

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 (1/3)

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB-104-M-07

執行期間：104 年 3 月 1 日至 104 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 104 年 11 月 11 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 (1/3)		
計畫編號	MOTC-CWB-104-M-07		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	國立臺北大學		
年度	104	執行期間	104 年 3 月 1 日至 104 年 12 月 31 日
本期經費 (單位：千元)	451 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 (%)
	451 千元	451 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	
		王傳盛	
報告頁數	31 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	<p>GPS (Global Positioning System) 衛星發出的訊號抵達地面被地面站接收後，通常可以作為定位與導航之用。中央氣象局目前在臺灣地區已建立完整的即時地基 GPS 觀測網，總觀測站數目達 150 站，此一地基 GPS 觀測網的建置原本是為監測臺灣地區地殼變動的相關資訊。然而地球大氣層的存在對衛星測量而言卻是一種干擾，在實際 GPS 資料處理中，最重要的工作即是進行大氣訂正。另一方面，對氣象而言，大氣水氣對衛星測量所產生的影響卻是有用的訊號，在地基 GPS 氣象學中最重要的議題即是如何由 GPS 資料決定垂直方向的大氣含水量 (Precipitable Water Vapor, PWV)。由於利用地基 GPS 資料反演之 PWV 具有相當之準確性，因此也大大提升其應用價值，其應用層面包括即時天氣分析與預報、氣候研究領域以及資料同化。臺灣地區地形複雜，因此需要高解析度觀測系統來描述此複雜地形下之大氣條件，而地基式 GPS 觀測資料可提供高解析度區域模式所需之水汽分布資訊，此對於改善短期降水預報</p>		

	<p>可扮演重要的角色。中央氣象局數值天氣預報小組已發展可同化地基 GPS 觀測的分析技術，本計畫旨在整合與擴大使用全臺灣之即時地基 GPS 觀測資料，並因應觀測資料數量之改變適時調整地基資料處理的策略，並評估資料處理效能、反演的品質以及其在數值天氣預報和天氣監測之應用，以改進現有之地基 GPS 可降水量產品和資料同化效能。</p>
<p>研究成果</p>	<p>我們先針對本計畫的計算成果做進一步分析，可以發現除了 DOY 061~066 資料較為不完整以外，gd2 伺服器 POST 解的資料完整度大多都在 90% 以上，整體的平均資料完整度達到 94.0%。接下來看 DP 解，發現其中僅有 DOY 176 沒有正常運作，而 DOY 220~222 的資料完整度也較低，但平均而言資料完整度也都在 85% 以上，整體的平均資料完整度達到 88.2%。最後 NRT 解其完整度明顯較為不穩定，特別是 DOY 224~229 及 DOY 270~279 自動計算系統啟動失敗，且 NRT 解平均而言資料完整度都較低，約在 70% 左右，整體的平均資料完整度僅有 61.1%。</p> <p>接下來針對美國 UCAR 的計算成果做進一步分析，可以發現 DOY 104、106~109、126、171~206、275~276 沒有正常運作，而 DOY 219~231 的資料完整度也較低，但平均而言資料完整度約可達到 80%，整體的平均資料完整度則為 70.6%，比起本計畫維持的 gd2 系統 88.2% 略低 17.6%。而 NRT 解也發現其完整度較為不穩定，特別是 DOY 263~274 的完整度明顯偏低，且 NRT 解平均而言資料完整度都較低約在 70% 左右，整體的平均資料完整度僅有 63.4，比起本計畫維持的 gd2 系統 61.1% 略高 2.3%。</p> <p>此外，gd2 伺服器 DP 解之解算精度表現相當優異，PWV 各天的平均誤差大多在 1.5 mm 以內，而這七個月的平均誤差則為 0.94 mm，可待加強的部分則是其中共有九天並沒有正常的計算出來。接下來看 gd2 伺服器 NRT 解，其中共有十四天沒有正常解算，但 PWV 各天的平均誤差大致上介於 1.5~3.0 mm，而這七個月的平均誤差則為 2.26 mm。</p> <p>最後，gd 伺服器 DP 解之解算精度表現遠比不上 gd 伺服器，共有五十五天沒有正常解算出來；且 PWV 各天的平均誤差大致上介於 1.5~2.5 mm 之間，誤差較大者甚至超過 4 mm，而這七個月的平均誤差則為 1.53 mm，相較於 gd2 伺服器的 DP 解精度差了將近 0.6 mm。而 gd 伺服器 NRT 解，由於 DOY 246 以前的解算成果沒有進行備份被伺服器自動刪除，故本統計僅針對 DOY 247 以後的資料完整度進行統計，PWV 各天的平均</p>

	<p>誤差與 gd2 伺服器的結果類似，同樣介於 1.5~3.0 mm，而這兩個月的平均誤差則為 2.16 mm，相較於 gd2 伺服器的 DP 解精度為佳約 0.1 mm。</p>
具體落實應用情形	<p>(1) 修正計算測站清單：已完成剔除 CHIU、LUGU、MITO、MLON、PEIM、SALU、ZWEN 共計七個已更名或汰換的測站。</p> <p>(2) 評估 Bernese 5.0 與 Bernese 5.2 之解算效能：目前已於 gd2 伺服器安裝 Bernese 5.2 並持續運作中，而 6g 伺服器則持續運作 Bernese 5.0，期中審查會議結論 6g 伺服器的成果後續不需再進行評估；而由美國 UCAR 維持的 gd 系統亦已安裝 Bernese 5.2 並持續運作中。</p> <p>(3) 每個月利用 DP 重新計算完整 GPS 資料：目前已於 gd2 伺服器安裝 Bernese 5.2 進行後處理計算，但由於後處理需等候 2~3 週，直到精密星曆公佈之後方能開始計算；故期中報告僅先完成今年 3~9 月的重新計算工作。</p> <p>(4) 完整蒐集並重新計算歷史 GPS 資料：目前已利用 gd2 計算空檔的時間持續重新計算歷史資料，業已完成 2013~2014 年的資料重新計算。</p> <p>(5) 評估不同天線罩對水氣求定之影響：不同天線罩對水氣求定之影響量，發現 SCIT 與 DOME 型式的差異最小，平均約為 0.5 mm；與 TZGD 的差異次之，平均誤差約為 0.9 mm；與 NONE 的差異最大，平均誤差則可達到 1.1 mm，但整體來講不同天線罩對於 PWV 解算的誤差影響不大。</p>
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

GPS 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 GPS 氣象學 (GPS Meteorology, GPS/Met)，其主要目的在於利用地球大氣對於 GPS 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% (Wikipedia, 2008)。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 (關珮羽, 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。

近年來，由於地球環境和氣候的變遷，世界各地相繼的不斷地發生極端氣候事件，例如 2010 年底至 2011 年初，澳洲在昆士蘭和維多利亞省因強降雨引發的洪水事件；2012 年，Sandy 颶風侵襲美國紐約的罕見事件；同年，澳洲新南威爾斯省近海，發生的強烈的水龍捲風事件，這些極端事件都造成許多人民生命和財產的重大損失；2013 年超級強烈颶風海棠橫掃菲律賓，所造成的災害更是前所未見。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。而全球定位系統 (Global Positioning System, GPS) 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。台灣位於太平洋西岸的亞熱帶區域，每年平均會受到 3~4 個颶風的侵襲，2009 年 8 月 8 日的莫拉克颶風，使得台灣經歷了有雨量紀錄史上最大的降雨量，對於台灣南部地區造成相當嚴重的災情 (陳登璟, 2012)。對於科技及資訊產業如此發達的今日，颶風行進路徑及降雨量的難以捉摸，目前仍無完整的解決方案；其主要原因大多歸咎於颶風的生成及發展主要是發生於觀測資料稀少的海洋上，在缺乏對颶風結構及環境駛流場解析的情況下，欲增加對動力颶風的瞭解及增進數值模式初始場的準確性，一直是颶風研究急待解決的問題 (黃葳芃, 2005；鍾承儒, 2012)。

由於偵測大氣可降水量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，大氣可降水量的估計具有其重要性。近年來，GPS 訊號應用越來越廣泛，運用於大氣可降水量估算上，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。

在台灣全島已經佈設超過 400 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，進而解析美國專家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，本研究將嘗試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。綜整以上之研究方法，本研究之主要工作項目如下：

(1) 第 1 年

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. 進行天頂角延遲量（ZTD）和可降水量產品之品管和特性分析，以強化其在水氣監測與分析之應用。
3. 配合本局新建置之地基 GPS 網，評估最佳之資料處理策略。
4. 分析與評估 Bernese V5.2 版本之效能。

(2) 第 2 年

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 V5.2 版。
3. 清查臺灣地區各政府機關可取得之即時地基 GPS 觀測資料，並評估其對 GPS 資料分析效能的影響與在數值天氣預報和天氣監測可能的應用。
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，以強化其在水氣監測與分析之應用。

(3) 第 3 年

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. 協助聯繫以取得並整合臺灣地區各政府機關之即時地基 GPS 觀測資料，以強化 GPS 觀測在天氣監測與預報之應用。
3. 持續進行精密單點定位 (precise point positioning, PPP) 技術在即時 GPS 處理應用之研發，並評估其上線作業的可行性。
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。

三、研究方法

電磁波在通過不同介質時，會產生速度的變化及行進方向的改變。此現象造成訊號在傳播通過介質與通過真空中時，其行進的路徑與到達接收器所花之時間都會有所差異，此變化量稱為遲延量。這種特性後來被反向應用，可利用訊號通過介質時造成的遲延量來測量所通過介質之性質。當電磁波自太空傳遞至地球表面時，會經過大氣層而受影響。電磁波傳播的空間並不是真空，而是充滿以大氣為介質的空間。GPS 衛星發射的電磁波訊號到地面的接收儀天線，這其中要穿越過性質與狀態各異且不穩定的若干大氣層。所以，相對真空來說，存在於傳播路徑上的介質可能改變電磁波傳播的方向、速度和強度。

對流層對於 GPS 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 (Bevis *et al.*, 1992) 通常可以不考慮，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 (Snell's law) 訊號傳播的路徑會呈直線，幾何遲延便可去除，如圖 1 所示。

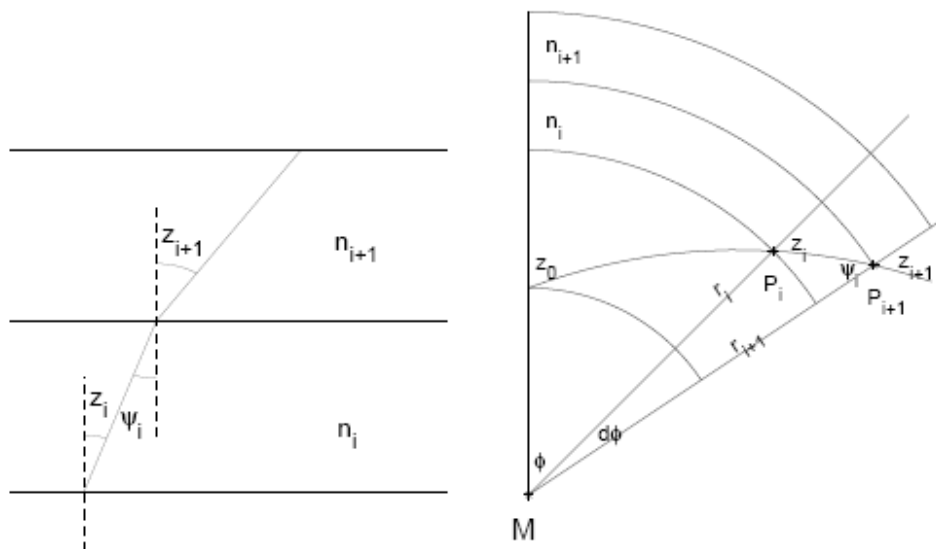


圖 1 Snell's Law (Kleijer, 2004)

由

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

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)。

在大氣層中，空氣壓縮因子相當接近 1 (與 1 相差不到 0.1%)，因此我們視之為 1，上式可以整理得到：

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

由理想氣體定律空氣密度可寫成：

$$\rho = \rho_d + \rho_w = \frac{M_d}{R} \left[\frac{P}{T} - \left(1 - \frac{M_w}{M_d} \right) \frac{e}{T} \right]$$

其中， ρ_d ：乾空氣密度， ρ_w ：溼空氣密度，R：莫耳氣體常數等於 8.314 J/mol×K， M_w ：水氣的莫耳質量， M_d ：乾空氣的莫耳質量等於 28.9644 g/mol。

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。

本研究預計採用最小二乘法解算 GPS 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：

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

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

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

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

$$IWV = PW \times \rho_l$$

IWV 的意義為單位底面積的大氣垂直空氣柱中，含有多少單位重量的水 (kg/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)。

以往計算對流層遲延量的方法，大多將 ZWD 當作未知數或附加參數，與 GPS 定位坐標一併同時求解。但台灣地區相對定位所採用的基線大多小於 300 公里，測站與測站間相對的對流層遲延量雖然可以相當精準的解出，但對於絕對對流層遲延量仍無法做一精準的估計，容易產生系統性的偏差。因此本研究採用計算 GPS 長基線 (約 2000 公里) 以估算台灣地區絕對之對流層遲延量，方能消除部分系統誤差；本年度亦著手測試精密單點定位 (Precise Point Positioning, PPP) 採絕對方式計算 GPS 所推求之大氣可降水量，以期能消除系統偏差。

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 (H eroux *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。

此外，過去一般非天頂角部份的 GPS 訊號延遲量大多利用映射函數進行投影估算，但實際上衛星追蹤站的幾何天頂方向與對流層所假設的球層狀結構天頂方向是有所不同的，這兩者間的角度差便會影響到使用映射函數進行非天頂方向延遲量的估算成果，也就代表著在使用映射函數時亦要考慮延遲量存在著水平梯度的問題 (如圖 2 所示)。對此問題可利用參數估計配合對流層延遲模式，對台灣地區進行對流層參數最佳化設計，藉以修正此一部份之系統性誤差，進而提升水氣反演之精度。

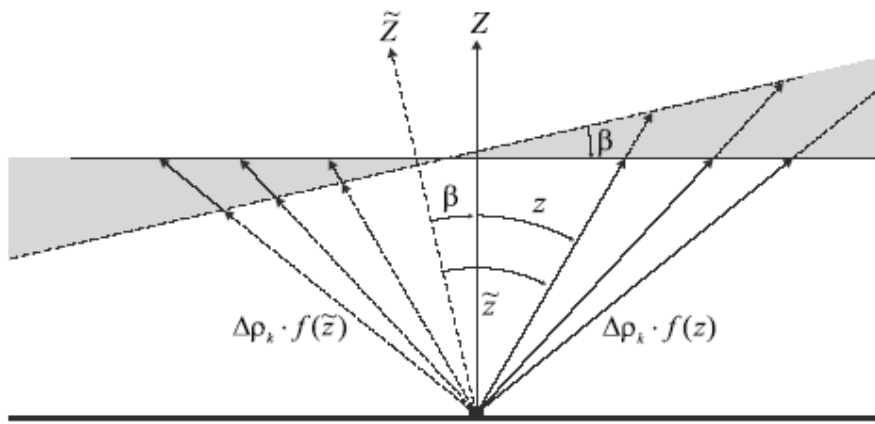


圖 2 對流層與地球幾何天頂方向示意 (Hugentobler et al., 2001)

四、具體成果

4-1 本年度已完成之工作說明

根據期初及期中會議的結論，本研究於今年度需完成的工作除了原訂的四點之外，另新增需評估不同天線罩對水氣求定之影響，茲分別說明如下：

- (6) 修正計算測站清單：已完成剔除 CHIU、LUGU、MITO、MLON、PEIM、SALU、ZWEN 共計七個已更名或汰換的測站。
- (7) 評估 Bernese 5.0 與 Bernese 5.2 之解算效能：目前已於 gd2 伺服器安裝 Bernese 5.2 並持續運作中，而 6g 伺服器則持續運作 Bernese 5.0，期中審查會議結論 6g 伺服器的成果後續不需再進行評估；而由美國 UCAR 維持的 gd 系統亦已安裝 Bernese 5.2 並持續運作中。
- (8) 每個月利用 DP 重新計算完整 GPS 資料：目前已於 gd2 伺服器安裝 Bernese 5.2 進行後處理計算，但由於後處理需等候 2~3 週，直到精密星曆公佈之後方能開始計算；故期中報告僅先完成今年 3~9 月的重新計算工作。後續分析將以後處理當作參考值，來分析 gd 與 dg2 系統 DP 及 NRT 之成果完整度，相關統計將於 4-2 節說明；而 gd 與 gd2 系統 DP 及 NRT 之解算精度部分，相關統計將於 4-3 節說明。
- (9) 完整蒐集並重新計算歷史 GPS 資料：目前已利用 gd2 計算空檔的時間持續重新計算歷史資料，業已完成 2013~2014 年的資料重新計算。
- (10) 評估不同天線罩對水氣求定之影響：不同天線罩對水氣求定之影響量，發現 SCIT 與 DOME 型式的差異最小，平均約為 0.5 mm；與 TZGD 的差異次之，平均誤差約為 0.9 mm；與 NONE 的差異最大，平均誤差則可達到 1.1 mm，但整體來講不同天線罩對於 PWV 解算的誤差影響不大，將於 4-4 節說明。

4-2 成果完整度統計

在成果完整度的比較上共計有五種成果，分別為 gd2 伺服器 POST 解（兩週後計算）、gd2 伺服器 DP 解（兩天後計算）、gd2 伺服器 NRT 解（兩小時後計算），以及美國 UCAR 維持的 gd 伺服器 DP 解（兩天後計算）、gd 伺服器 NRT 解（兩小時後計算）之資料完整度。

我們先針對前三項本計畫的計算成果分別繪製如圖 3~5 做進一步分析。由圖 3 中可以發現除了 DOY 061~066 資料較為不完整以外，gd2 伺服器 POST 解的資料完整度大多都在 90% 以上，整體的平均資料完整度達到 94.0%。接下來看圖 4 顯示的是 DP 解，發現其中僅有 DOY 176 沒有正常運作，而 DOY 220~222 的資料完整度也較低，但平均而言資料完整度也都在 85% 以上，整體的平均資料完整度達到 88.2%。最後圖 5 展示的是 NRT 解，其完整度明顯較為不穩定，特別是 DOY 224~229 及 DOY 270~279 自動計算系統啟動失敗，主要的原因是因為 gd2 伺服器於下半年開始著手進行歷史資料的計算，因沒有留意到硬碟空間已經不足，仍持續上傳歷史資料，故會有失敗的情況發生，且 NRT 解平均而言資料完整度都較低，約在 70% 左右，整體的平均資料完整度僅有 61.1%。

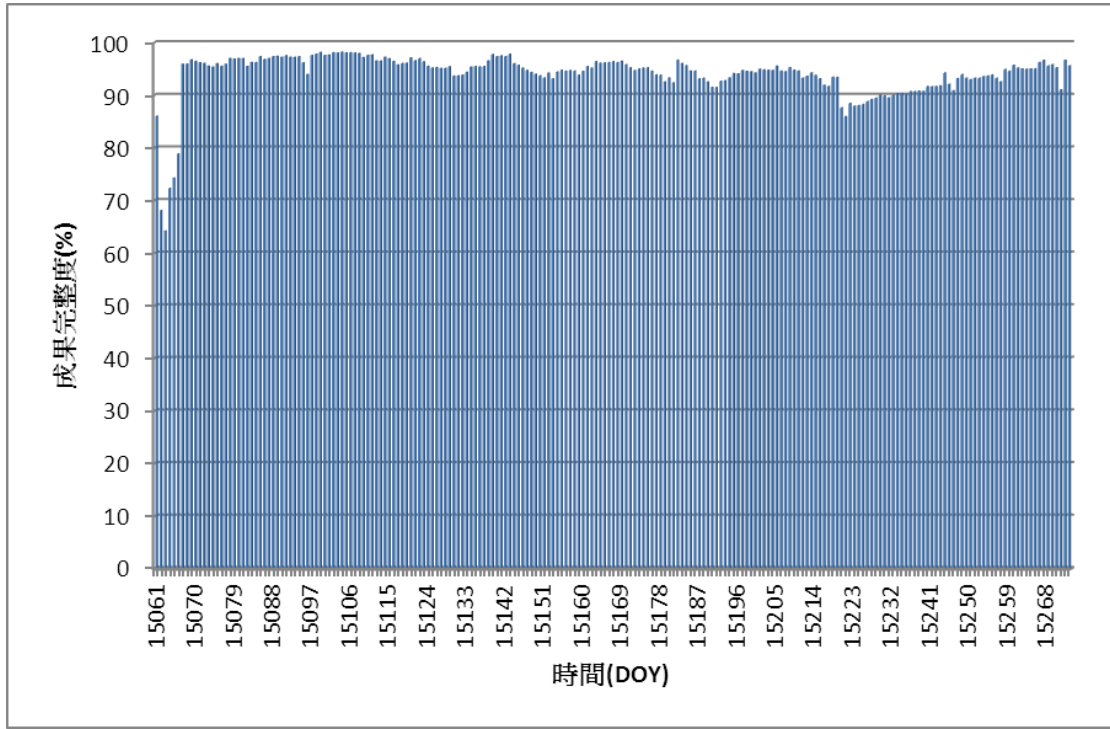


圖 3 gd2 伺服器 POST 解之資料完整度

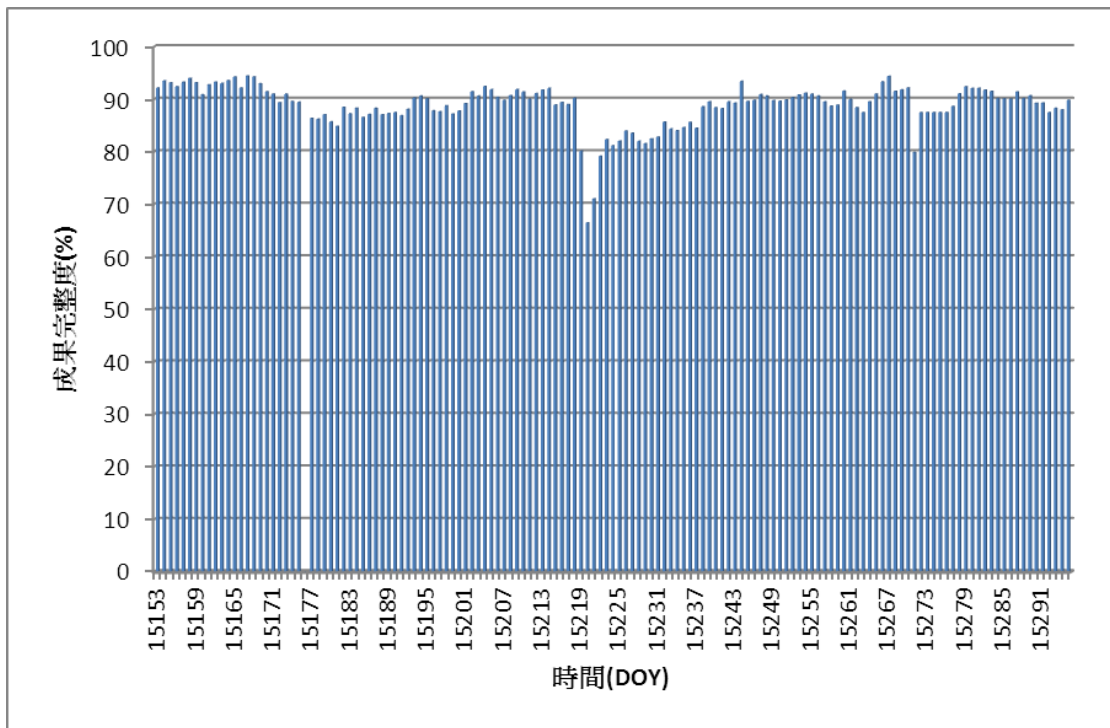


圖 4 gd2 伺服器 DP 解之資料完整度

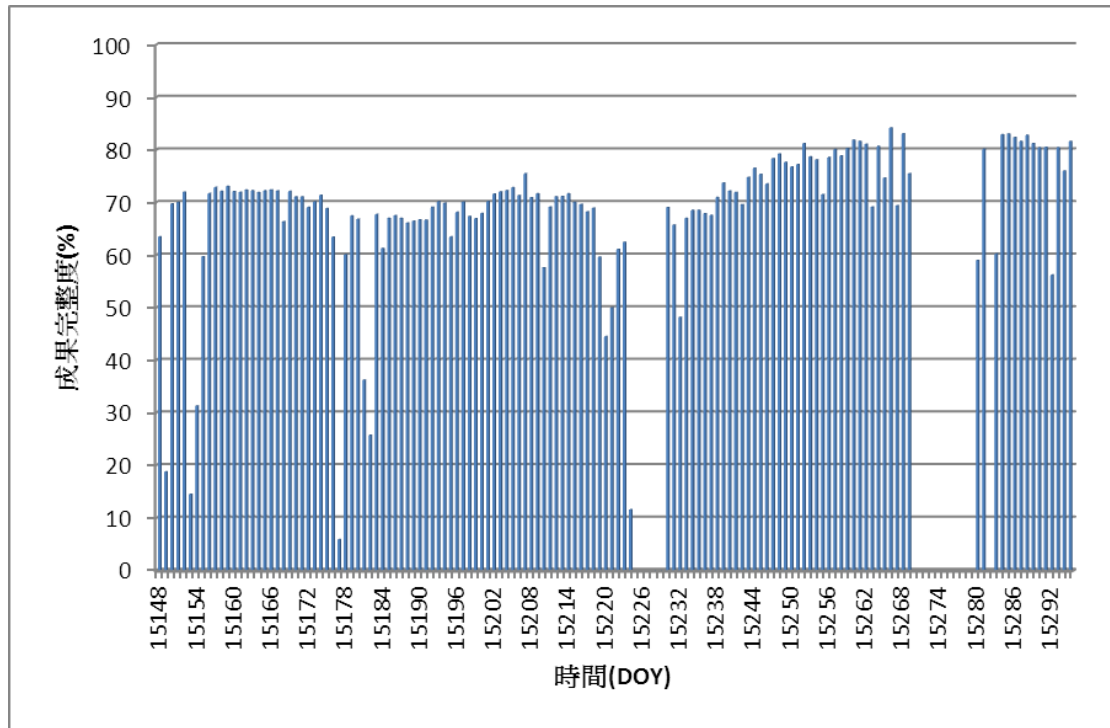


圖 5 gd2 伺服器 NRT 解之資料完整度

接下來針對後兩項美國 UCAR 的計算成果分別繪製如圖 6~7 做進一步分析。由圖 6 中可以發現 DOY 104、106~109、126、171~206、275~276 沒有正常運作，可能與該系統正在著手升級至 PPP 的解算機制有關，而 DOY 219~231 的資料完整度也較低，但平均而言資料完整度約可達到 80%，整體的平均資料完整度則為 70.6%，比起本計畫維持的 gd2 系統 88.2% 略低 17.6%。

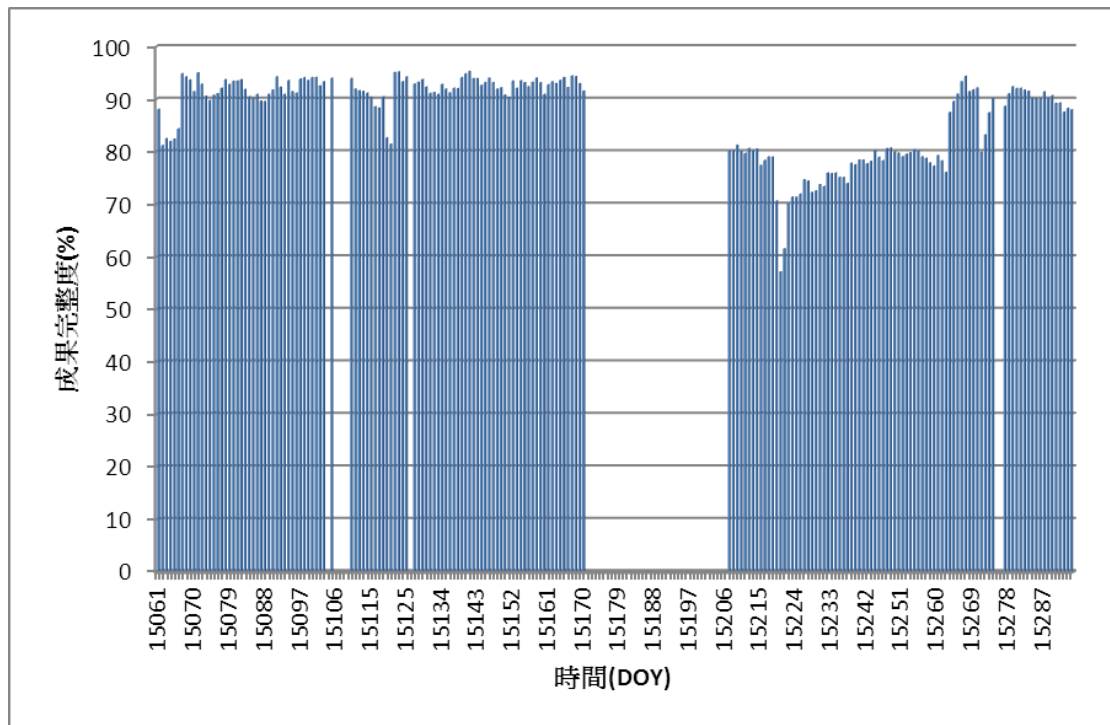


圖 6 gd 伺服器 DP 解之資料完整度

而圖 7 展示的是 NRT 解，但由於 DOY 246 以前的解算成果沒有進行備份被伺服器自動刪除，故本統計僅針對 DOY 247 以後的資料完整性進行統計，也發現其完整性較為不穩定，特別是 DOY 263~274 的完整性明顯偏低，且 NRT 解平均而言資料完整性都較低約在 70% 左右，整體的平均資料完整性僅有 63.4，比起本計畫維持的 gd2 系統 61.1% 略高 2.3%。

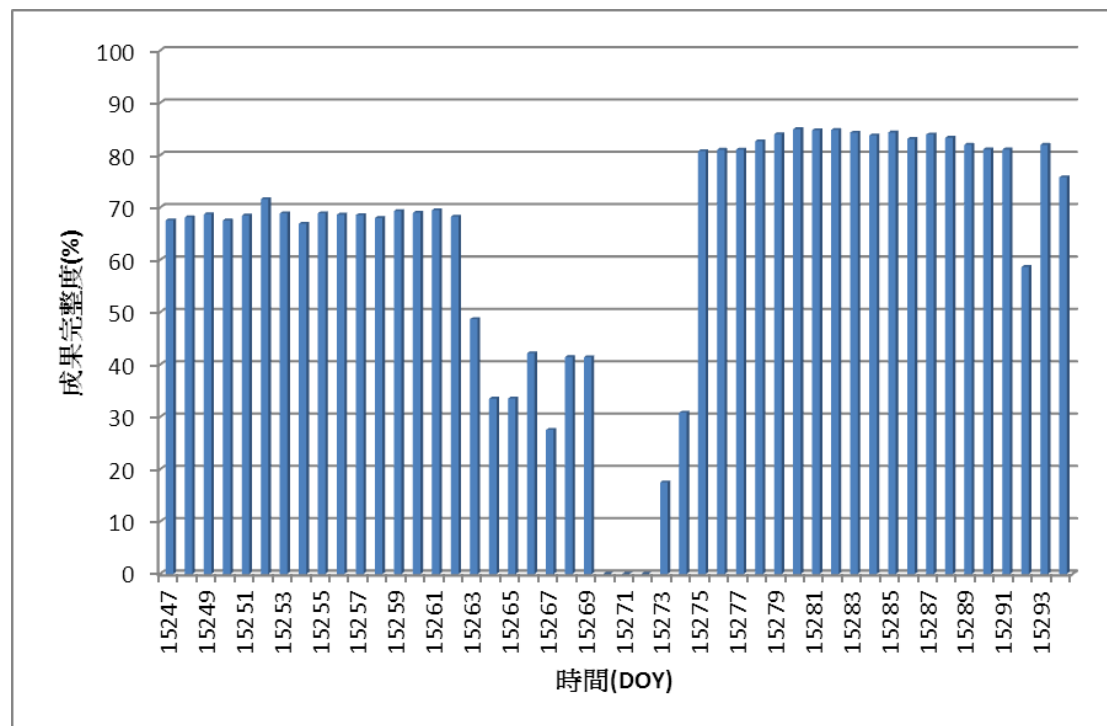


圖 7 gd 伺服器 NRT 解之資料完整性

整體而言，上述五種方法其資料完整性及解算時效統計結果如表 1 所示。發現根據 NRT 的成果，時間延遲兩小時之後，在正常的情況下約 70~80% 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，在正常的情況下約 80~90% 左右的 GPS 觀測資料已回傳；最後來看 POST 解後處理的成果，發現時間延遲兩週之後，GPS 資料的完整性僅稍稍的提升至 95%，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性及解算時效

解算機制	資料完整性	解算時效
gd2 伺服器 POST 解	94.0%	兩週後
gd2 伺服器 DP 解	88.2%	兩天後
gd2 伺服器 NRT 解	61.1%	兩小時後
gd 伺服器 DP 解	70.6%	兩天後
gd 伺服器 NRT 解	63.4%	兩小時後

最後，gd2 伺服器 POST 解、gd2 伺服器 DP 解、gd2 伺服器 NRT 解、gd 伺服器 DP 解以及 gd 伺服器 NRT 解的資料完整度空間分布圖則如圖 8~12 所示，可以發現目前資料缺漏就為嚴重的地方在於北部的山區，其次為東部海岸山脈附近的測站。

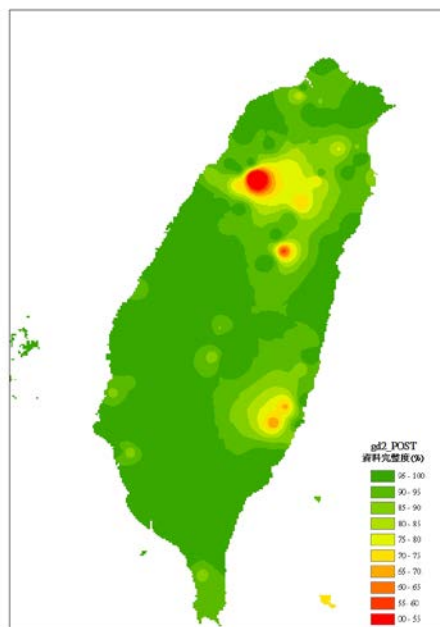


圖 8 gd2_POST 完整度之空間分布

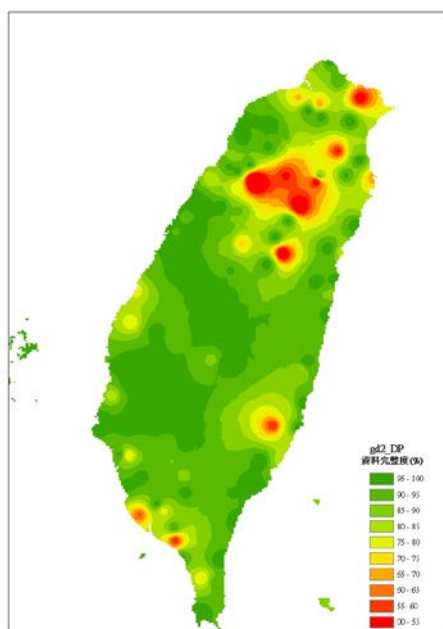


圖 9 gd2_DP 完整度之空間分布

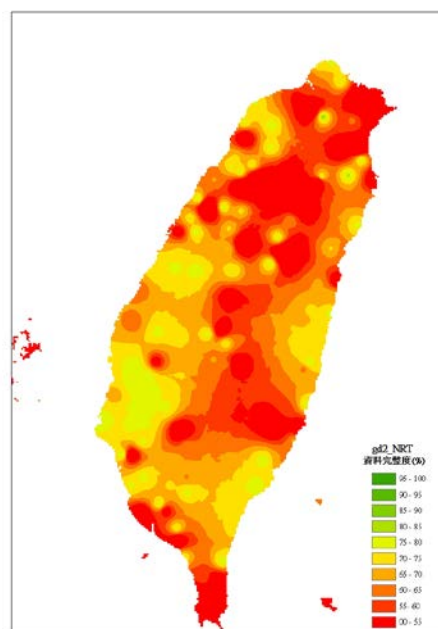


圖 10 gd2_NRT 完整度之空間分布

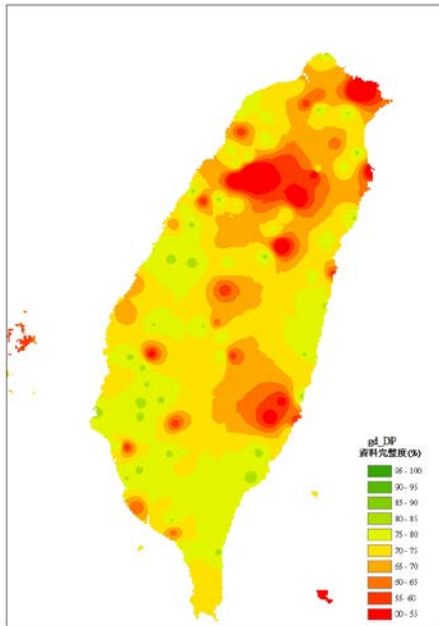


圖 11 gd_DP 完整度之空間分布

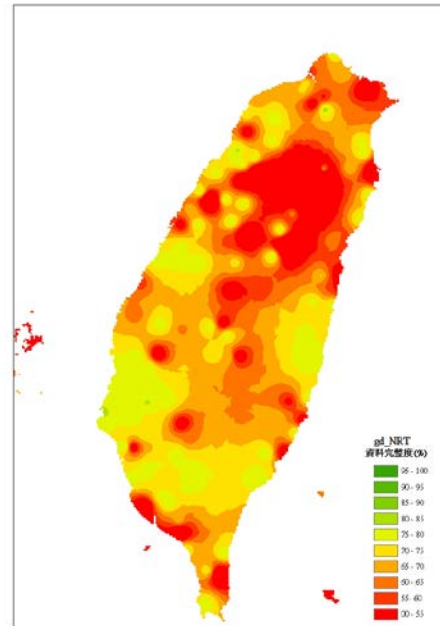


圖 12 gd_NRT 完整度之空間分布

4-3 解算精度統計

在解算精度的比較上因為採用 gd2 伺服器 POST 解做為參考值（真值），其餘四種解算機制分別與 gd2 伺服器 POST 解的 PWV 相減之後，再將所有的差異量取絕對值後再取平均值，即可得到 gd2 伺服器 DP 解（兩天後計算）、gd2 伺服器 NRT 解（兩小時後計算）、gd 伺服器 DP 解（兩天後計算）以及 gd 伺服器 NRT 解（兩小時後計算）之平均誤差，而上述四種機制之平均誤差分別繪製如圖 13~16 做進一步分析。

由圖 13 中可以發現 gd2 伺服器 DP 解之解算精度表現相當優異，PWV 各天的平均誤差大多在 1.5 mm 以內，而這七個月的平均誤差則為 0.94 mm，可待加強的部分則是其中共有九天並沒有正常的計算出來。接下來看圖 14 顯示的是 gd2 伺服器 NRT 解，其中共有十四天沒有正常解算，但 PWV 各天的平均誤差大致上介於 1.5~3.0 mm，而這七個月的平均誤差則為 2.26 mm。

而由圖 15 中可以發現 gd 伺服器 DP 解之解算精度表現遠比不上 gd 伺服器，共有五十五天沒有正常解算出來；且 PWV 各天的平均誤差大致上介於 1.5~2.5 mm 之間，誤差較大者甚至超過 4 mm，而這七個月的平均誤差則為 1.53 mm，相較於 gd2 伺服器的 DP 解精度差了將近 0.6 mm。最後圖 9 顯示的是 gd 伺服器 NRT 解，但由於 DOY 246 以前的解算成果沒有進行備份被伺服器自動刪除，故本統計僅針對 DOY 247 以後的資料完整度進行統計，而 PWV 各天的平均誤差與 gd2 伺服器的結果類似，同樣介於 1.5~3.0 mm，而這兩個月的平均誤差則為 2.16 mm，相較於 gd2 伺服器的 DP 解精度為佳約 0.1 mm。

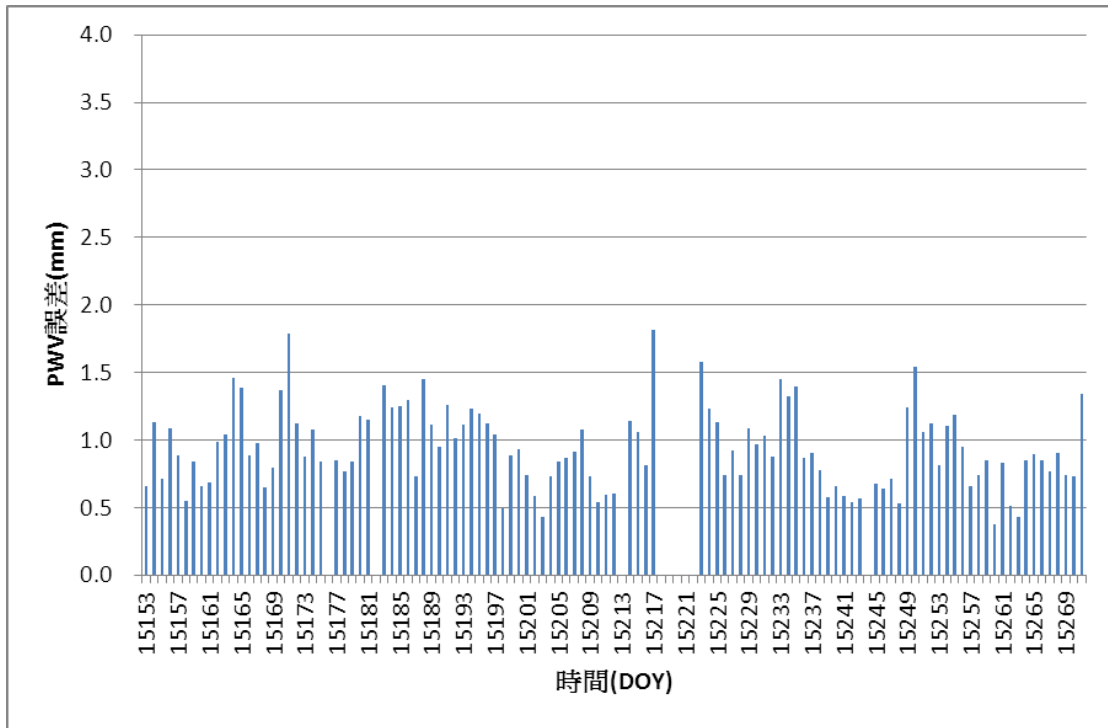


圖 13 gd2 伺服器 DP 解之解算精度

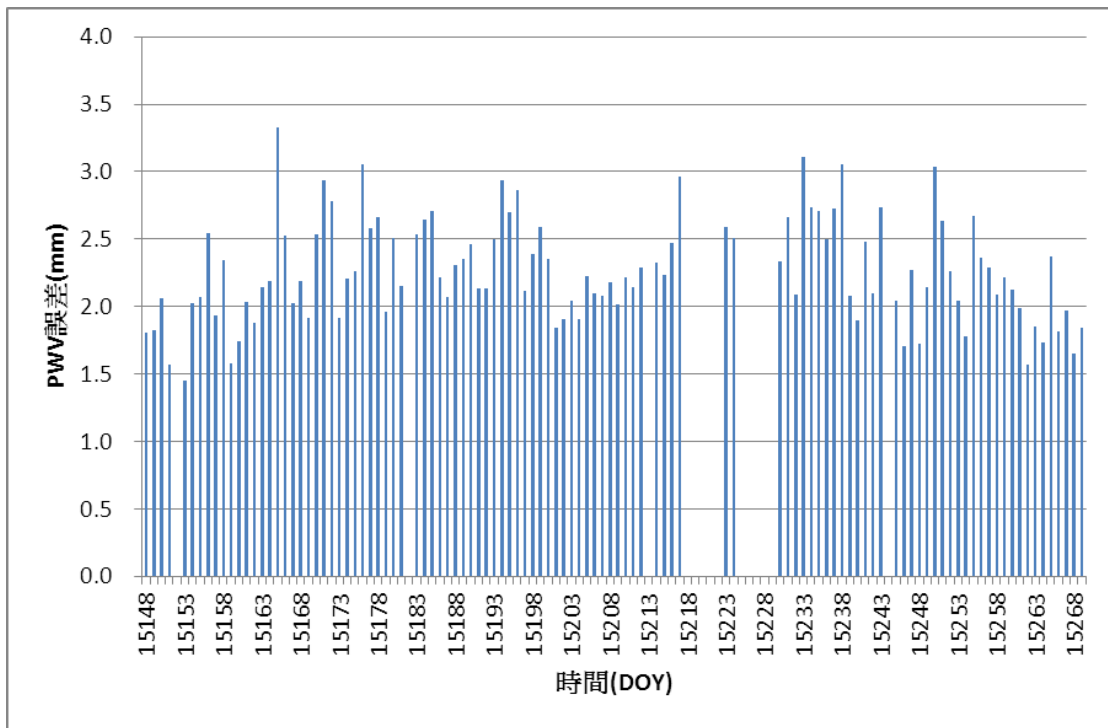


圖 14 gd2 伺服器 NRT 解之解算精度

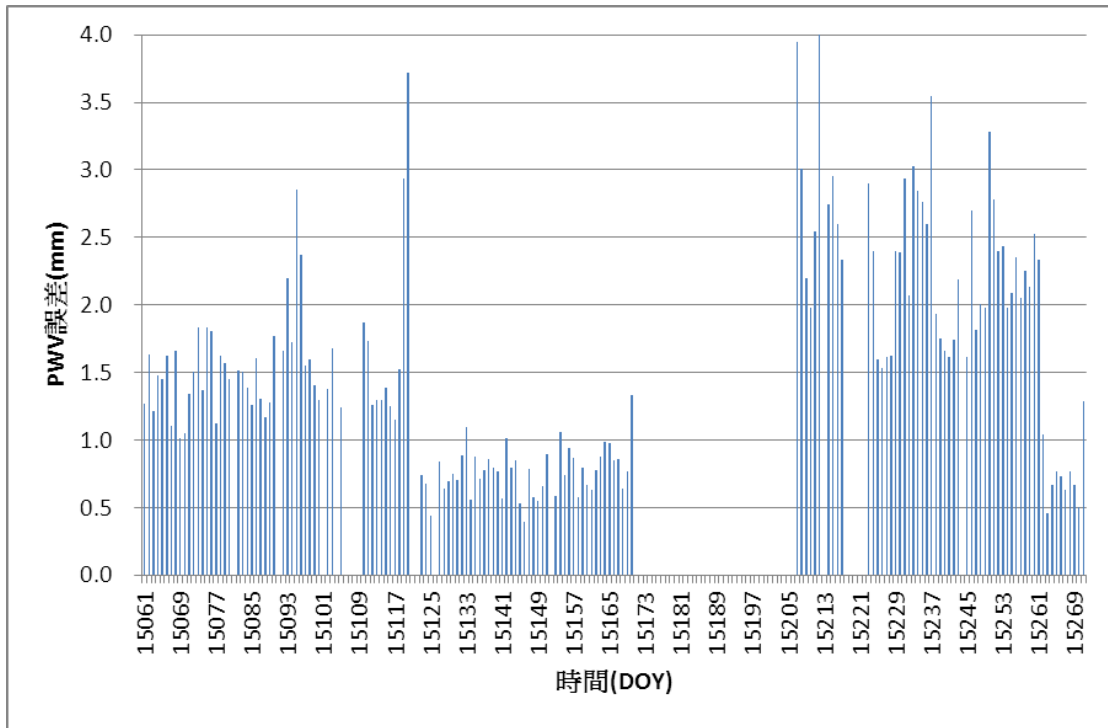


圖 15 gd 伺服器 DP 解之解算精度

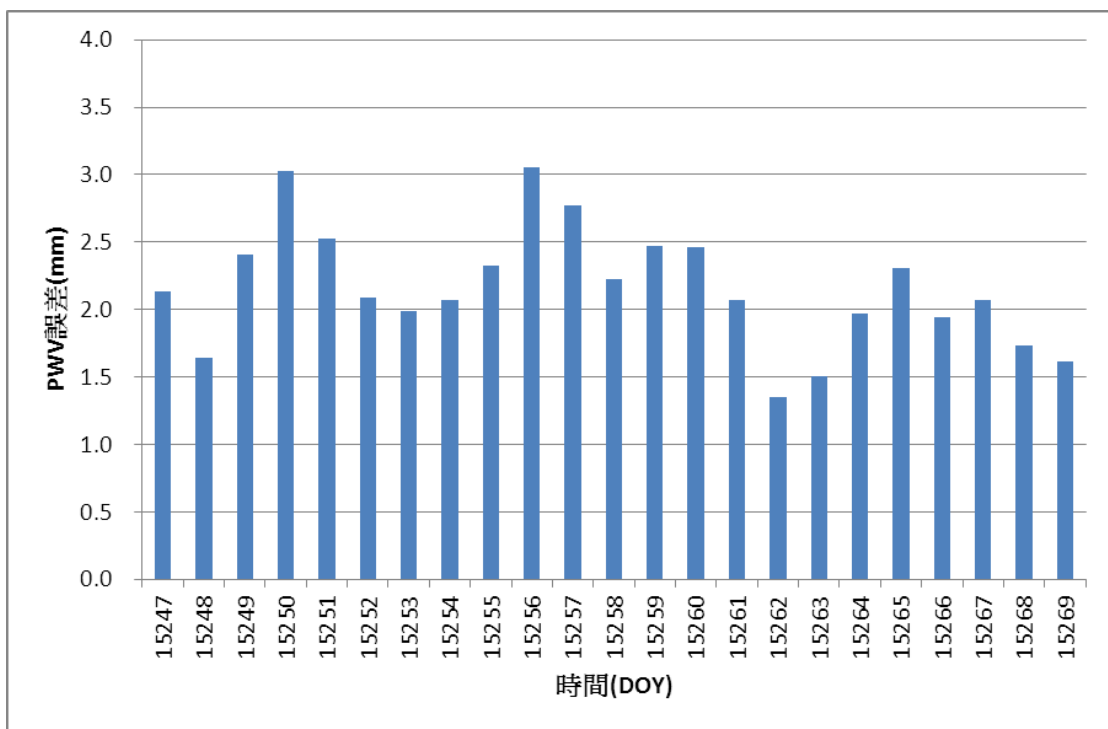


圖 16 gd 伺服器 NRT 解之解算精度

整體而言，上述四種方法若以 gd2 伺服器 POST 解做為參考值（真值），其解算精度及解算時效統計結果如表 2 所示。發現根據 NRT 的成果，時間延遲兩小時之後，不論是 gd2 伺服器或 gd 伺服器，PWV 的平均誤差約為 2.2 mm；而根據 DP 的成果，當時間延遲兩天之後，gd2 伺服器的平均誤差已縮小至 0.94

mm，但 gd 伺服器的平均誤差僅微幅的進步至 1.53 mm，主要的原因應該與 gd 伺服器的解算完整度不佳有關。

表 2 不同解算機制之解算精度及解算時效

解算機制	解算精度	解算時效
gd2 伺服器 DP 解	0.94 mm	兩天後
gd2 伺服器 NRT 解	2.26 mm	兩小時後
gd 伺服器 DP 解	1.53 mm	兩天後
gd 伺服器 NRT 解	2.16 mm	兩小時後

最後，gd2 伺服器 DP 解、gd2 伺服器 NRT 解、gd 伺服器 DP 解以及 gd 伺服器 NRT 解的解算精度空間分布圖則如圖 17~20 所示，可以發現誤差較大的區域仍在於北部山區，其次為新竹、苗栗、台中附近的測站。

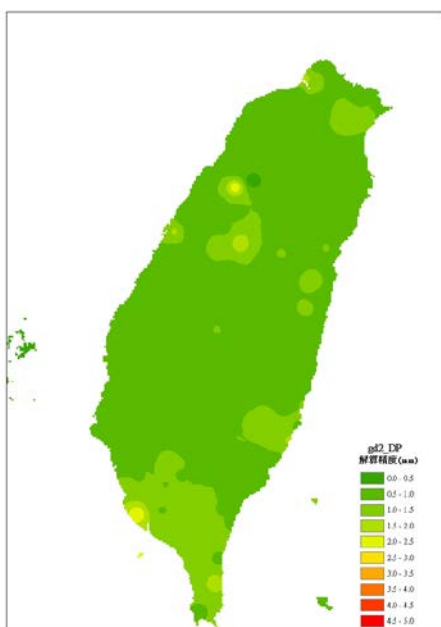


圖 17 gd2_DP 解算精度之空間分布

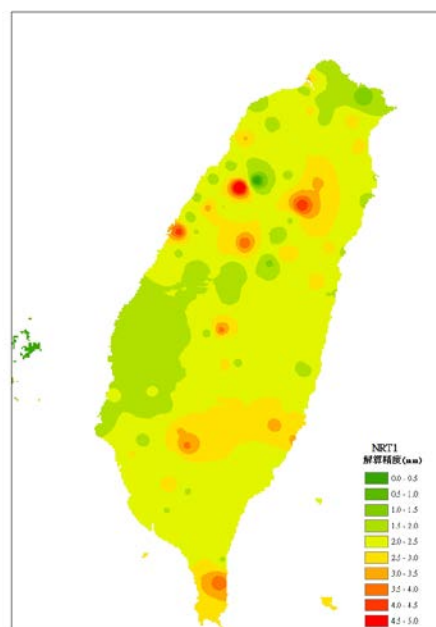


圖 18 gd2_NRT 解算精度之空間分布

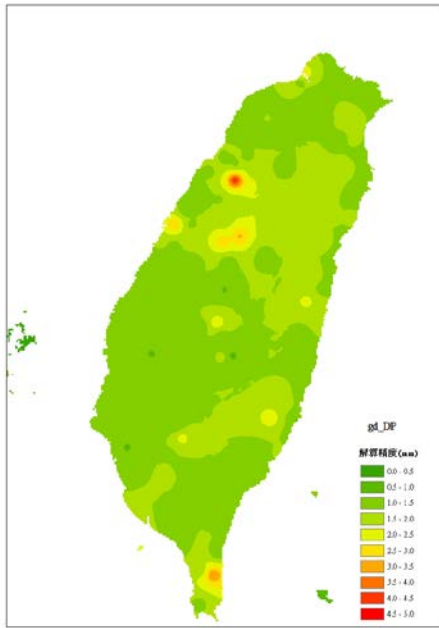


圖 19 gd_DP 解算精度之空間分布

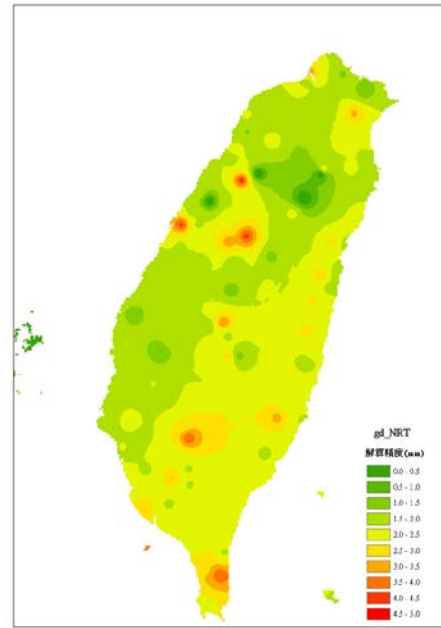


圖 20 gd_NRT 解算精度之空間分布

4-4 不同天線罩對水氣求定之影響

GPS 天線接收到衛星信號的位置稱為相位中心，目前應用於 GPS 量測工作之各型天線，其物理中心與相位中心位置通常不一致，且相位中心並非穩定的點，相位中心會隨著信號來源方向改變，此即為相位中心變化。GPS 接收儀天線相位特性可分別以信號來源的仰角及方位角加以描述，一個理想的天線其隨著仰角而改變的相位模式應是相當平緩的，甚至應該是不受仰角變化的影響；而隨著方位角而改變的相位模式則應盡可能與方位角成正比，然而，實際的天線相位特性並非如此 (Imakiire et al., 1997)。

對於同一天線而言，L1 與 L2 信號的相位中心是不相關的，僅有在偶然的情況下會有一致的情形發生；不同型天線間的相位中心亦不相同，而同型天線其相位中心則會趨於一致 (Gurtner and Liu, 1995)。天線相位中心會因衛星信號來源方向而改變，亦即相位中心之變化與信號來源方向之仰角及方位角有關。與仰角相關之相位中心變化，其主要造成相對高程量測上的誤差及測站間基線之尺度誤差，而與方位角相關之相位中心變化則會導致水平位置的誤差 (Rothacher et al., 1995)。

天線相位中心誤差可細分為兩方面討論：

- (1) 天線平均相位中心的位置與天線物理中心的差異即稱為相位中心的偏移量。
- (2) 瞬間相位中心與平均相位中心之差異稱為相位中心變化量。

圖 21 說明了天線物理中心與平均相位中心及平均相位中心與瞬間相位中心之關係，儘管天線相位中心變化對某些 GPS 量測工作並不顯得如此重要，但對於高精度 GPS 量測而言，相位中心變化是必須加以考慮並進行修正的。

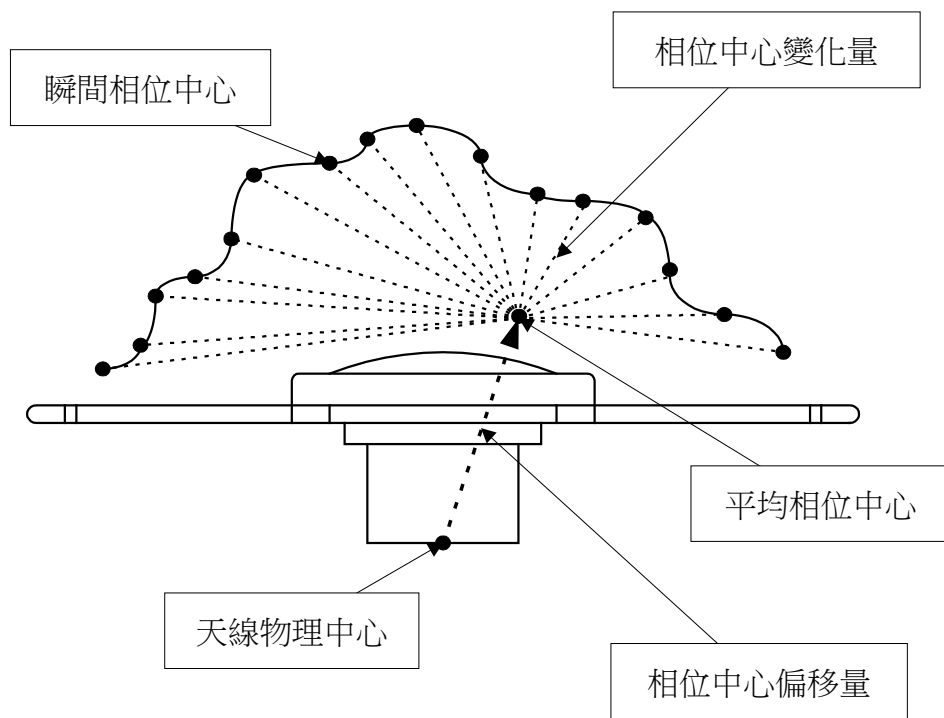


圖 21 天線物理中心、平均相位中心與瞬間相位中心之關係

GPS 天線盤相位中心的率定結果，國際上普遍採用美國大地測量局（NGS）的率定成果，其網頁如圖 22 所示。中央氣象局採用的 GPS 天線盤基本上多為 Trimble 公司的 TRM 41249.00 天線，其形式如圖 23 所示。

Antenna Calibrations							
National Geodetic Survey							
NGS Home	About NGS	Data & Imagery	Tools	Surveys	Science & Education	Search	
Browse Antenna Information by Manufacturer and Model Access Calibrations for All Antennas Help Links							
Trimble							
Individual calibrations for Antenna Codes (Antenna Model + Radome) with images and orientation definitions.							
NOTE:							
To get ARP and NRP abbreviation explanation hover your cursor over the 3-letter code. On a mobile device follow link at top of column.							
Under "Date Calibrated" a * and yellow highlight indicates that the NGS calibration was replaced by an IGS calibration within the last 6 months with replacement date shown.							
Antenna Model	Radome	Images	Calibrations	Description	Date Calibrated	ARP	NRP
TRM14177.00	NONE		ANTEX ANTINFO	4000ST L1 Geodetic, Model 14177.00	25-MAR-11		
TRM14532.00	NONE	Drawing Side Top	ANTEX ANTINFO	4000ST L1/L2 Geodetic, Model 14532.00	25-MAR-11	BPA	NOM
TRM14532.10	NONE	Drawing Side Top	ANTEX ANTINFO	4000SSE kIn L1/L2, Model 14532.10	25-MAR-11	TOP	UNK
TRM22020.00+GP	NONE	Drawing Side Top	ANTEX ANTINFO	Geod. L1/L2 compact, with groundplane, Model 22020-00	25-MAR-11	BPA	NOM

圖 22 美國大地測量局天線盤相位中心的率定網頁

TRM 41249.00

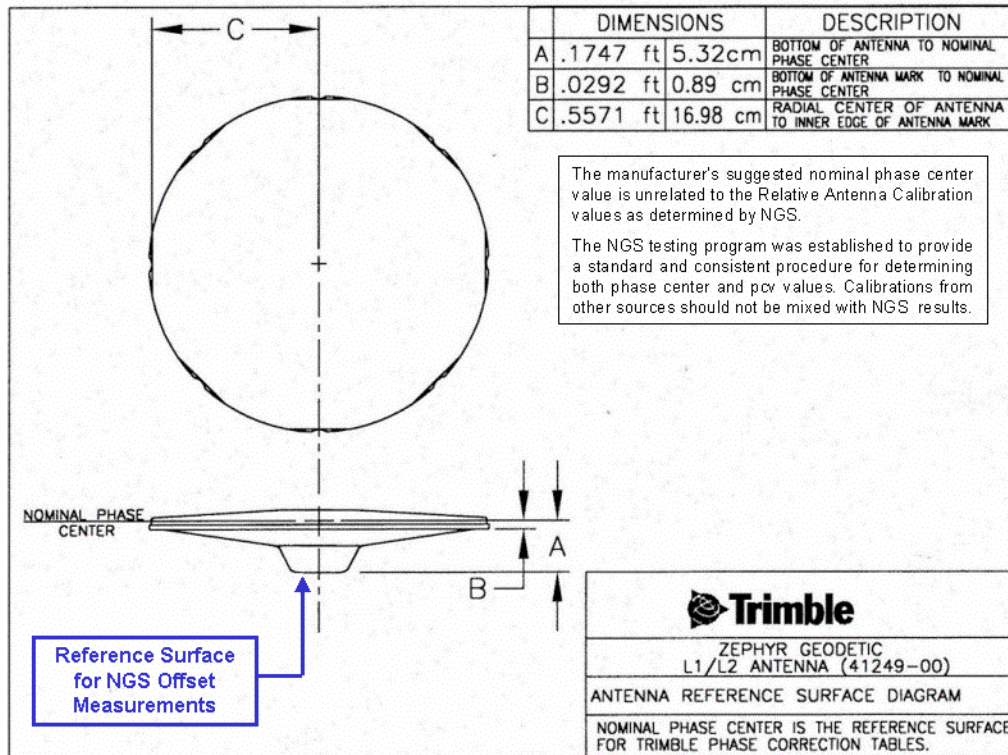


圖 23 Trimble 公司的 TRM 41249.00 天線

而在不同的天線罩部分，NGS 網頁共有率定四種款式，分別為：SCIT、DOME、TZGD、NONE（無天線罩），目前解算的設定都採用 SCIT 型式，本研究取了今年三月第一週的資料來進行測試，採用不同天線罩解算的 PWV 值如圖 24 所示。為了進一步分析其差異量，故以 SCIT 型式所解出來的 PWV 為標準，分別與其他三種型式所解出來的 PWV 計算其平均誤差，發現與 DOME 型式的差異最小，平均約為 0.5 mm；與 TZGD 的差異次之，平均誤差約為 0.9 mm；與 NONE 的差異最大，平均誤差則可達到 1.1 mm。但整體來講不同天線罩對於 PWV 解算的誤差影響不大，採用不同天線罩與 SCIT 型式天線罩的 PWV 解算差異量則如圖 25 所示。

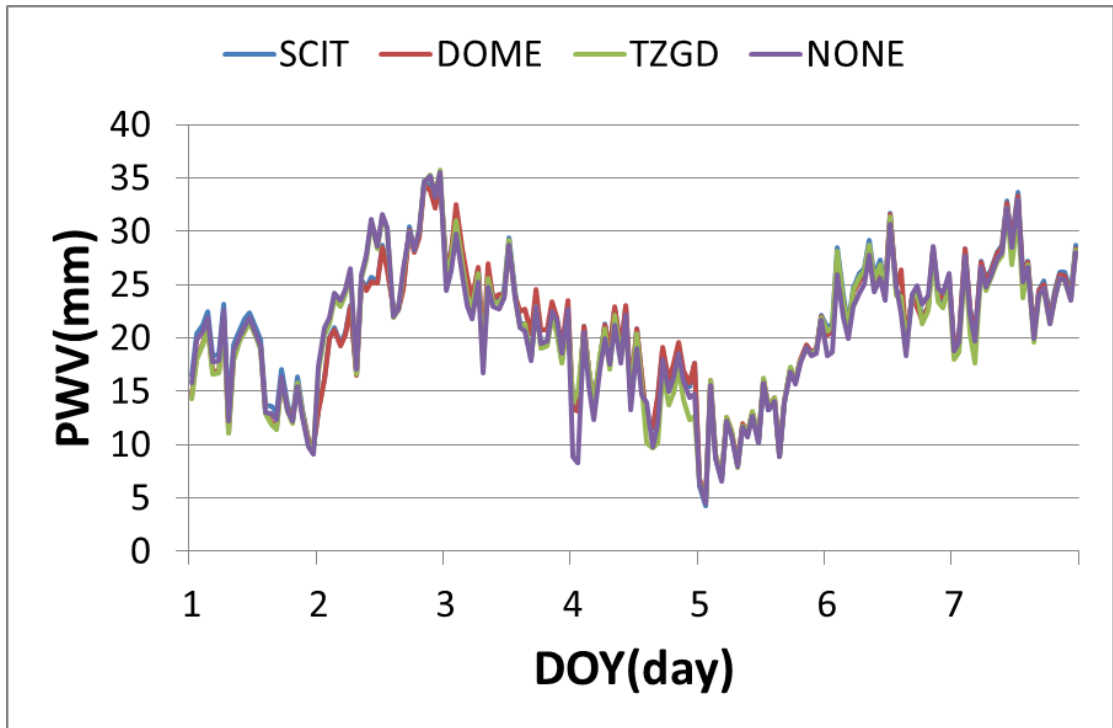


圖 24 採用不同天線罩解算的 PWV 值

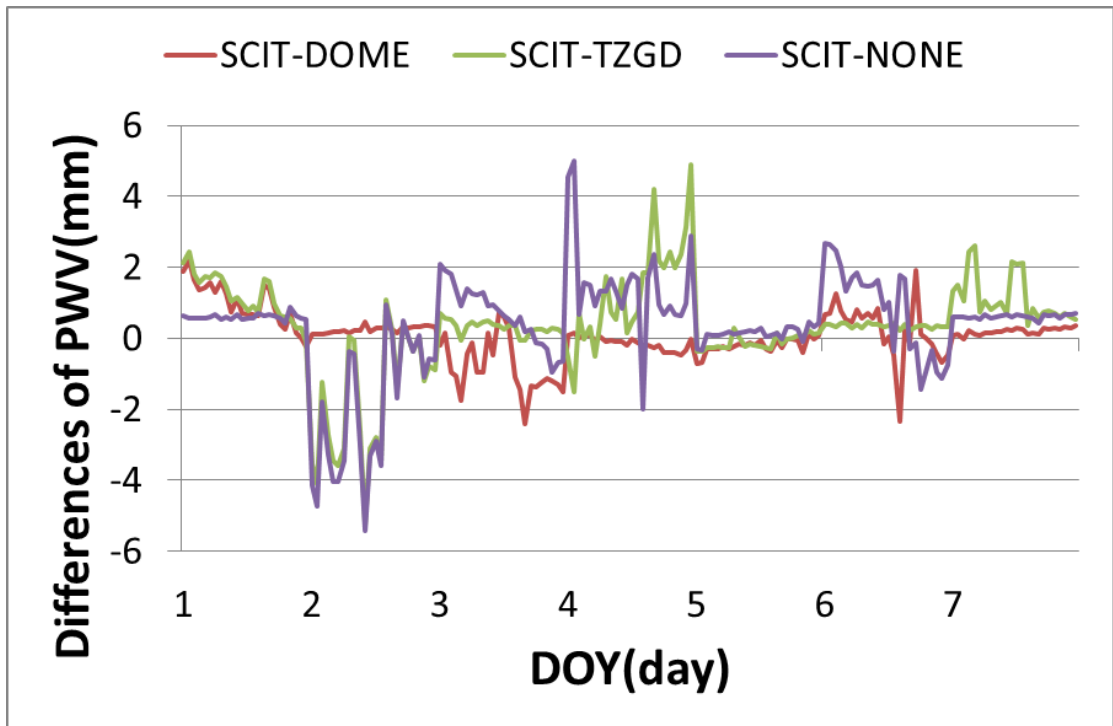


圖 25 採用不同天線罩與 SCIT 型式天線罩的 PWV 解算差異量

五、落實應用情形

因為中央氣象局更新的衛星接收儀資料增加 T02 格式，因此需更改程式以支援 T02 檔案之轉換；此外，原系統在最後一個時段由於跨天的緣故，導致 W Session 資料無法成功取得，在此一併修正系統擷取 GPS 觀測資料之時間設定。

DP(daily processing)的子程序說明如下：

cwb_day_cron：呼叫 `~/bin/cwb_day`date -u --date "1 day ago" '+%Y %m %d``
~/bin/cwb_day 輸入前一天的年 月 日，例如：2012 02 01。

GetRnx.pl：根據/STA/igs_network 裡的站下載 RINEX 站資料。

GetGeonetRnx.pl：同 GetRnx.pl 但下載 ftp://terras.gsi.go.jp/data/GPS_products/。

GetCwbRnx.pl：轉換每天 CWB T00及 T02格式成 RINEX 格式。

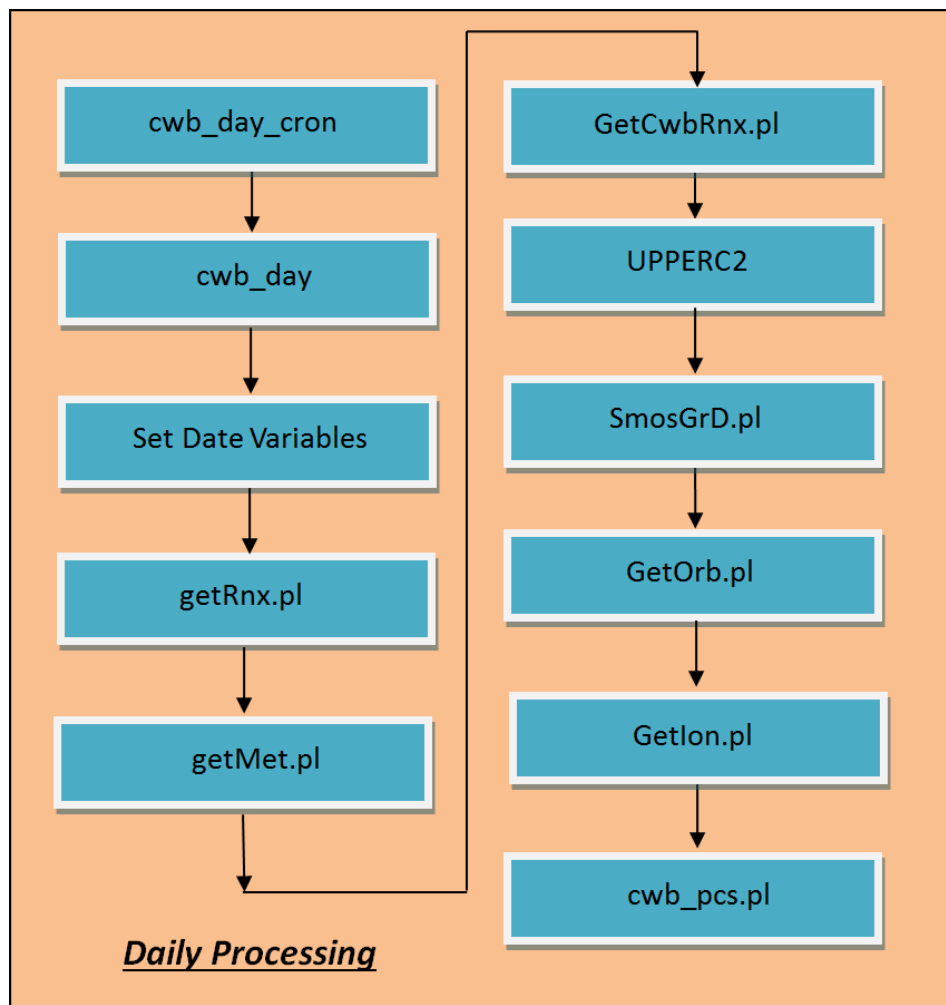
UPPERC2：轉換檔案名稱為大寫的格式。

SmosGrd：內插 AWS 和 Mesonet 資料。

GetOrb.pl：到 IGS 網站下載 IGR 軌道檔案。

GetIon.pl：到 CODE 網站下載 GIM 電離層模式檔案。

cwb_pcs.pl：執行 Bernese BPE 程序。



GetCwbRnx.pl

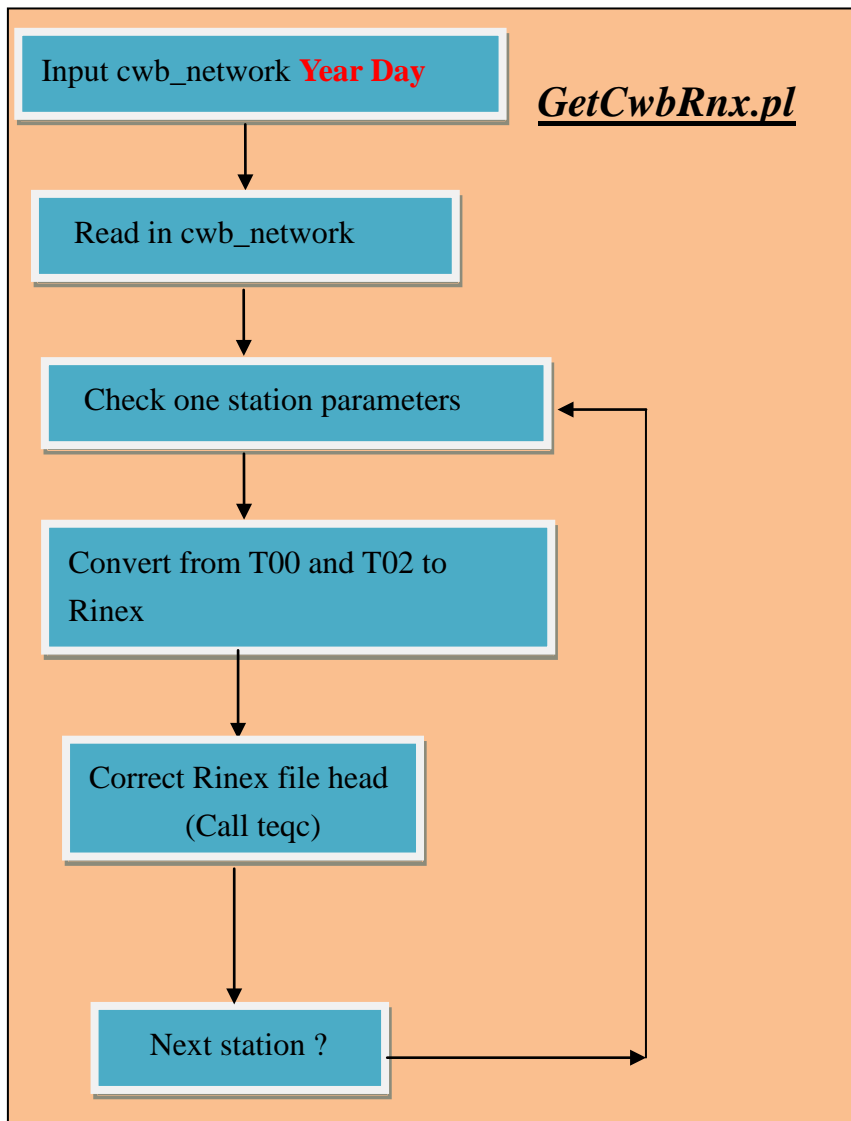
程式執行流程概述：

移至 /pub/john/GPSDATA / CWB_DP /RAW 目錄

執行的流程大致同 getRnx.pl，但省去的下載 Rinex 檔的程式碼，因為氣象局內部的 GPS t00 和 t02 資料是自動上傳至氣象局內部的磁碟陣列，所以不需要下載。氣象局的 GPS 資料位於/taccop5g/GPSOBS，因為 t00 和 t02 資料並不是 Rinex 檔的格式，所以需要呼叫 trimble 提供的 runpkr00 程式把 t00 及 t02 檔轉至 Rinex 檔格式。

Input：cwb_network 年 日。

Output：修正過後的 RINEX data(副檔名為 .xxo，xx 為年)。

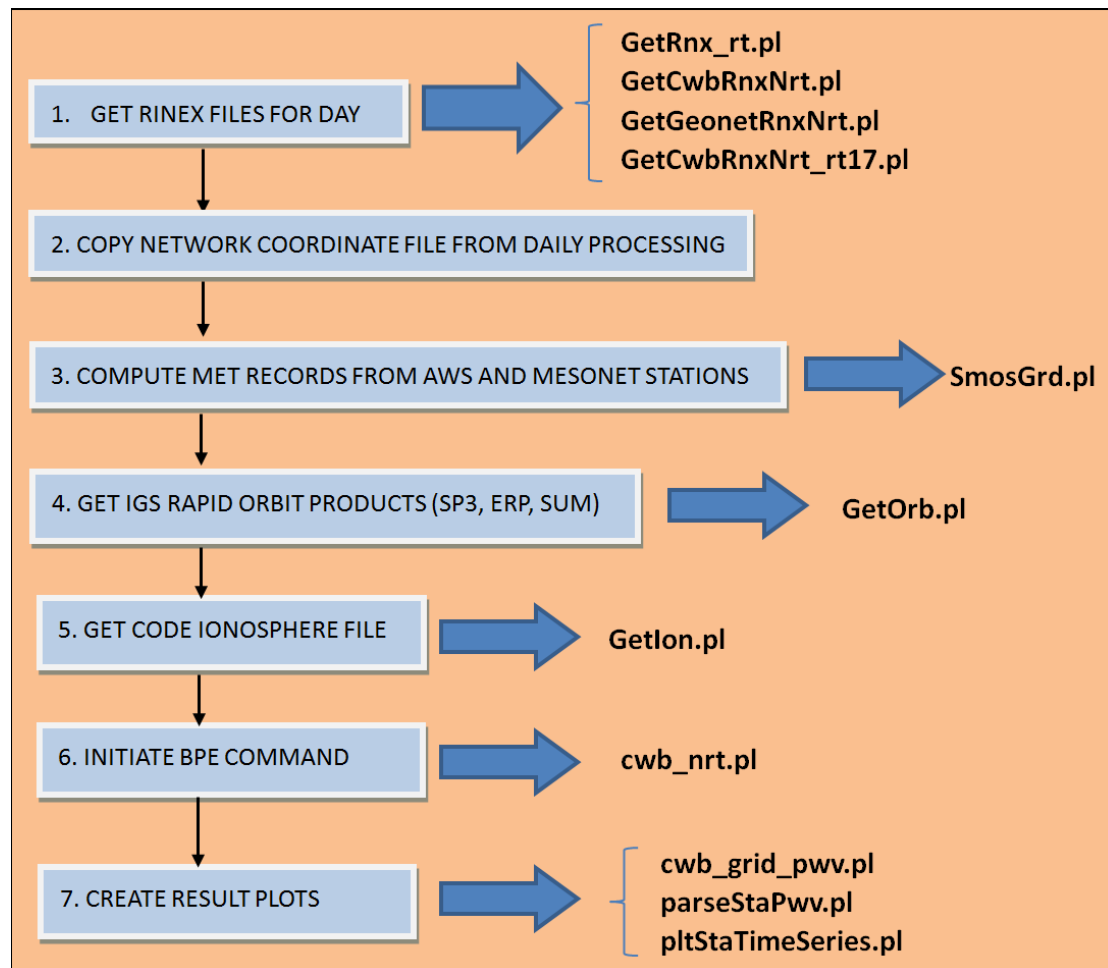


cwb_nrt_cron NRT(Near-Real-Time processing)程序：

NRT 程序由 cwb_nrt(shell script 檔)來做主要流程控制，它包含了以下七個流程：

1. 下載當日目前所有的 Rinex 檔(GET RINEX FILES FOR DAY)。
2. 複製前一天 DP(Daily Processing)CRD 檔(COPY NETWORK COORDINATE FILE FROM DAILY PROCESSING)。
3. 計算出內插過後的 MET 檔(COMPUTE MET RECORDS FROM AWS AND MESONET STATIONS)。
4. 下載衛星軌道檔案(GET IGS RAPID ORBIT PRODUCTS (SP3, ERP, SUM))
5. 下載 GIM 電離層模式參數檔(GET CODE IONOSPHERE FILE)。
6. 啟始 BERNESE 主程式(INITIATE BPE COMMAND)。
7. 繪圖並輸出至網頁(CREATE RESULT PLOTS)。

如下圖所示部分流程會呼叫的 Perl 檔。



NRT(Near Real Time processing)的子程序說明如下：

cwb_nrt_cron：呼叫 `~/bin/cwb_nrt `date -u --date "3 hour ago" '+%Y %m %d %H'``
`~/bin/cwb_nrt` 輸入前一天的年 月 日 小時，例如：2012 02 01 12。

GetRnx_rt.pl：根據/STA/igs_network 裡的站下載 RINEX 站資料。

GetGeonetRnxNrt.pl：同 GetRnx.pl 但下載 ftp://terras.gsi.go.jp/data/GPS_products/。

GetCwbRnxNrt.pl：轉換2小時 CWB T00和 T02格式成 RINEX 格式。

GetCwbRnxNrt_rt17.pl：轉換1小時 r-17格式成 RINEX 格式。

UPPERC2：轉換檔案名稱為大寫的格式。

SmosGrd：內插 AWS 和 Mesonet 資料。

GetOrb.pl：到 IGS 網站下載 IGR 軌道檔案。

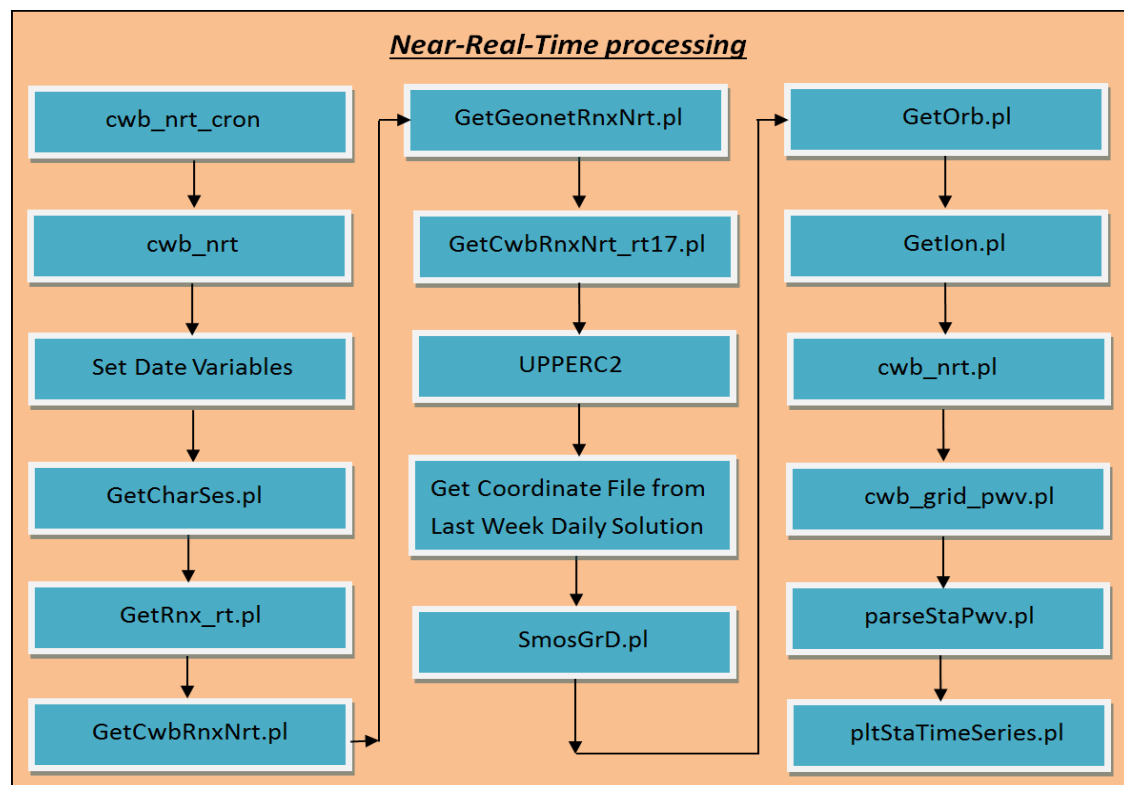
GetIon.pl：到 CODE 網站下載 GIM 電離層模式檔案。

cwb_nrt.pl：執行 Bernese BPE 程序。

cwb_grid_pwv.pl：內插 PWV 網格。

parseStaPwv.pl：轉換 PWV 檔案格式。

pltStaTimeSeries.pl：繪圖並輸出至網站。



GetCwbRnxNrt.pl

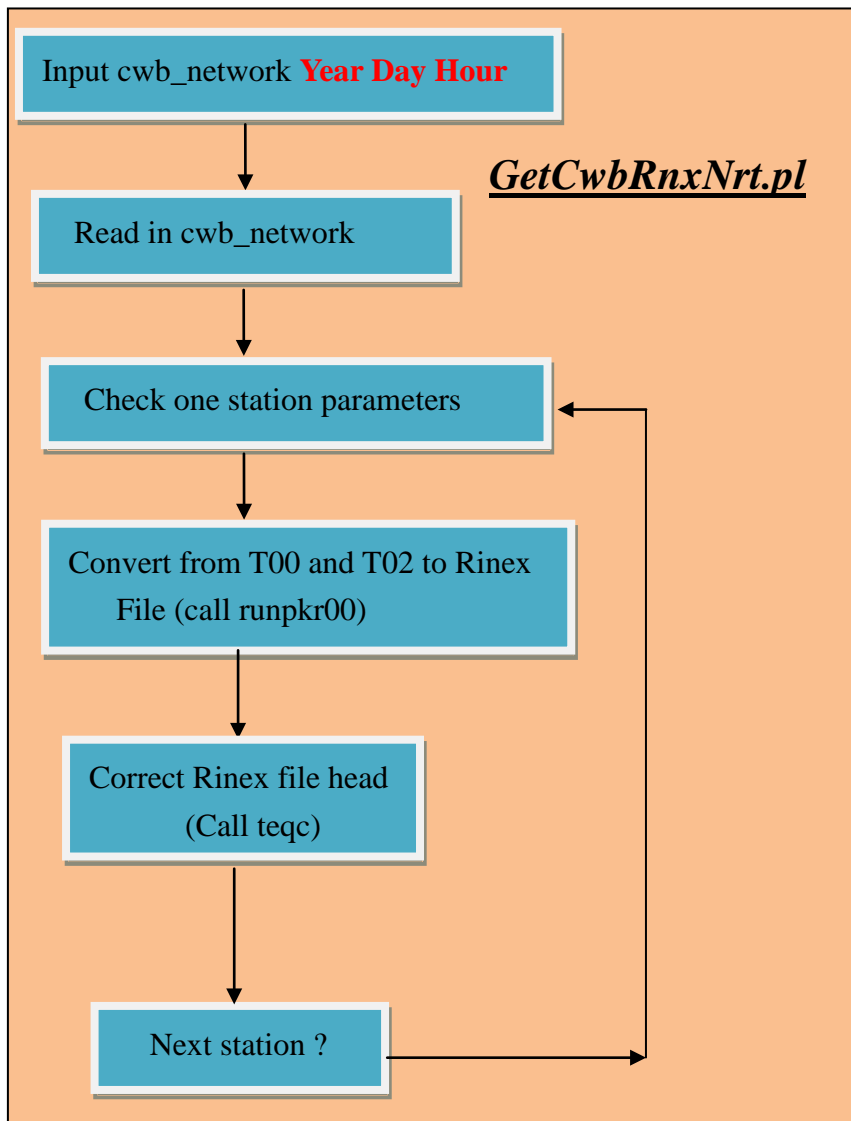
程式執行流程概述：

移至 /pub/john/GPSDATA / CWB_DP /RAW 目錄

執行的流程大致同 getRnx_rt.pl，但省去的下載 Rinex 檔的程式碼，因為氣象局內部的 GPS t00 及 t02 資料是自動上傳至氣象局內部的磁碟陣列，所以不需要下載。氣象局的 GPS 資料位於/taccop5g/GPSOBS，因為 t00 及 t02 資料並不是 Rinex 檔的格式，所以需要呼叫 trimble 提供的 runpkr00 程式把 t00 及 t02 檔轉至 Rinex 檔格式。

Input：cwb_network 年 日 時。

Output：修正過後的 RINEX data(副檔名為 .xxo，xx 為年)。



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。
- 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.
- 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, 2015. Determining the precipitable water vapor in the atmosphere with ground-based GPS and analyzing its yearly variation over Taiwan, *Atmospheric environment*.
- 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.