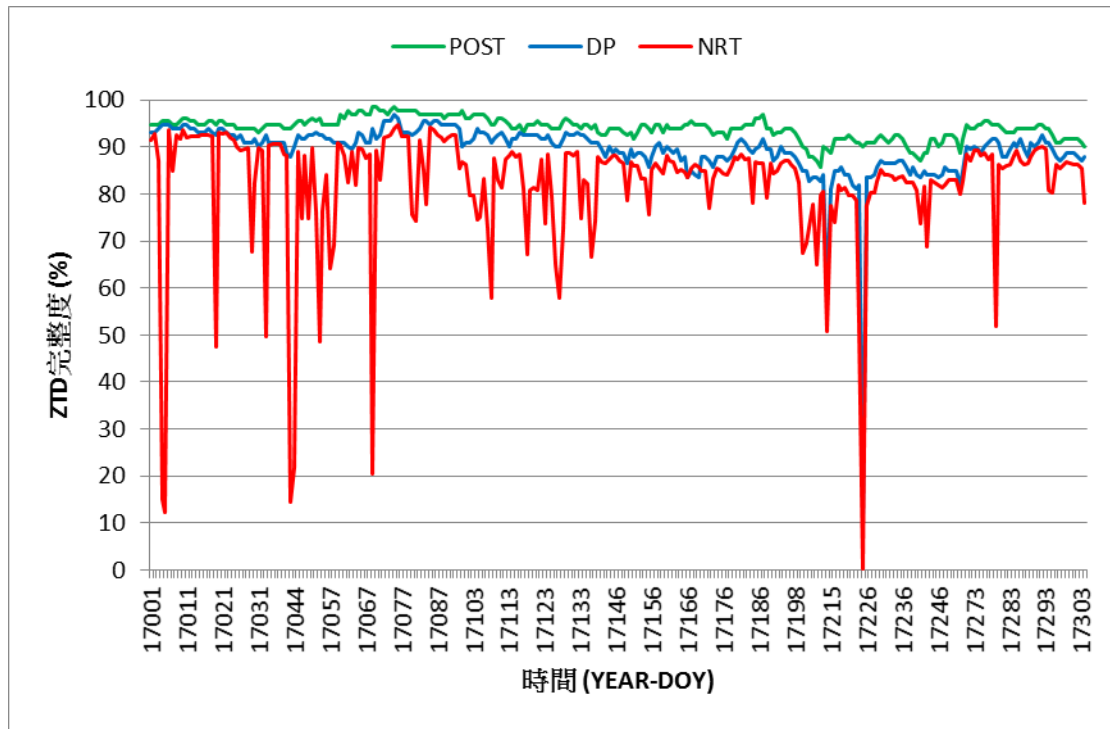


圖 3 2017 年 POST、DP、NRT 之資料完整度

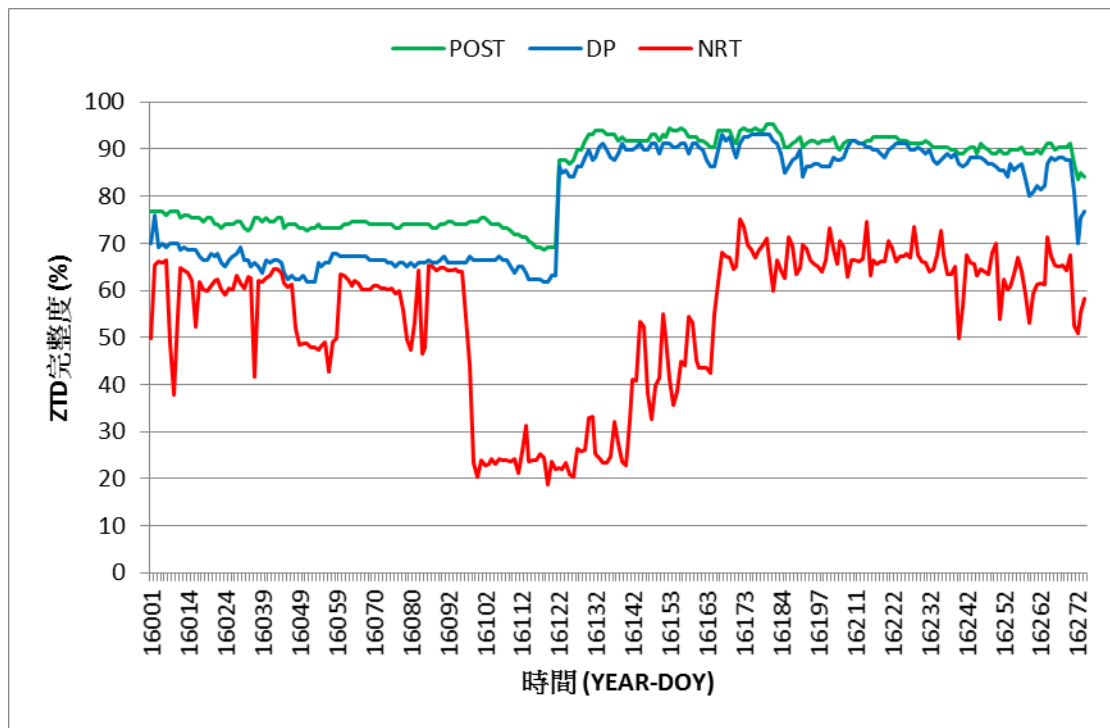


圖 4 2016 年 POST、DP、NRT 之資料完整度

整體而言，上述三種方法的資料完整度統計結果如表 1 所示。可以發現時間延遲兩小時 NRT 的成果，78.4%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 79.5%左右的 GPS 觀測資料，其中可以發現 2017 全年比起上半年的完整度 86.8%下降 7%，主要是因為下半年 IGS 站的資料有問題，導致連續兩週的 DP 解算錯誤；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 93.7%，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。

表 1 不同解算機制之資料完整度

解算機制	資料完整度 (2016 年)	資料完整度 (2017 上半年)	資料完整度 (2017 年)
POST 解	83.7%	93.6%	93.7%
DP 解	78.6%	86.8%	79.5%
NRT 解	54.1%	77.9%	78.4%

至於 POST、DP、NRT 解的完整度空間分布如圖 5 所示。由圖 5 左方的 POST 解中可以明顯的看到，資料遺失較為嚴重的區域在於北部山區及西部沿海的測站，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 DP 與 NRT 解），資料完整度最差的部分在臺灣東北部，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。

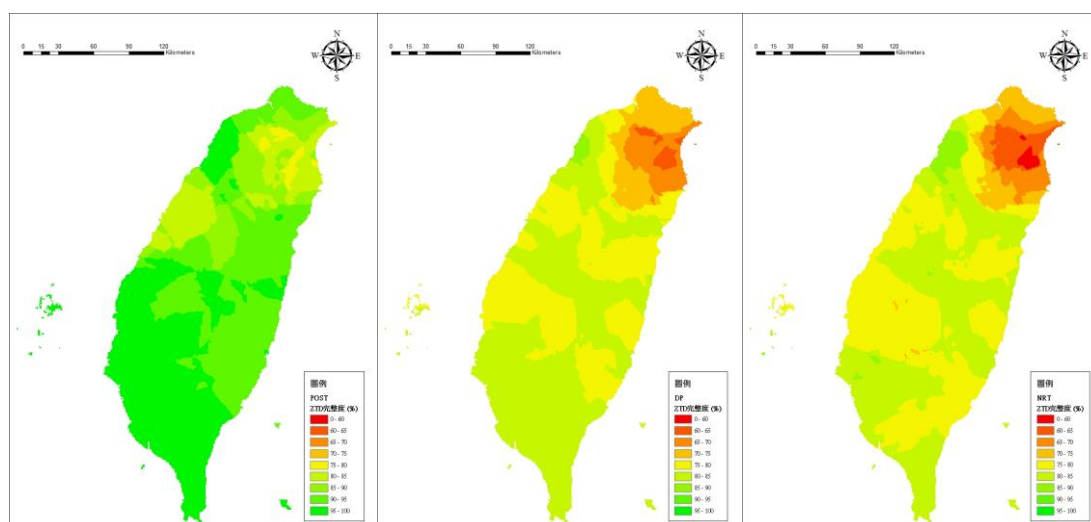


圖 5 POST、DP、NRT 解之資料完整度分布圖

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，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於 2017 年及 2016 年的成果，分別繪製圖 6~7 做進一步分析。

由圖 7 可以看到在 DP 解的部分，2017 年的解算誤差為 1.3 cm，優於 2016 年的 2.2 cm，但略遜於 2017 上半年的 0.8 cm；而在 NRT 解的部分，2017 年的解算誤差為 2.9 cm，優於 2016 年的 3.8 cm，但略遜於 2017 上半年的 1.9 cm。

接下來我們針對中央氣象局較有意義的 NRT 成果進行進一步的精度分析，統計 2017 年共計有 15 天的資料完整度低於 60%，其平均誤差為 3.5 公分，此一數值高於 2017 全年平均誤差 2.9 cm，顯示解算精度與資料完整度有相關性，但也並非絕對相關。

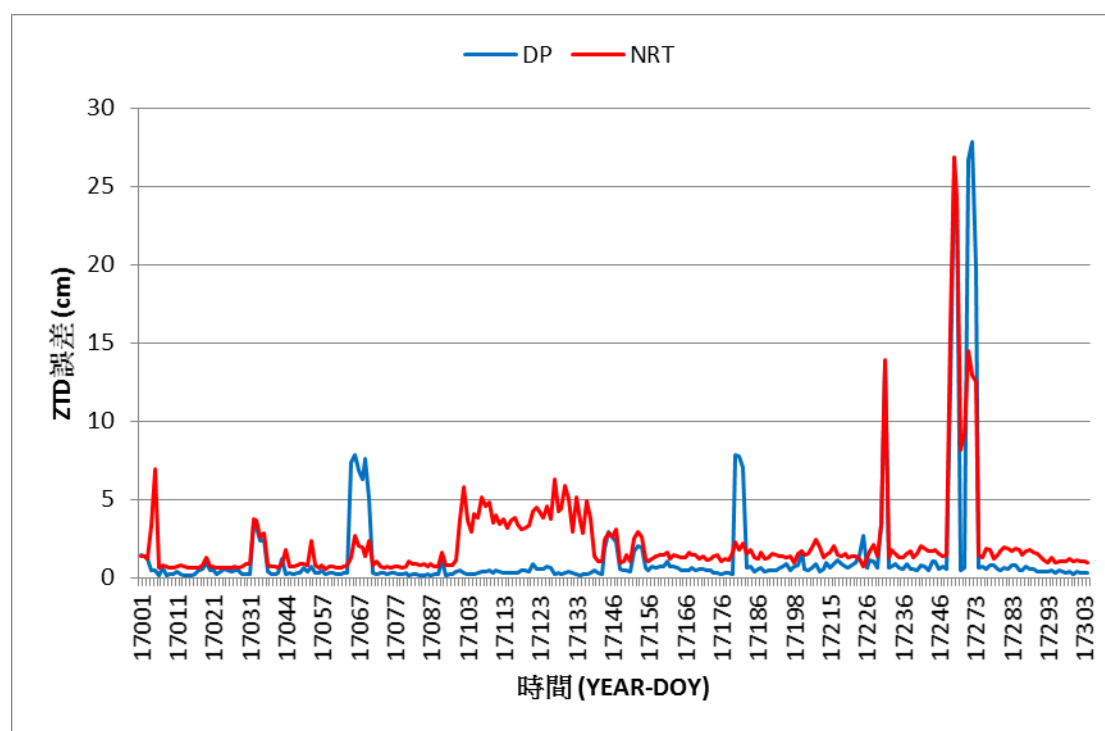


圖 6 2017 年 DP、NRT 之解算誤差

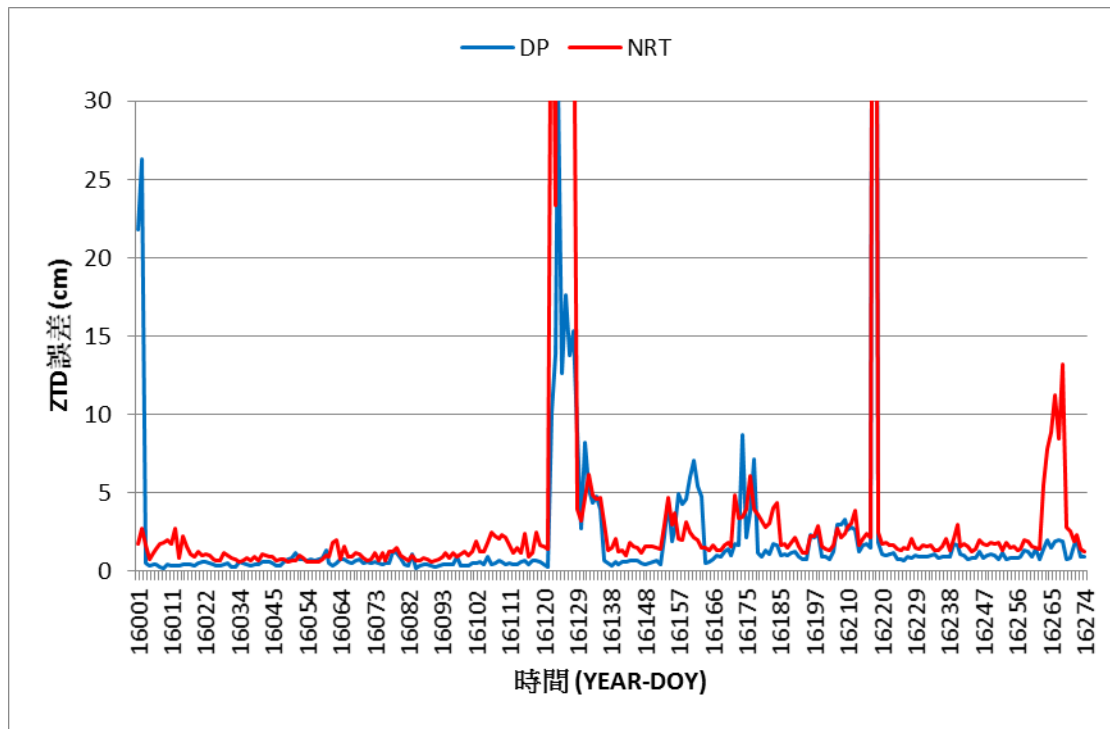


圖 7 2016 年 DP、NRT 之解算誤差

整體而言，上述兩種方法以 POST 解作為參考值（真值），其解算誤差統計結果如表 2 所示。可以發現 2017 年的成果，時間延遲兩小時 NRT 的解算誤差為 2.9 cm，若分析 DP 的結果，時間延遲兩天之後其誤差已提升至 1.3 cm，相較於 2016 年皆有顯著的提升，但皆略遜於 2017 上半年的表現。

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 (2016 年)	解算誤差 (2017 上半年)	解算誤差 (2017 年)
DP 解	2.2 cm	0.8 cm	1.3 cm
NRT 解	3.8 cm	1.9 cm	2.9 cm

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 解中可以看到，計算誤差較大的區域在於東部與西部的沿海測站，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中央山區、東部沿海及東北角，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。

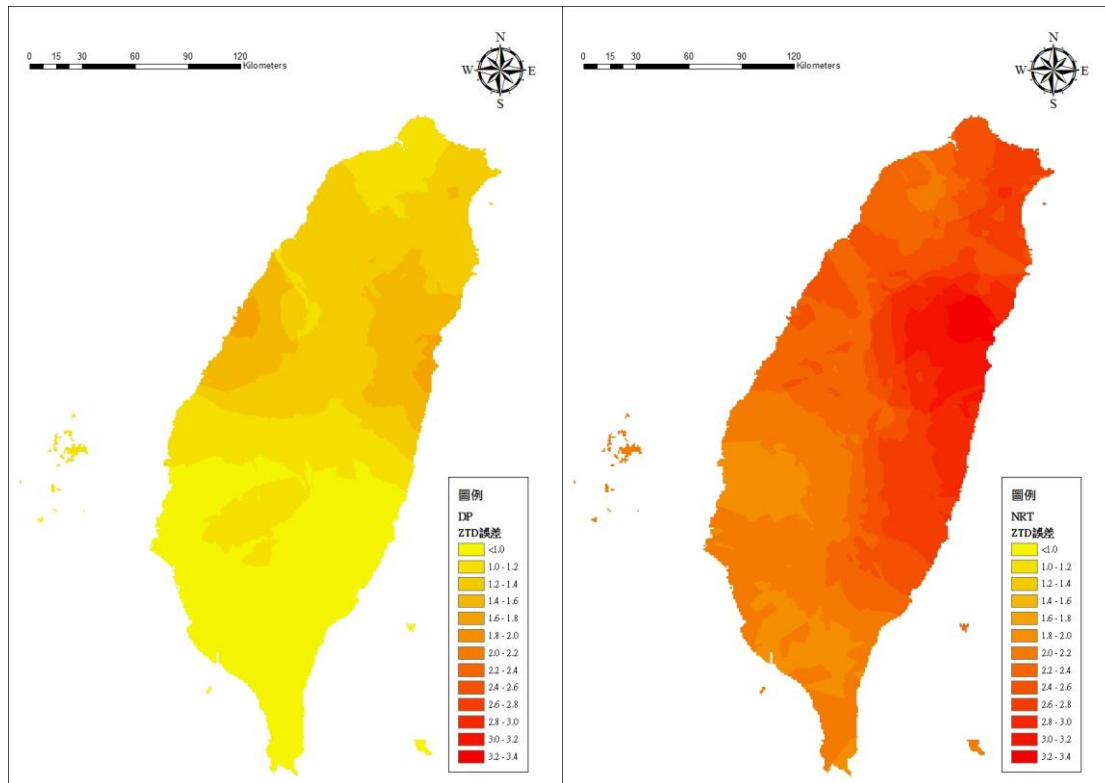


圖 8 DP、NRT 解之解算誤差分布圖

4-3 資料品質敏感度測試

本測試選取了 2017 年 DOY 277 至 DOY 281 共計八天的資料來進行測試，先以後處理的 POST 解成果為基礎；接下來挑選並刪除 2017 年被評定為誤差過大（誤差超過 2 倍標準差）的七個測站（BLOW、CHEN、CHUL、DCHU、DULI、FENP、SAN2），完成之後再重新解算一次 POST 解，並評估刪除測站前與刪除測站後之差異，刪除不良測站的差異如圖 9 所示。

從圖中可以看到每日的平均差異均介於 0.1 至 0.2 cm 之間，發現兩者的差異不大，各測站的 ZTD 解算成果平均差異為 0.13 cm，故推論資料品質較差的測站納入計算，對於其他測站的解算成果影響不大。

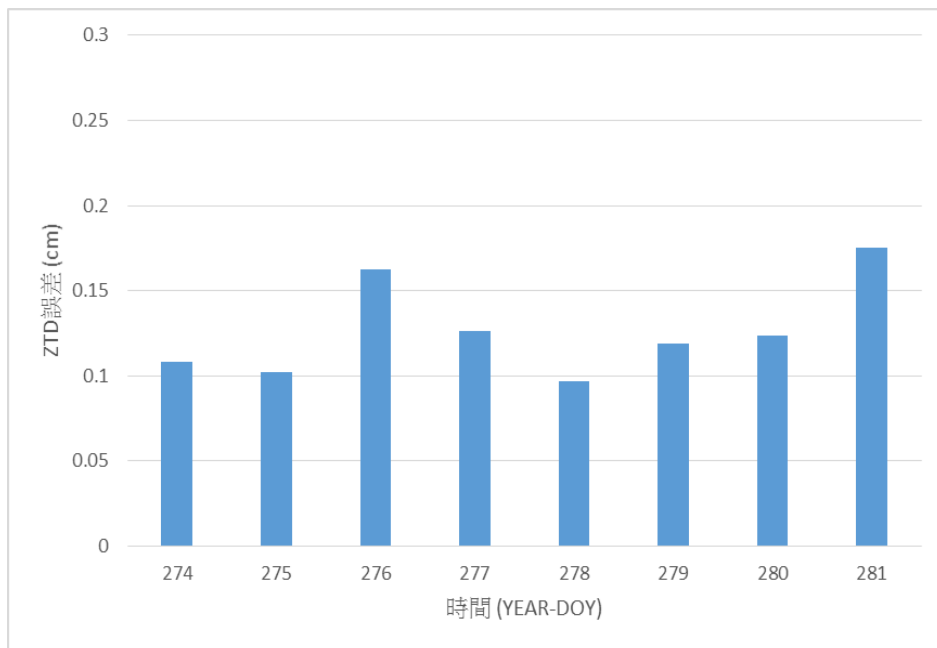


圖 9 刪除不良測站的 POST 解成果差異

接下來吾人針對 2016 年精度有問題之七個測站進行追蹤，進而瞭解這些測站在 2017 年的表現，可分為下列三類：

- (1) 於 2017 年測站換址：FKDO（新站名 FKD2）、WANC（新站名 WAN2）
- (2) 於 2017 年持續不佳：BLOW、FENP

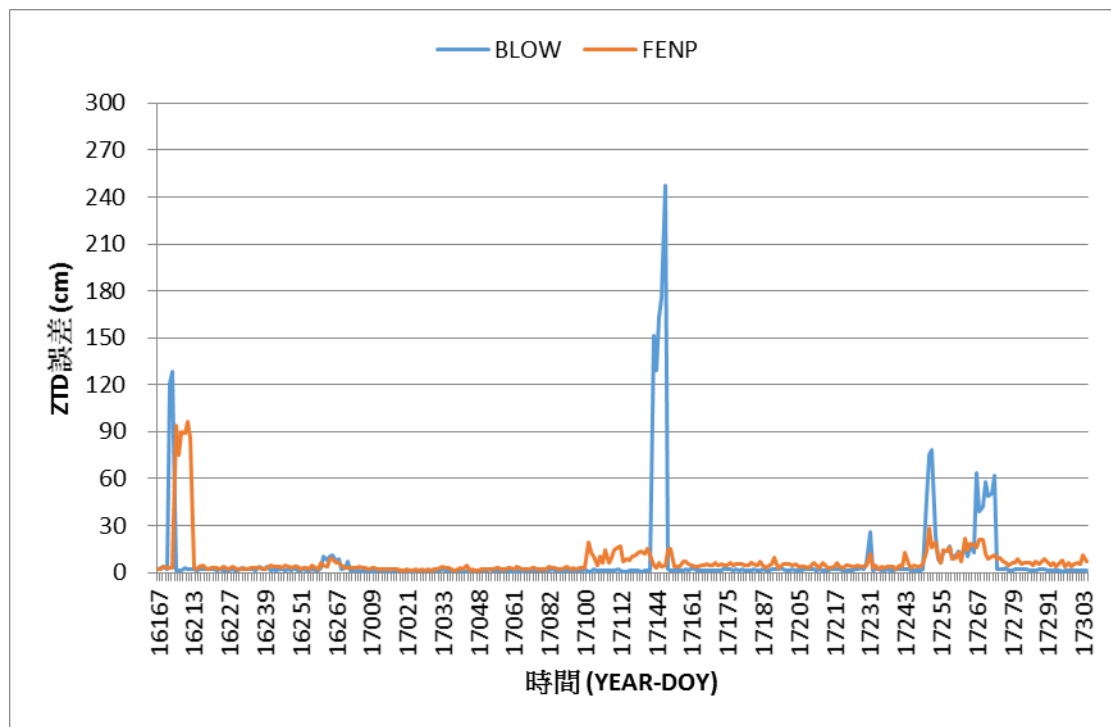


圖 10 2016 年異常且於 2017 年持續不佳之測站

(3) 於 2017 年恢復正常：FLON、GAIS、MUDA

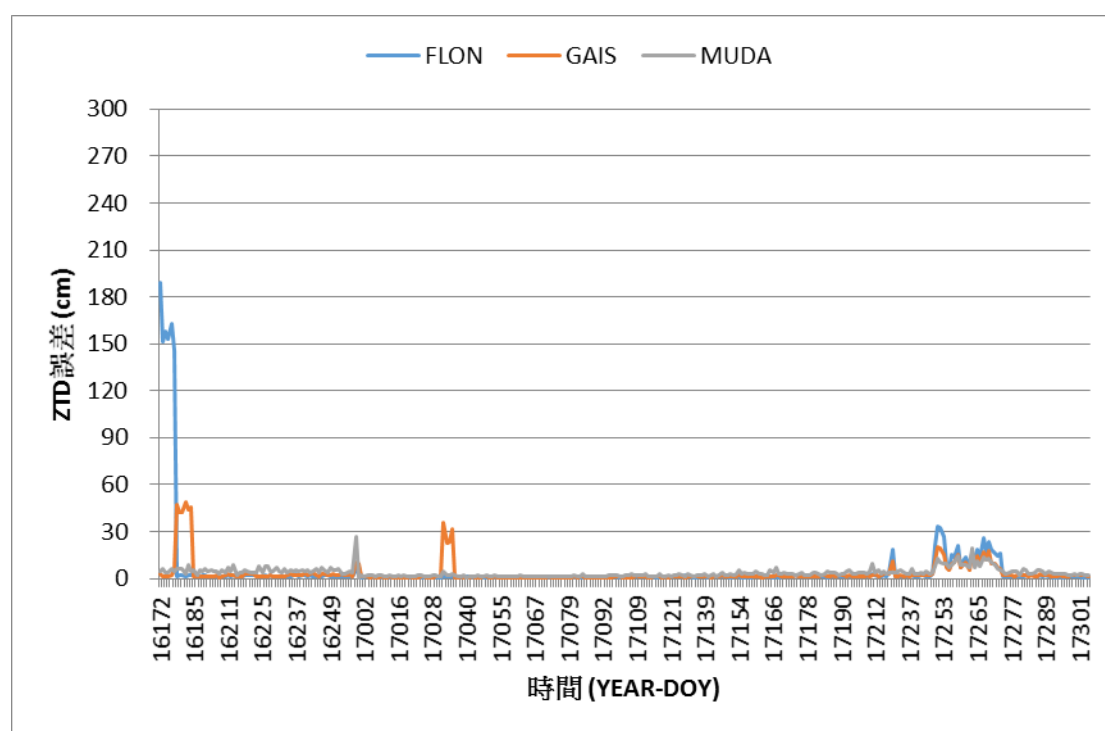


圖 11 2016 年異常而於 2017 年恢復正常之測站

由圖 10 及 11 可以看到，表現異常的測站主要是因為有少數的天數資料解算錯誤，使得 NRT 平均誤差超過 5.2 cm (2 倍標準差)，其餘天數的表現則相對穩定；故推論上述測站基本上仍可使用，唯獨需留意資料解算錯誤的問題，後續將針對 ZTD 解算成果設定門檻 (暫訂設定為 60 cm)，直接刪除解算錯誤之筆數，應可解決此一問題。

4-4 邀請澳洲地球科學研究中心科學家來台交流

(1) 赴中央氣象局進行專題演講

Dr. Michael Moore 於訪問期間接受洪景山博士的邀請，赴中央氣象局進行了專題演講，發表題目為：A zenith troposphere delay estimates for weather forecasting。報告內容除了介紹澳洲地球科學研究中心利用地基 GPS 站計算天頂向總延遲量 (ZTD) 的系統現況，並分享了 ZTD 在澳洲氣象局進行天氣預報的長期規劃。



圖 12 Dr. Michael Moore 於中央氣象局氣象資訊中心的演講實況

會後並由中央氣象局馮欽賜副主任帶領氣象資訊中心及地震資訊中心同仁進行餐敘及座談，討論地基 GPS-ZTD 應用於天氣預報之具體效益，以及台澳雙方未來進行實質交流之形式，並於會中達成初步結論，明年將邀請澳洲地球科學研究中心協同澳洲氣象局人員再次訪問。



圖 13 Dr. Michael Moore 與中央氣象局同仁進行座談

(2) 赴國立交通大學進行專題演講

Dr. Michael Moore 於訪問期間也接受史天元教授的邀請，赴國立交通大學進行了專題演講，發表題目為：Evolution of IGS products；演講前並與史天元教授及張智安教授於演講前餐敘洽談未來合作之方向，並於學校正門及交大圖書館前學校地標合影留念。



圖 14 Dr. Michael Moore 演講前與史天元教授及張智安教授餐敘



圖 15 Dr. Michael Moore 於國立交通大學土木工程學系的演講實況

由於 Dr. Michael Moore 目前擔任 IGS 資料分析中心任務分配的協調工作，故報告內容除了介紹 IGS 現有提供的產品之外，並分享了 IGS 未來在軌道、時間、地球自轉等參數的長期規劃。



圖 16 Dr. Michael Moore 與現場聽眾交流及合影

(3) 赴中央研究院進行學術座談

本次 Dr. Michael Moore 短期訪問期間，順道赴中央研究院地球科學研究所與陳宏宇博士、王國龍博士及數位學生進行學術座談。由於中研院地球所是國

內利用 GPS 技術進行板塊及地震研究最重要的機關之一，所內伺服器處理的 GPS 資料達到四百多站，未來亦將仿造 IGS 的作法採用雲端伺服器來進行資料分析，故邀請 Dr. Michael Moore 至地球所來分享巨量資料的處理經驗，預估未來應可大幅降低伺服器購置及人員管理的費用。



圖 17 中央研究院地球科學研究所進行學術座談

(4) 赴國立臺北大學進行學術座談

國立臺北大學是本次邀請 Dr. Michael Moore 的主辦單位，訪問期間並邀集中央氣象局洪景山博士、醒吾科技大學蕭棟元教授及系上師生舉辦學術座談，主要探討 GPS-ZTD 即時解算的成果與效益，並討論未來如何朝向更即時解算的具體作法。此外，亦分享 GPS-ZTD 在短期氣象預報及長期氣候變遷的成果，以發揮此一資料之關鍵角色。

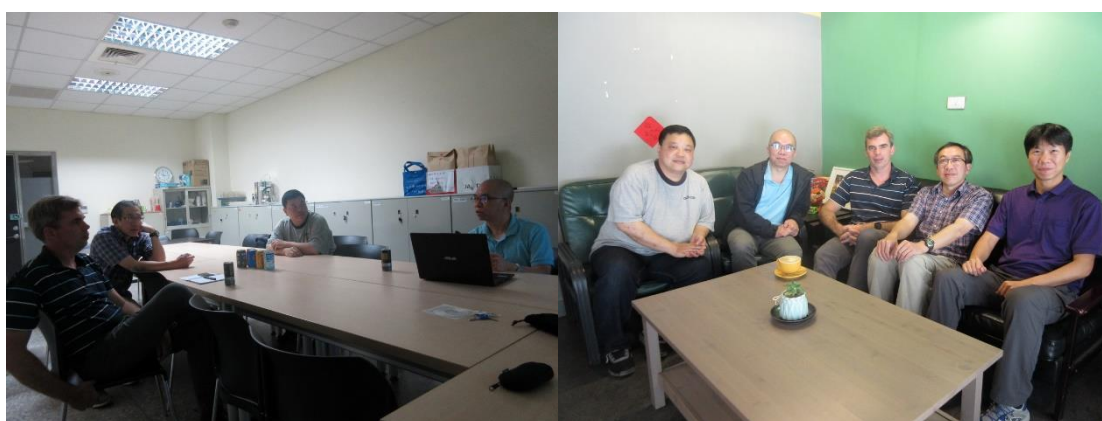


圖 18 國立臺北大學不動產與城鄉環境學系進行學術座談

4-5 資料串流及精密單點定位進展

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) 產生高採樣率的 RINEX 觀測和導航檔，支援近即時 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器。
- (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 格式的廣播星曆資料流。
- (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。

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。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。

圖 19 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 20 顯示了 RTCM 流到 RINEX 文件的轉換。圖 21 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 22 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。

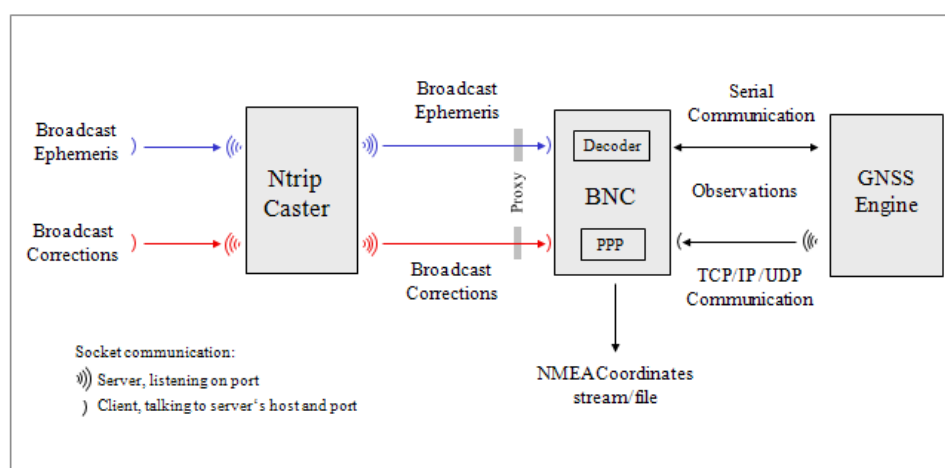


圖 19 BNC 連接到 GNSS 接收機的精密單點定位流程圖

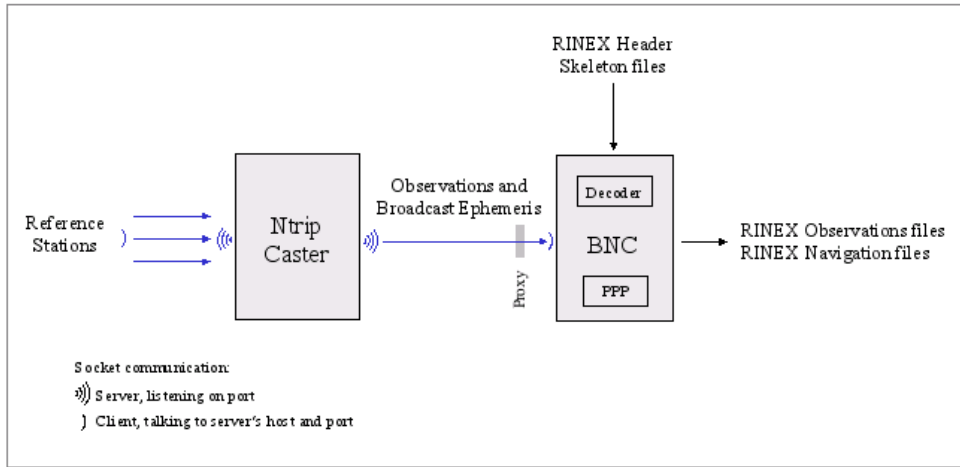


圖 20 BNC 將 RTCM 轉換為 RINEX 批處理的流程圖

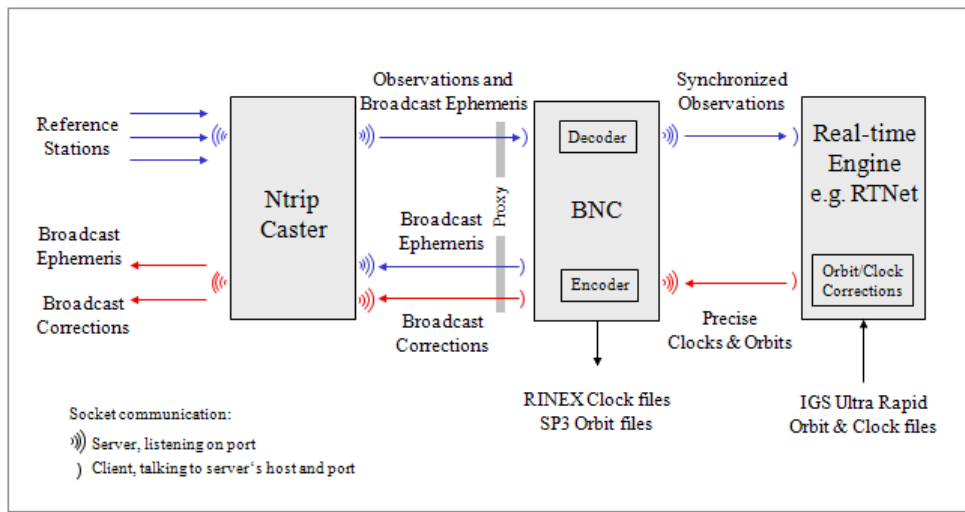


圖 21 BNC 回送即時 GNSS 引擎和上傳編碼的廣播校正流程圖

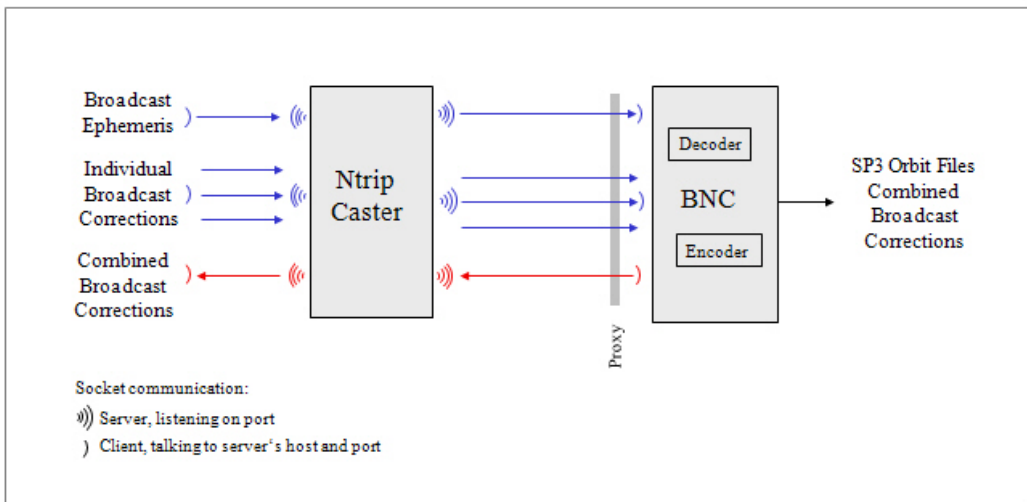


圖 22 BNC 組合廣播校正串流的流程圖

本計畫已採用 BKG Ntrip Client 來進行資料串流，目前已完成之資料串流系統架構及精密單點定位系統規劃分別如圖 23 及 24 所示。在中央氣象局資料串流

及 PPP 計算主要會使用到下列兩個功能：

- 使用 BNC 將中央氣象局 GPS 觀測站的 RTCM 串流，轉換為 RINEX 格式並儲存檔案。
- 使用 BNC 下載 IGS 組合廣播校正串流，轉換為 IGS 格式並儲存檔案。

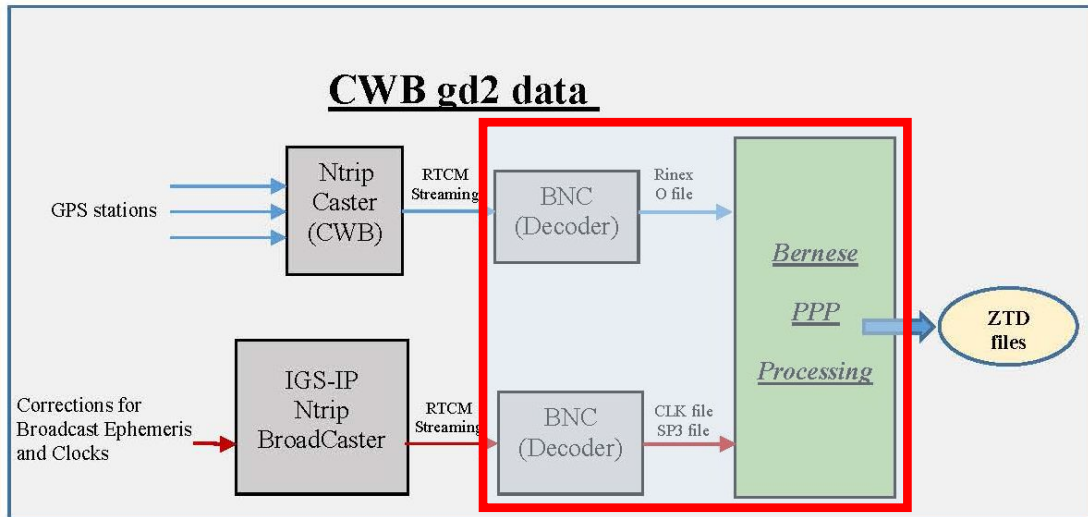


圖 23 資料串流系統架構

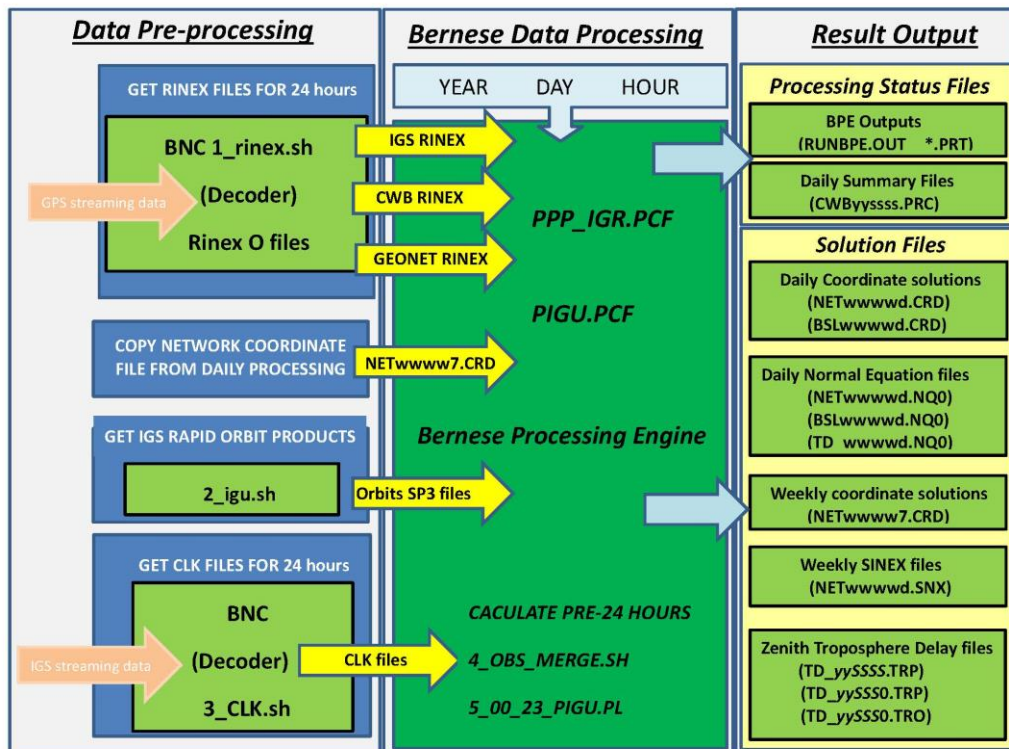


圖 24 精密單點定位系統規劃

目前 6g 伺服器的軟體系統已重新架設完成，包含 Bernese 5.2 升級版、

TEQC、BNC 等相關軟體，皆已架設完成並進入測試階段，感謝氣象局地震中心和資訊中心的幫忙，Ntrip Caster 和 IGS-IP Ntrip BroadCater 目前已經可以順利連線，初期因為 6g 伺服器只能安裝 32 位元的程式，幾乎所有的程式都需要自己重新編譯，所以花了不少時間在系統安裝和程式編譯部分，另一方面系統效率亦不佳，希望未來可有較新的 64 位元的系統可使用以減少相關困擾。

4-6 其餘工作進度報告

- (1) 已完成資料轉檔程式之平行化處理：隨著計算測站數持續增加，原使用一隻程式批次化處理進行資料轉檔，每次所需的時間最長需等候 70 分鐘；現改採十隻程式平行化運作，已大幅提昇資料轉檔之效能。
- (2) 已完成新增測站成果彙整檔：配合中央氣象局與香港天文台之互惠合作，協助修正程式每日自動提供 20 個測站的成果彙整檔，方便雙方之計算成果互惠交流。
- (3) 新增日本 Geonet 測站納入系統進行計算：原採用 7 個測站，規劃新增 25 個測站，其分布圖如圖 25 所示。

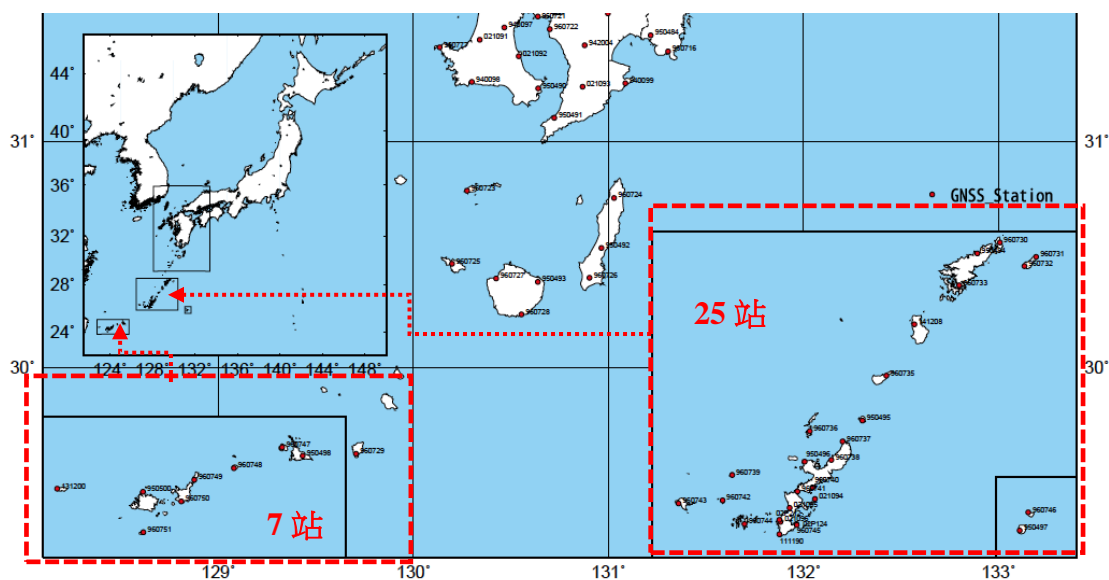


圖 25 日本 Geonet 測站分布圖

● 原本使用 7 個測站如下：

0498	0500	0747	0748	0749	0750	0751
------	------	------	------	------	------	------

- 新增 25 個測站如下：

0494	0496	0497	0730	0731	0732	0733
0735	0736	0737	0738	0739	0740	0741
0742	0743	0744	0744	1094	1095	1096
1190	1208	P124	P212			

由於日本 Geonet 測站的資料提供格式更改，造成 NRT 解算日本站資料時無法成功轉換為 RINEX 檔，導致日本 Geonet 測站的成果無法求解。因為 UCAR 的版本寫的很複雜，修正改為接收新格式的資料困難度高，目前已完成新版的 GetgeonetRnxNrt.pl 程式，其位置請參考圖 26，已確認可以轉出正確的 RINEX 檔。

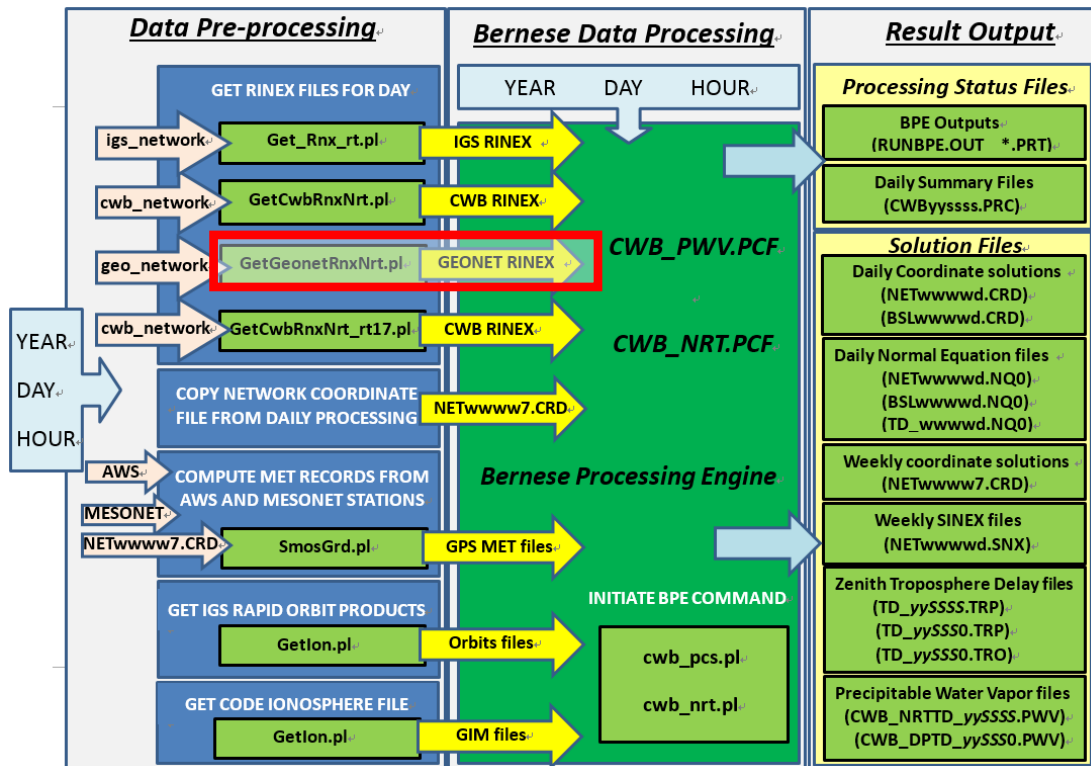


圖 26 新編寫之轉檔程式架構圖

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。
- 陳登環，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

ION GNSS+研討會應該算是全世界 GNSS 領域最大的一場盛宴，因為除了學術研討之外，有更多衛星導航軟硬體製造商參與展覽；臺灣這次除了學術界之外，亦有聯發科技股份有限公司及中華電信研究所與會參加發表論文。本次會議地點位於美國波特蘭的奧勒岡州國際會議中心，參與者來自於超過 50 個國家，人數約 1500 人共聚一堂研討最新科學知識。本次會議為第 29 屆，由美國衛星導航學會負責主辦，學術會議共計五天（9 月 12~16 日），其中前兩天（9 月 12~13 日）亦有短期課程可自費報名參加，廠商參展的部分主要在中間兩天（9 月 14~15 日），這兩天分別有廠商贊助的酒會及晚宴，下列照片呈現會場一隅及研討會實況。



第二天的議程中，特別邀請了各國衛星導航系統的代表，分別報告美國 GPS、俄羅斯 GLONASS、歐盟 Galileo、中國 BDS 及日本 QZSS 的現況及未來展望，其中又以美國代表的報告令我印象深刻。報告者為美國空軍的高階長官

Col Steven Whitney，他在報告講了個笑話讓人印象深刻，內容大概如下：『他說有一天家庭旅遊，老婆開車，雙方對於該走哪條路有點爭執；車上的導航器顯示要右轉，但他太太說不對，這條路他走過，應該要左轉才對。Whitney對他老婆說，你不相信車上的導航器沒關係，但請相信我，我可是美國 GPS 系統的負責人啊！最後...他老婆選擇將方向盤轉向左方.....（全場大笑）。』雖然是學術會議但在報告時亦以輕鬆的一面展現了美式幽默；最後各國代表一排坐在台上準備接受提問，讓大家更瞭解衛星導航科技的願景。



本次會議的重頭戲除了邀請諾貝爾獎得主 John O’Keefe 教授進行專題演講之外，其實大家最感興趣的還是第三天開始的會展；本次會議共有將近 50 家廠商設攤，展示產業界最新的晶片、儀器、軟體等整合系統，本次參展廠商如下圖所示。與吾人過去比較常參加地球科學會議比較不同的是，商業氣息在這個會議上特別濃厚，大家除了盛裝打扮之外，各家廠商無不卯足全力在會展上推銷自家的商品，並與其他同業談合作、也互相競爭；廠商亦贊助了美酒與食物，希望大家可以多停留在會展場地，以達到宣傳行銷的主要目的。



List of exhibitors as of April 20, 2016

2016 EXHIBITORS	Acutronic	L-3 IEC	Spirent Communications
	CAST Navigation	Labsat By Racelogic	Spirent Federal Systems
	Chronos Technology	Lockheed Martin	SYNTONY SAS
	ComNav Technology, Ltd	Microsemi Frequency and Time Corporation	SYRLINKS
	DT Research	NavtechGPS	Systron Donner Inertial
	European Commission	Northrop Grumman	Technology Advancement Group
	Fraunhofer IIS	NovAtel, Inc.	Telit Wireless Solutions
	German Aerospace Center	Rohde & Schwarz USA, Inc.	
	GMV Aerospace and Defence, Inc.	Rx Networks, Inc.	
	GPS Networking	Sensoror AS	
	GPS World	Septentrio	
	Harris Corporation	Silicon Sensing Systems Limited	
	IFEN GmbH	Skydel Solutions	
	Inside GNSS	Spectracom	
	ION Membership Booth		
Jet Propulsion Laboratory			

每天進行的學術分組報告同一時段分為六個場次，有三場為技術開發型、另外三場則為技術應用型。吾人這次報告的論文題目為：Determination on the vertical gradient of the precipitable water vapor over Taiwan，被安排在第五天早上的 C5: Atmospheric Science 1 時段；並於會後與來自中國大陸的代表進行交流，並與代表團領導楊元喜院士合影，互相學習、勉勵進而增進彼此的研究能量。



Determination on the vertical gradient of the precipitable water vapor over Taiwan

Yeh, T. K., H. C. Shih, *National Taipei University*
C. S. Wang, *Geoscience Australia*
S. Choy, *RMIT University*

BIOGRAPHY

Ta-Kang Yeh worked as an associate engineer at the Industrial Technology Research Institute in Taiwan from 2001. Having received his doctorate in geomatics from the National Chiao Tung University in 2005, he has been an assistant professor at the Ching Yun University. After six years, he took a position as an associate professor at the National Taipei University. Since 2015, he has been a professor and also a member of International GNSS Service, International Association of Geodesy and American Geophysical Union.

ABSTRACT

The water vapor plays an important role for the weather prediction. It is helpful to evaluate the change of weather system via observing the distribution of water vapor. It will be of great assistance to understand the special weather phenomenon by the calculation of the Precipitable Water Vapor (PWV) from the Global Positioning System (GPS) signals. Around 100 ground GPS continuously operating reference station cooperating with about 500 ground weather stations were adopted in this study. The hourly Zenithal Wet Delay (ZWD) during the duration of observation were estimated. The variation of the PWV converted from ZWD is compared with rainfall observation. The information in accordance with the rainfall, no rain (0 mm/hr), small rain (0.1-10 mm/hr), moderate rain (10-20 mm/hr) and heavy rain (more than 20 mm/hr) category. These average rainfall in the corresponding PWV take years to explore Taiwan's northern, western, eastern, southern and mountain areas, PWV different rainfall occurs corresponding to the intensity. The results showed significantly lower PWV in mountain area, so we need to calculate the PWV of the district station operator to the mean sea level, the district information in order to explore PWV threshold of rainfall occurs on a consistent baseline. Therefore, the use of four different rainfall intensities corresponding to the station elevation of PWV and do a linear regression analysis to calculate different rainfall, the elevation rises 100 m, the PWV values were reduced by 0.80 mm, 0.92 mm, 1.06 mm and 1.13 mm. All the inversion of GPS stations PWV corrected to mean sea level, and to explore the occurrence of the corresponding different rainfall intensity PWV. We found that the average no rain, small rain, moderate rain and heavy rain threshold of PWV were 41.8 mm, 52.9 mm, 62.5 mm and 64.4 mm over Taiwan.

INTRODUCTION

It is recognized that the ground-based GPS measurements can be used to estimate the PWV with an accuracy of 1-3 mm (Bevis *et al.*, 1992; Tregoning *et al.*, 1998). Compared with the direct PWV measurements twice per day (every 12 hour) from the radiosonde, the GPS-derived PWV generally can reach the half-hourly sampling rate; thus an improved temporal resolution in the PWV record. While the wind velocity is 10 m/s (i.e., the typical value at the bottom of the atmosphere), twice daily data can only have a spatial resolution of 400-500 km. The GPS network composed by a number of permanent GPS stations has been regarded as the essential national infrastructure. For example, there are approximately 100 GPS continuous stations in Taiwan (the average station spacing is below 30 km). They are often used for positioning applications and observing the crustal motion, but also monitoring the PWV variation now. Through the GPS network, it is possible to depict the PWV variation using higher temporal and spatial resolution. In addition, the near-real time orbit and clock corrections from the International GNSS Service (IGS) reduce a latency of 3-9 hour for the PWV estimation by GPS. This improved the GPS-derived PWV estimates on the real-time weather forecasting applications. Below we will only use the 'PWV' instead of the GPS-derived PWV.

Most studies have been conducted to prove the consistency between the PWV data and ground rainfall record. Therefore, the data are largely used for monitoring weather events such as typhoons, convectional rainfall and monsoonal moisture surge, and improving their forecast (Jin *et al.*, 2008; Yeh *et al.*, 2014). However, the potential of the PWV for hydrological applications have been discussed such as the imbalance of evapotranspiration and precipitation, the change rate of the terrestrial water storage at basin level (i.e., from hundreds to thousands squared kilometers) and the precipitation efficiency at different areas. Long-term PWV data records from a dense GPS network are essential for these studies that aimed to monitor hydrological cycle and meteorological dry/wet shifts.

As shown in Figure 1, the Taiwan Island involves a total area of 36,188 square kilometers, where the average annual rainfall is 2,500 mm. The rainfall can up to 5,000 mm for hills at the north of Taiwan. In geography, the Taiwan Island has an elongated shape across the Tropic of Cancer from 22° to 26° N at approximately 121° E. It

leads that the weather types are subtropical and tropical monsoon climates to the northern and southern of Taiwan, respectively. From October to April next year the weather is influenced by the northeast monsoon. It results in cold and wet air, and continuously small rain at the northern Taiwan but dry status at the southern Taiwan. From June to September it is dominated by the southwest monsoon; the warm air and the convective rainfall. In addition, there are average 3-4 typhoons (the Pacific tropical cyclone) impinging this area from July to September; thus providing plenty of rainfall. The Taiwan's topography is also quite complicated. The main compositions include basins and hills, alluvial plain, high mountains and rift valley for the northwest, southwest, central and east of Taiwan, respectively. In some mountains the rainfall patterns are the orographic and frontal rainfall. In summary, the GPS network in Taiwan can be used to observe the PWV variations at different areas. This will be helpful to study the weather mean conditions and the precipitation efficiency at different areas.

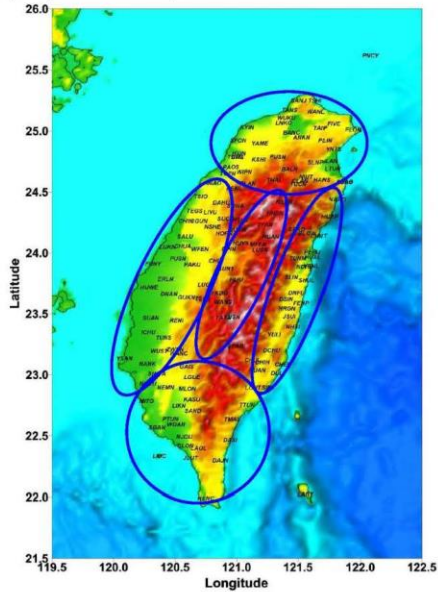


Figure 1. Distribution of the 94 GPS stations and the five regions.

DATA AND METHODS

We used the GPS measurements from the 94 GPS stations that are provided by the Central Weather Bureau and National Land Surveying and Mapping Center, Ministry of the Interior to estimate the PWV values. The Bernese 5.0 software developed by the University of Bern is used to process the GPS measurements (Dach *et al.* 2007). Specifically, the PWV is computed from the GPS zenith wet delay by

$$PWV = ZWD \times \Pi \quad (1)$$

and the scale factor Π can be expressed by

$$\Pi^{-1}(T_m) = 10^{-6} [\rho_w R_v (k_3 / T_m + k_2')] \quad (2)$$

where ρ_w is the density of liquid water, $R_v = 461.524 \text{ JK}^{-1} \text{ Kg}^{-1}$ is the specific gas constant of water vapor, $k_3 = 3.766 \times 10^5 \text{ K}^2/\text{hPa}$ and $k_2' = 16.52 \text{ K/hPa}$ are the constants of the atmospheric refractivity, T_m is the weighted mean temperature of the atmosphere computed from the vapor pressure and temperature profiles along the zenith direction over the GPS station. The values of the constants ρ_w and R_v are well determined; that the error in Eq. (2) derive from the other constants.

Finally, the PWV data used in this study are given on a time interval of 1 hour from January 2006 to December 2012 (i.e., the data record is 7 years in length). The PWV data are classified according to the rainfall strength that is obtained from the nearest weather station. The four rainfall strengths have the categories of no (0 mm/hr), small (0.1-10 mm/hr), medium (10-20 mm/hr) and heavy (> 20 mm/hr), which can be found in the manual of the World Meteorological Organization. Second, the 94 GPS stations are divided into the five sub-areas based on the geographic locations and topographic features. Therefore, there are the north, west, central, east and south sub-regions (Figure 1). The central sub-region is mainly composed by high mountains and the other sub-regions are relatively flat topography. In this study, the statistics of the PWV data are counted by the above two principles.

CLIMATE MEAN CONDITIONS

The yearly mean PWV values from the five sub-regions at the four rainfall strengths for 2006-2012 are depicted in Figure 2 and the statistics are given in Table 1. The PWV values at the central sub-region is clearly lower than those at the other sub-regions. Because of less ZWD in the GPS signal propagation path, the GPS station at a higher altitude has the lower PWV estimated. Table 1 shows the average PWV at no rain is about 41 mm at flat region (i.e., the average value derived from the northern, western, eastern and southern sub-regions) and 32 mm at the central sub-region. At heavy rain the average PWV are 63 and 51 mm at the flat and mountainous regions, respectively. Therefore, the PWV increases about 20-25 mm from no rain to heavy rain. Below is a summary of the PWV changes at the four rainfall strengths shown in Figure 2 and their potential causes:

1. From no to small rainfalls, the PWV increases about 7-8 mm at the north and east sub-regions, 10 mm at the central sub-region, and 13-16 mm at the west and south sub-regions. It properly illustrate the different rainfall features between these regions. The convective rainfall is the main rainfall mechanism at the southwest Taiwan because of the wide plain terrain. Thereby, it need the more humid air to reach the precipitable condition. The northeast Taiwan is easier to start rainfall due to the orographic lift. The topography and geographic locations also effect the precipitation efficiency between the two regions

(northeast vs southwest of Taiwan). The precipitation efficiency will be further discussed in the section below.

2. From small to medium rainfalls, the PWV changes range from 5 to 10 mm. The minimum difference of 5.4 mm occurred at the southern sub-regions. Once the air is moist enough, it is easier to directly start a medium rainfall at the southern Taiwan. The PWV time series at the northern, eastern and western sub-regions also show the more moisture air is needed to rise up the rainfall strength from small to medium in recent years.
3. From medium to heavy rainfalls, the PWV differences at the five sub-regions are almost less than 5 mm. Therefore, the key factors of forming a heavy rain are not only the high PWV value (i.e., the air is high humidity) and also the replenishment rate of the water vapor.
4. Relatively large undulations can be found in the PWV time series of the western sub-region. This is because the northeast Taiwan is influenced by the northeast monsoon in winter, but the southwest monsoon at the southwest Taiwan in summer. The western Taiwan is located in the junction of the two monsoon. In addition, the total annual rainfall at the western Taiwan largely depends on the typhoon-induced rainfall in summer. Therefore, the western sub-region has large undulations in the weather than other sub-regions.

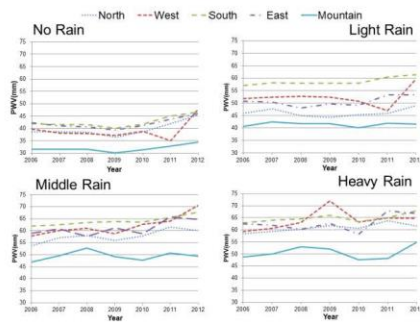


Figure 2. Yearly mean PWV values at the four rainfall strengths from the five sub-regions for 2006-2012.

As we know that the PWV is positive correlation to the rainfall strength; thus the larger PWV value indicate the more heavy rainfall. In the no rain panel, it should be noticed that the increasing trends in the PWV time series. It elaborate the fact that the getting difficult to start rainfall. For example, the PWV value of 45 mm corresponds to the small rain at 2006, but no rain at 2012. This had been connected to the enhanced evapotranspiration that is caused by the global climate change (Yeh *et al.*, 2016). The PWV time series also appeared the years with plenty of rain and lack of rain. In the heavy rain panel, the relatively high PWV value at

2009 is caused by the typhoon-induced extremely heavy rainfall that continue for a while at the western Taiwan. In the no rain panel, the relatively low PWV value at 2011 is due to the drought that occurred at the western Taiwan. These events correspond to the 2009 El Niño and 2011 La Niña. It is confirmed that the continuous PWV observations can be used to improve the rainfall forecast and also for assisting observation of climate change.

Table 1. Statistics of the PWV values for the five sub-regions at the four rainfall strengths.

	No Rain	Light Rain	Middle Rain	Heavy Rain
North	39.8	46.1	57.8	60.8
West	39.3	52.4	62.2	64.0
South	42.6	58.7	64.1	64.8
East	42.0	50.6	61.1	62.9
Mountain	31.9	41.4	49.5	50.7

HEIGHT EFFECTS IN THE PWV ESTIMATION

While the accuracy of the tropospheric humidity estimated by GPS radio occultations decreases in the troposphere lower than 5,000 m, the PWV observation is still wanted by the numerical weather model to fill in the gap (from 0 to 5,000 m). In this study the altitude of the 95 GPS stations distributed from 0 to 3,900 m (the highest station of YUSN is at an altitude of 3,877 m, see Figure 1). The altitude here is the GPS-derived ellipsoidal height. The linear regressions of the PWV data from these GPS stations are conducted to investigate the PWV changes with the altitude (i.e., the vertical gradient of the PWV). In Figure 3 the PWV values at the four rainfall strengths are shown by different symbols and their linear regression results are given in Table 2. The PWV decreasing rate per meter height is faster as the increase in the rainfall strength (i.e., the slope is becoming steep at heavy rain condition). It will be very useful for the numerical weather prediction models to improve the heavy rainfall forecast because of the PWV vertical gradient changes before the events.

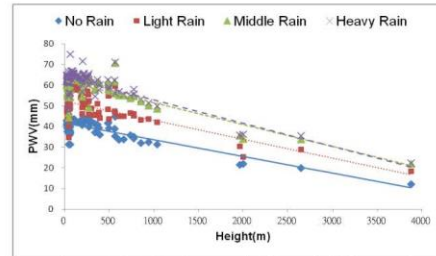


Figure 3. PWV values at the four rainfall strengths as functions of the altitude.

Table 2. Linear regression results of the PWV data at the four rainfall strengths.

	PWV(mm)/height(m)
No Rain	-0.0080
Light Rain	-0.0092
Middle Rain	-0.0106
Heavy Rain	-0.0113

The results showed significantly lower PWV in mountain area, so we need to calculate the PWV of the district station operator to the mean sea level, the district information in order to explore PWV threshold of rainfall occurs on a consistent baseline. Therefore, the use of four different rainfall intensities corresponding to the station elevation of PWV and do a linear regression analysis to calculate different rainfall, the elevation rises 100 m, the PWV values were reduced by 0.80 mm, 0.92 mm, 1.06 mm and 1.13 mm. Table 3 shows the PWV values for the five sub-regions at the four rainfall strengths after vertical gradient correction. All the inversion of GPS stations PWV corrected to mean sea level, and to explore the occurrence of the corresponding different rainfall intensity PWV. We found that the average no rain, small rain, moderate rain and heavy rain threshold of PWV were 41.8 mm, 52.9 mm, 62.5 mm and 64.4 mm over Taiwan.

Table 3. Statistics of the PWV values for the five sub-regions at the four rainfall strengths after vertical gradient correction.

	No Rain	Light Rain	Middle Rain	Heavy Rain
North	41.2	47.7	59.6	62.7
West	40.8	54.1	64.2	66.1
South	43.3	59.5	65.1	65.8
East	42.9	51.7	62.3	64.2
Mountain	40.7	51.5	61.1	63.1
Average	41.8	52.9	62.5	64.4

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the Ministry of Science and Technology of the Republic of China, Taiwan, for financially supporting this research under Contract No. MOST 104-2111-M-305-001 and MOST 104-2811-M-305-003.

REFERENCES

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, *Journal of*

Geophysical Research, 97(D14), 15787–15801.

- Dach, R., U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl, 2007. *Bernese GPS software version 5.0 user manual*, Astronomical Institute, University of Bern, Bern, Switzerland.
- Jin, S. G., Z. Li, J. Cho, 2008. Integrated water vapor field and multiscale variations over China from GPS measurements, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(11), 3008–3015.
- Tregoning, P., R. Boers, D. O'Brien, M. Hendy, 1998. Accuracy of absolute precipitable water vapor estimates from GPS observations, *Journal of Geophysical Research*, 103, 701–710.
- 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.

Determination on the vertical gradient of the precipitable water vapor over Taiwan

Ta-Kang Yeh¹, Hsuan-Chang Shih¹, Chuan-Sheng Wang²,
SueLYnn Choy³

¹ National Taipei University, New Taipei, Taiwan

² Geoscience Australia, Canberra, Australia

³ RMIT University, Melbourne, Australia

How to overcome this problem?

$$D_{trop}^z = 10^{-6} \left\{ \frac{k_1 R}{g_a M_a} P_s + \int_{z_0}^z \left[\left(k_2 - k_1 \frac{M_w}{M_a} \right) \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right] dz \right\} = D_{trop,h}^z + D_{trop,w}^z$$

- **Dry delay** ($D_{trop,d}^z$): Need to know the pressure of the ground
 - Using **atmospheric model** to correct the error
- **Wet delay** ($D_{trop,w}^z$): Need to know the temperature and the partial water vapor pressure of the atmosphere
 - Using **zenith path delay parameters** to absorb the residual (treat as the unknown value)

Phenomenon of GPS signal delay

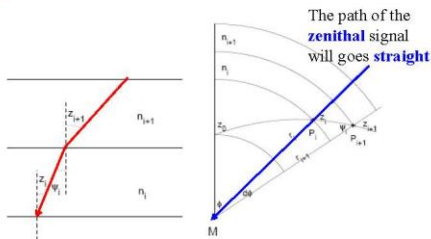
- GPS signals pass the atmosphere
 - The speed of the GPS signal in atmosphere is **slower** than that in space
 - The path of the GPS signal in atmosphere is a **curve**
- **Tropospheric delay**
 - Including the troposphere and the bottom layer of the stratosphere
- **Ionospheric delay**
 - Including the mesosphere, thermosphere and the upper layer of the stratosphere

How to obtain ZWD and PWV?

- Double-difference is adopted
 - Relative to TSKB station in Japan
- Using long baseline (~2000 km) to calculate the absolute **Zenith Wet Delay (ZWD)**
- Using below formula to transfer the ZWD to **Precipitable Water Vapor (PWV)**

$$PWV = \Pi \times ZWD \quad \Pi = \frac{10^8}{\rho R_v \left[\frac{k_2}{T_m} + k_2' \right]}$$

The reason – Snell's Law



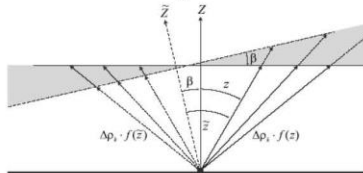
Verification on calculated PWV

- Comparison on the PWV measured by **Water Vapor Radiometer (WVR)** and that obtained by GPS
- To prove and enhance the accuracy of GPS-PWV

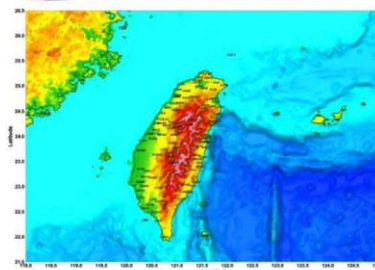


How to overcome this problem?

- Saastamoinen's **zenithal function**
- Marini's **mapping function**
- Gardner's azimuth asymmetric model

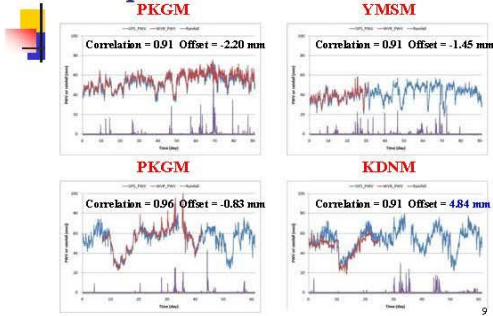


Data selection



- 7 years data 2006-2012
- 108 GPS stations
- 2 WVR stations
- 490 rainfall stations

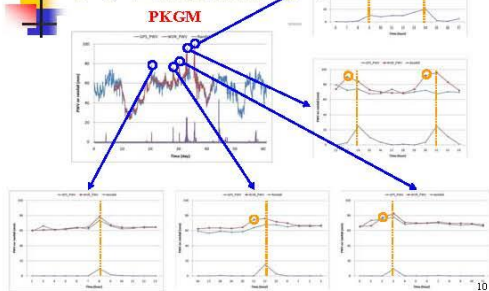
Comparison on GPS and WVR



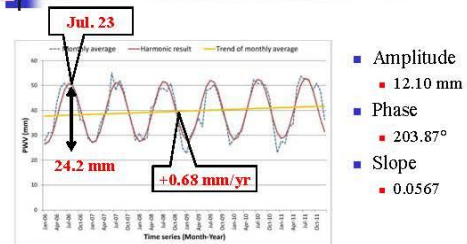
Remarks

- Comparison on the PWV measured by GPS and WVR
 - A bias exists in our result - 0.8-2.2 mm
 - A larger bias exists in CWB/NCAR's result - 3-7 mm
- The precision of the GPS-PWV is proved
- The GPS-PWV data in 2006-2012 are provided to the CWB of Taiwan for weather prediction
- What can we do next step?

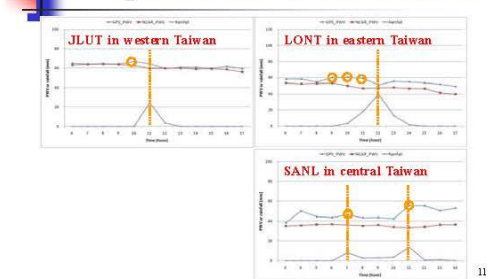
Comparison on PWV and rainfall



Harmonic analysis of PWV in the Northern region



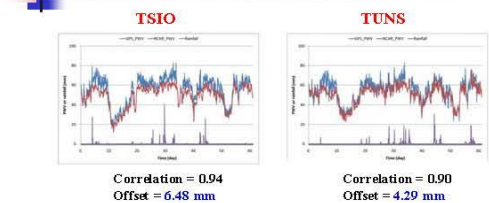
Comparison on PWV and rainfall



Amplitudes, phases and growth rates for the PWV

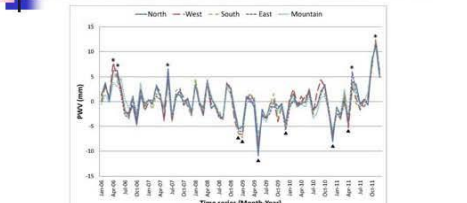
	Amplitude (mm)	Phase (degree)	Peak (day)	Growth (mm/yr)
North	12.10	203.87	7/23	0.68
West	13.10	201.29	7/22	0.83
South	12.88	204.99	7/25	0.71
East	11.53	207.68	7/28	0.67
Mountain	10.98	203.17	7/23	0.74

Compare with the results calculated by CWB/NCAR



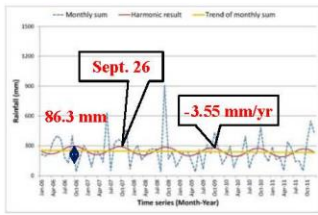
- CWB (Central Weather Bureau, Taiwan)
- NCAR (National Center for Atmospheric Research, USA)

Difference between the PWV and harmonic analysis value



- PWV exceed 5 mm are denoted by star signs
- PWV are denoted by triangle signs for less than 5 mm

Harmonic analysis of rainfall in the Northern region



- Amplitude: 43.14 mm
- Phase: 265.58°
- Slope: -0.2968

17

PWV values at the four rainfall strengths

	No Rain	Light Rain	Middle Rain	Heavy Rain
North	39.8	46.1	57.8	60.8
West	39.3	52.4	62.2	64.0
South	42.6	58.7	64.1	64.8
East	42.0	50.6	61.1	62.9
Mountain	31.9	41.4	49.5	50.7

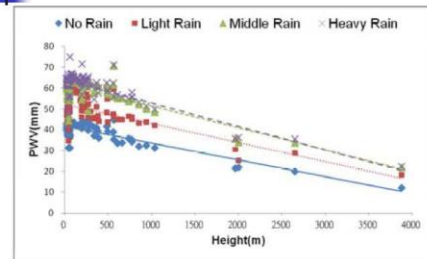
21

Amplitudes, phases and growth rates for the rainfall

	Amplitude (mm)	Phase (degree)	Peak (day)	Growth (mm/yr)
North	43.14	265.58	9/26	-3.55
West	139.72	193.09	7/13	-16.15
South	287.77	206.41	7/27	-7.27
East	157.21	253.44	9/13	7.95
Mountain	229.27	207.13	7/28	-17.44

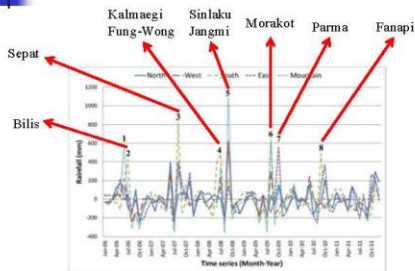
18

PWV at the four rainfall strengths as functions of the altitude



22

Difference between the rainfall and harmonic analysis value



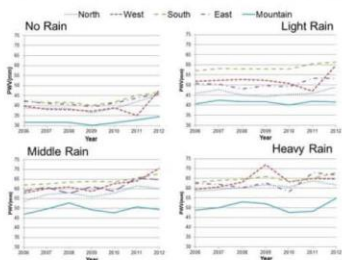
19

Linear regression results of PWV at the four rainfall strengths

	PWV(mm)/height(m)
No Rain	-0.0080
Light Rain	-0.0092
Middle Rain	-0.0106
Heavy Rain	-0.0113

23

Yearly mean PWV values at the four rainfall strengths



20

PWV values after vertical gradient correction

	No Rain	Light Rain	Middle Rain	Heavy Rain
North	41.2	47.7	59.6	62.7
West	40.8	54.1	64.2	66.1
South	43.3	59.5	65.1	65.8
East	42.9	51.7	62.3	64.2
Mountain	40.7	51.5	61.1	63.1
Average	41.8	52.9	62.5	64.4

24



Conclusions

- The results indicate that the values of the PWV amplitude are between **10.98 and 13.10 mm** and always occurred at the end of July
 - The presented time of rainfall for the peak agree with the time of PWV in the Western, Southern, Central Mountain area
 - For the Eastern and Northern area, the happened time were delayed by two months
- The magnitudes of the annual growth rate for PWV are between **0.68-0.83 mm/yr**

25



Conclusions

- Information in accordance with the rainfall, no rain (0 mm/hr), small rain (0.1-10 mm/hr), moderate rain (10-20 mm/hr) and heavy rain (more than 20 mm/hr) category
 - The elevation rises 100 m, the PWV values were reduced by **0.80 mm, 0.92 mm, 1.06 mm and 1.13 mm**
- Taiwan found that the average no rain, small rain, moderate rain and heavy rain threshold of PWV were **41.8 mm, 52.9 mm, 62.5 mm and 64.4 mm**

26

三、心得與建議

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，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。

四、攜回資料名稱及內容

大會議程：ION GNSS+ 2016。