

利用水氣微波輻射儀提升 GPS 定位精度之研究

葉大綱¹ 林承毅² 王傳盛³

論文收件日期：101.03.26

論文修改日期：101.08.31

論文接受日期：101.10.14

摘 要

GPS 水平坐標的精度約在 1~2 mm，高程坐標的精度約在 5~10 mm。垂直定位精度較差的理由除了衛星在天空中的分佈有其理論上的極限值，造成垂直方向的衛星分布情況較差；也由於對流層折射的影響，特別是水氣所造成的訊號遲延量無法有效的消除，至今仍是 GPS 定位需要克服的重要課題之一。本研究利用水氣微波輻射儀（Water Vapor Radiometer, WVR）的觀測資料，配合不同長度的基線及不同的天候狀況來進行定位精度的評估，結果發現在計算中若使用 Neill 模式配合水氣微波輻射計觀測資料來進行誤差改正，在未降雨的時候只需先將 WVR 原始觀測資料透過亮溫修正程式進行校正，即可提升 5% 的定位精度；但若未將 WVR 資料進行校正，而直接導入 WVR 原始觀測資料來進行改正，反而會降低 GPS 基線解算的精度。此外，在降雨的時候不論 WVR 資料是否經過校正，皆無法利用此一觀測資料來修正 GPS 對流層誤差。

關鍵詞：水氣微波輻射儀、全球定位系統、對流層延遲誤差

¹ 副教授，國立台北大學不動產與城鄉環境學系，TEL:(02)86741111 轉 67430，
E-mail:bigsteel@mail.ntpu.edu.tw。

² 課員，內政部國土測繪中心。

³ 博士後研究員，國立台北大學不動產與城鄉環境學系。

Enhancing the precision of GPS positioning by using the measurements from water vapor radiometer

Ta-Kang Yeh¹, Cheng-Yi Lin², Chuan-Sheng Wang³

Abstract

The horizontal precision of GPS positioning is 1~2 mm and the vertical precision of GPS positioning is 5~10 mm. The reason that the vertical precision is worse than the horizontal precision shall be the distribution of the GPS satellites. Moreover, the water vapor in the atmosphere can't be eliminated effectively is also the important reason. In this study, the data of Water Vapor Radiometer (WVR) was adopted to correct the tropospheric delay for the GPS positioning in different weather. The results indicated that if the data of WVR after calibration was adopted to correct the tropospheric delay, the precision of GPS positioning can be enhanced about 5% in the period without rainfall. On the other hand, if the observation of WVR without calibration was employed, the precision of GPS positioning can't be enhanced anymore. Moreover, whatever the WVR data was calibrated or not in the period with rainfall, we can't use this observation to correct the tropospheric delay for the GPS data processing.

Keywords: Global Positioning System, Tropospheric Delay, Water Vapor Radiometer

¹ Associate Professor, Department of Real Estate and Built Environment, National Taipei University, Tel:02-86741111 ext 67430, E-mail:bigsteel@mail.ntpu.edu.tw.

² Officer, National Land Surveying and Mapping Center, Ministry of the Interior.

³ Postdoctoral Research Fellow, Department of Real Estate and Built Environment, National Taipei University.

一、前言

內政部國土測繪中心已建置全國性 e-GPS 衛星定位基準網，其定位標準差可達平面 1 cm、高程 2 cm 以內，定位內部精度可達平面 2 cm、高程 4 cm 以內(葉大綱等，2011)；使用 e-GPS 衛星定位基準網，相較於傳統 RTK，不僅操作方式簡便、更可以有效節省人力與物力，其定位的可靠度與精度更大為提高。由於 e-GPS 系統對於參考主站之坐標精度要求甚高，主站坐標的相對誤差一旦大於 2 cm，就會導致解算基線及區域誤差模式無法進行求解(內政部土地測量局，2006)，在擁有多項 GPS 誤差因素干擾下，要使主站坐標達到誤差標準之內確實是一大挑戰。然而，GPS 誤差來源中，尤其以訊號延遲效應影響甚大，大氣中的水氣含量會產生明顯影響 GPS 訊號傳遞的乾、濕延遲誤差，其中乾延遲誤差雖可靠氣象模式進行消除，但濕延遲誤差卻是難以準確的修正(Yeh et al., 2012)。

微波輻射計可精確測定大氣中的水氣含量與分布，是做為 GPS 定位時，修正沿著路徑濕延遲誤差的最佳異質觀測。其觀測原理在於水氣主宰輻射量及濕延遲量，因此從微波輻射量可推估濕延遲量或大氣水氣含量，其精確度達 3~7%，即約 2 mm 等級(王傳盛，2009)。透過高精度的數據資料，可有效的修正 GPS 濕延遲誤差，大幅提升 e-GPS 主站定位精度，使 e-GPS 系統免於主站坐標誤差過大而無法解算基線及區域誤差，裨益 e-GPS 定位技術發揮其最大的效益。因此，本研究嘗試以內政部國土測繪中心之 e-GPS 追蹤站網進行對流層延遲效應的估計工作，期望透過對流層濕延遲量的評估，用以修正 GPS 對流層延遲誤差；而觀測資料則採用 e-GPS 連續接收站的觀測資料，並利用水氣微波輻射儀的資料進行約制校正，以期能對各 GPS 應用領域帶來更精確的成果及效益。

二、對流層延遲誤差與改正方法

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，其幾何延遲部分不大於 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，幾何延遲便可去除，如圖 1 所示。

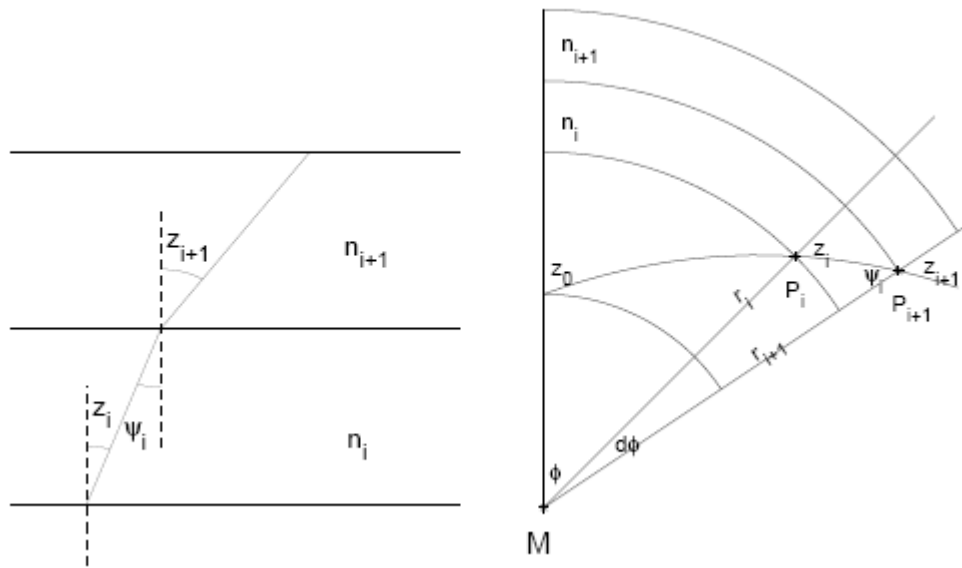


圖 1 司乃耳定律訊號折射示意圖(Kleijer, 2004)

在大氣層中，對流層延遲量可以寫為(王傳盛，2009)：

$$D_{trop}^z = 10^{-6} \left[\int_H^\infty \left(k_1 \frac{P_d}{T} \right) dz + \int_H^\infty \left(k_2 \frac{e}{T} \right) dz + \int_H^\infty \left(k_3 \frac{e}{T^2} \right) dz \right] \dots\dots\dots(1)$$

式中， P_d ：乾空氣分壓， T ：絕對溫度， e ：水氣分壓， K_1 、 K_2 、 K_3 為經驗常數。由理想氣體定律空氣密度可寫成：

$$\rho = \rho_d + \rho_w = \frac{M_d}{R} \left[\frac{P}{T} - \left(1 - \frac{M_w}{M_d} \right) \frac{e}{T} \right] \dots\dots\dots(2)$$

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：

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g \dots\dots\dots(3)$$

代入上式積分可得：

$$\int_H^\infty \frac{P}{T} dz = \frac{R P_s}{M_d g_m} + \left(1 - \frac{M_w}{M_d} \right) \int_H^\infty \frac{e}{T} dz \dots\dots\dots(4)$$

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)，將上式代入延遲積分可以得到：

$$D_{trop}^z = 10^{-6} \left\{ \frac{k_1 R}{g_m M_d} P_s + \int_H^\infty \left[\left(k_2 - k_1 \frac{M_w}{M_d} \right) \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right] dz \right\} \dots\dots\dots(5)$$

此式亦可寫為：

$$D_{trop}^Z = D_{trop,h}^Z + D_{trop,w}^Z \dots\dots\dots(6)$$

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，稱為乾延遲，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，通常稱為溼延遲。由於上式過於複雜，一般使用模式近似之，常用的模式有 Saastamoinen 模式、Hopfield 模式和 Niell 模式。

(一) Saastamoinen 模式(Saastamoinen, 1973)

$$D_{trop,h}^Z = 0.002277 \times P \dots\dots\dots(7)$$

$$D_{trop,w}^Z = 0.002277 \times \left[\left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) \times e - B \right] \dots\dots\dots(8)$$

其中 P 為地表壓力 (單位: mb)， T 為地表溫度 (單位: K)， e 為地表水氣分壓 (單位: mb)， B 為修正係數。

(二) Hopfield 模式(Hopfield, 1971)

$$D_{trop,h}^Z = 10552 \times 10^{-5} \times \frac{P}{T} (4.136 + 148.72 \times (T - 173.16) - H_T) \dots\dots\dots(9)$$

$$D_{trop,w}^Z = 7.46512 \times 10^{-2} \times \frac{e}{T^2} (11000 - H_T) \dots\dots\dots(10)$$

其中 P 為地表壓力 (單位: mb)， T 為地表溫度 (單位: K)， e 為地表水氣分壓 (單位: mb)， H_T 為測站高程 (單位: m)。

(三) Niell 模式(Niell, 1996)

$$D_{trop,h}^Z = \frac{\frac{1}{1 + \frac{a_{dry}}{1 + \frac{b_{dry}}{1 + c_{dry}}}}} {\sin \varepsilon + \frac{a_{dry}}{\sin \varepsilon + \frac{b_{dry}}{\sin \varepsilon + c_{dry}}}} + \left[\frac{1}{\sin \varepsilon} - \frac{\frac{1}{1 + \frac{a_{ht}}{1 + \frac{b_{ht}}{1 + c_{ht}}}}} {\frac{1}{\sin \varepsilon + \frac{a_{ht}}{\sin \varepsilon + \frac{b_{ht}}{\sin \varepsilon + c_{ht}}}}} \right] \times \frac{H}{1000} \dots\dots\dots(11)$$

$$D_{trop}^z = \frac{1}{1 + \frac{a_{wet}}{1 + \frac{b_{wet}}{1 + c_{wet}}}} \cdot \frac{1}{\sin \epsilon + \frac{a_{wet}}{\sin \epsilon + \frac{b_{wet}}{\sin \epsilon + c_{wet}}}} \dots\dots\dots(12)$$

其中 ϵ 為衛星仰角， H 為高程，不同下標之 a 、 b 、 c 為相關係數和常數。本研究採用 Bernese 5.0 軟體，以最小二乘法解算 GPS 觀測資料，並估計天頂向延遲量。將對流層濕延遲輸入 Bernese 計算軟體時，由於輻射計所觀測的延遲量格式無法被 GPS 軟體所接受，輸入方式是將輻射計觀測的濕延遲轉成 RINEX (Receiver Independent Exchange Format) 的 M 檔 (Met 檔，意指氣象檔) 或 Bernese 的 M 檔，並完成三維定位計算與分析，藉以比較實測資料與經驗模式之量測精度，並針對三維定位之精度進行分析。

以載波相位觀測方程式計算待測站坐標(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坐標，當測站站坐標已知，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(Wang *et al.*, 2008)：

$$\varphi_{ij}^{pq}(t) = \frac{f}{c} \langle D_{i,trop}^z(t) \cdot [M(\theta_i^p) - M(\theta_i^q)] - D_{j,trop}^z(t) \cdot [M(\theta_j^p) - M(\theta_j^q)] \rangle \dots\dots\dots(13)$$

- f : 頻率
- c : 光速
- 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。

目前的 GPS 定位精度中，平面坐標的定位精度約在 1~2 mm 左右，高程坐標的定位精度約在 5~10 mm 左右(Yeh *et al.*, 2011)。高程定位精度較差的理由有兩個：第一，因為衛星在天空中的分佈狀況有其理論上的極限值；因此觀測者的最低仰角幾乎都定在 15 度(Santerre, 1991)。第二，由於對流層的折射誤差；特別是水氣所造成的電磁波訊號延遲(Emardson and Jarlemark, 1999)。

GPS 衛星訊號在傳播的路徑中會穿過大氣層，會使 GPS 衛星訊號的傳播路徑改變及傳播速度改變，造成電磁波延遲到達。電離層的影響可以使用雙頻電離層線性組合消除大部分，但中性大氣層，主要為對流層與平流層下部的氣體所引起的，必須使用模式或其他觀測儀器消除。而對流層延遲量可以分為兩種類型：第一種為流體靜力延遲，又稱乾延遲，第二種為溼延遲。乾延遲的量值在天頂方向約為 2.3 公尺，可以透過地表壓力值來模式化進而移除乾延遲，其精度可達 mm 等級(Bevis et al., 1992)，但濕延遲無法有效地以模式移除。

上述 Saastamoinen(1973)所推導的靜力延遲 (Zenithal Hydrostatic Delay, ZHD) 經過許多的驗證，其精度可達 1 mm 或更優的等級(Mendes and Langley, 1999)。Hopfield(1971)所導出的天頂向流體靜力延遲和 Saastamoinen 模式僅有少許的差異(Bock and Doerflinger, 2001)。這些地表氣象經驗模式，也都被應用在估計天頂向濕延遲 (Zenithal Wet Delay, ZWD)。然而由於水氣在大氣中的時間和空間的不均勻性，使得應用地表氣象模式估計 ZWD 仍存在許多的問題。ZHD 模式在中緯度地區其精度約在 2~3 mm。從地表氣象資料推估 ZWD 其誤差約達 3~5 cm，而鋒面過境時則可達 5~8 cm(Liou and Huang, 2000)。Kim et al. (2003)在進行地區性高精度 GPS 監測的任務中，發現地表氣象參數的觀測有益於 GPS 定位，但由於所使用的大氣數學模擬模式仍屬經驗式，再加上大氣水氣場變化迅速，因此在對測站周圍進行溫度、濕度、壓力及水氣觀測並進行計算後，雖然能對 GPS 定位有所助益，但仍會留有殘差在計算所得的成果之中。併用標準的大氣狀況及經驗氣象模式，來代替地面站的氣象觀測資料時，會得到不錯的計算結果(Dodson et al., 1996)，不過這只針對長時間的資料分析，其原因在於偶發的氣象事件會被平均掉。對於常年的資料分析，氣候的變化可以被觀察及偵測出來，但對於數小時或數天的測量，特殊的大氣情況，會反應在每日的坐標計算成果變化上。Klobuchar and Kunches(2003)發現大氣對流層影響 GPS 定位的延遲量，會隨著觀測仰角的變低而呈倍數的增加。除非能準確地觀測溫度、濕度、壓力及水氣含量，並導入氣象方程式於定位計算中，而不再使用標準大氣狀況，才可精進 GPS 定位成果。

水氣微波輻射儀 (Water Vapor Radiometer, WVR) 為一遙測水氣及相關資訊的儀器，WVR 觀測可以提供精確的路徑濕延遲來修正 GPS 定位。天頂靜力延遲通常使用經驗氣象模型，並配合地表氣象資料或標準大氣資料來進行評估，並利用映射函數來進行其它方向的靜力延遲估算，而濕延遲量則是從利用 WVR 遙測水氣含量獲得。若使用 WVR 於直接修正 GPS 衛星訊號的斜向濕延遲量時，該方法所展現出精度的改進，對 22~850 公里的基線而言，GPS 垂直坐標從 2 cm 進步到 1 mm(Alber et al., 1997)。不過，GPS 觀測誤差與大氣中水氣總量約成線性關係，該技術用於台灣能否達到同樣精度，仍有待進一步研究(Liou et al., 2001)。地面 WVR 的發展已在前面提及，其改進成果已經展現出在天頂濕延遲有 5 mm 的等級(Weckwerth et al., 1999)。地面 WVR 快速掃描的能力，現在已允許在小於 10 分鐘之內，連續的進行

5 顆 GPS 衛星斜向濕延遲的量測。這樣的方法已有報告指出在 43 公里基線觀測 11 天的垂直坐標方面達到 1.2 mm 等級的精度(Alber et al., 1997)，這個實驗是使用直徑 85 公分的 choke ring 天線盤，能使多路徑效應降到最低。

在國內方面，直到最近幾年才由內政部引進輻射計配合 GPS 觀測，王傳盛(2009)探討參數估計和輻射計觀測修正對對流層延遲參數與 GPS 高程坐標的影響，他發現以水氣微波輻射計資料進而配合異質觀測修正方式，其結果大致與地表氣象觀測資料配合異質觀測修正方式雷同；其對靜態觀測的基線長度與 GPS 高程坐標而言，影響量值約都在公分等級；但就 GPS 高程坐標的多日平均標準差而言，則較地表氣象觀測資料為穩定。雖然參數估計方式的多日平均標準差，都較輻射計觀測修正方式為穩定，但如果以對流層延遲量而言，事實上水氣微波輻射計應當是最為可靠(在天氣好的情況下)，而參數估計所求得的延遲量卻不一定能得到真正的絕對量，所以良好的水氣微波輻射儀資料進而配合異質觀測修正方式，事實上是對 GPS 高程求解的精度有所提升。

三、基線資料蒐集與誤差修正

本研究共蒐集了三條基線的觀測資料，包括北港到墾丁(基線長度 187 km)、太麻里到墾丁(基線長度 77 km)和台南到墾丁(基線長度 130 km)的 GPS 與 WVR 資料；第一條基線北港到墾丁的觀測期間為 2010 年 9 月 17 日到 25 日，第二條基線太麻里到墾丁的觀測期間為 2010 年 11 月 4 日到 9 日，第三條基線台南到墾丁的觀測期間為 2010 年 11 月 13 日到 17 日。也由於台灣僅有兩台 WVR，因此將其中一台固定安置在觀測環境最佳的墾丁站，另一台則按照實驗之設計，依序搬移至北港、太麻里及台南。而在資料處理的機制上，我們總共採用了五種對流層延遲改正方式，分別為 Saastamoinen、Hopfield、Niell、Niell+MET(模式配合地面氣象資料)和 Niell+WVR(模式配合水氣微波輻射計觀測資料)。

首先，第一條基線北港到墾丁的計算成果如表 1 及圖 2 所示。其中可以發現 Neill 模式及 Neill 模式配合地面氣象資料來進行修正的效果最佳(3D 標準差為 10.5 mm)，使用 Saastamoinen 模式及 Hopfield 模式的結果次之(3D 標準差為 11.6 mm)，但 Neill+WVR 加上輻射計觀測資料修正的結果，標準差反而大幅增加(3D 標準差為 24.4 mm)，尤其在北向和高程方面有較大的變化，推測應為下列兩項原因所造成。第一個原因是觀測期間凡那比颱風來襲造成強降水，WVR 雖然有降低降雨影響的機構，但在大雨情況下效果不佳，因此造成亮溫大幅增加，且亮溫的擾動也大幅增加，會產生不合理的對流層濕延遲觀測量；第二個原因是凡那比颱風造成墾丁輻射計傾倒，使得輻射計觀測數據不合理。由於這兩個原因使得利用輻射計觀測資料來修正北港到墾丁的基線計算使得結果更糟。不過由於北港和墾丁兩站都有長期的輻射計觀測資料，我們將在下一章闡述選取適當的資料，再進行一次基線計算，來探討降雨對基線計算的影響。

表 1 固定墾丁計算北港坐標之三維方向標準差一覽表

Model	North (mm)	East (mm)	Height (mm)	3D (mm)
Saastamoinen	2.9	1.7	11.1	11.6
Hopfield	3.1	2.2	10.9	11.5
Niell	2.1	1.9	10.0	10.4
Niell+MET	2.1	1.9	10.1	10.5
Niell+WVR	9.0	2.3	22.5	24.4

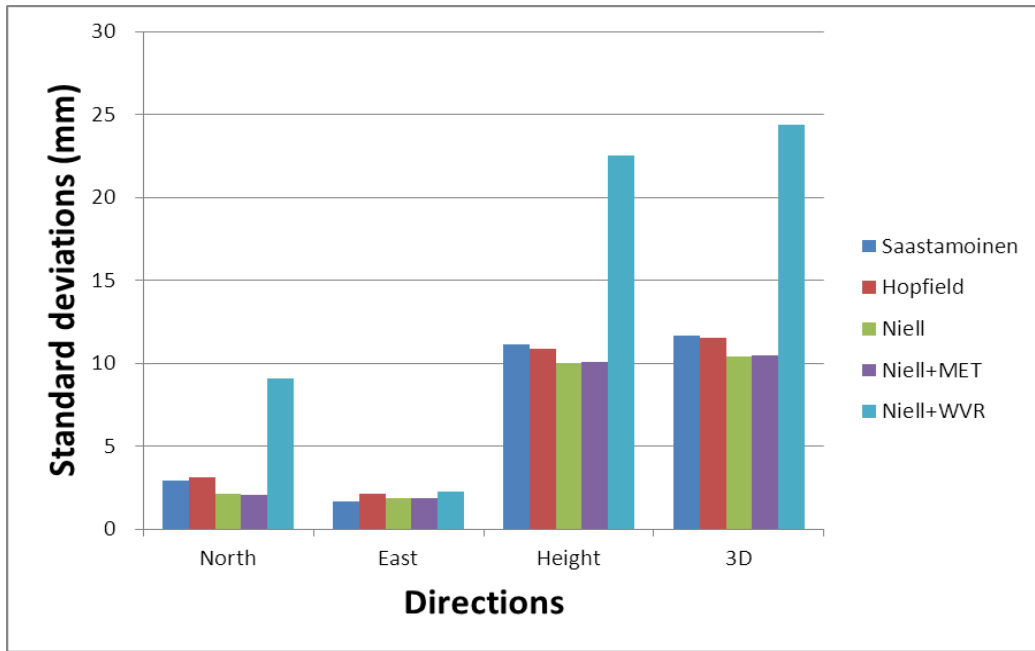


圖 2 固定墾丁計算北港坐標之三維方向標準差分布圖

其次來看第二條基線太麻里到墾丁的計算成果如表 2 及圖 3。結果顯示 Saastamoinen 模式及 Hopfield 模式在這裡的表現最佳 (3D 標準差為 4.7 mm)，Niell 模式及 Niell+MET 模式次之 (3D 標準差為 5.0 mm)，Niell+WVR 的結果雖然不像第一條基線有大錯誤，但是其定位標準差仍然最大 (3D 標準差為 5.8 mm)。主要原因可能為觀測期間剛好遇到梅姬颱風也有較大降雨，造成亮溫飆高影響濕遲延的觀測；此外太麻里附近的地形對空通視較差可能也會造成一些影響，未來做進一步測試時會將前兩項因素盡量消除，再探討修正對流層誤差的計算成果。

表 2 固定墾丁計算太麻里坐標之三維方向標準差一覽表

Model	North (mm)	East (mm)	Height (mm)	3D (mm)
Saastamoinen	3.1	1.0	3.0	4.4
Hopfield	2.6	1.4	3.7	4.7
Niell	3.2	1.2	3.6	5.0
Niell+MET	3.0	1.1	3.8	5.0
Niell+WVR	3.5	1.7	4.3	5.8

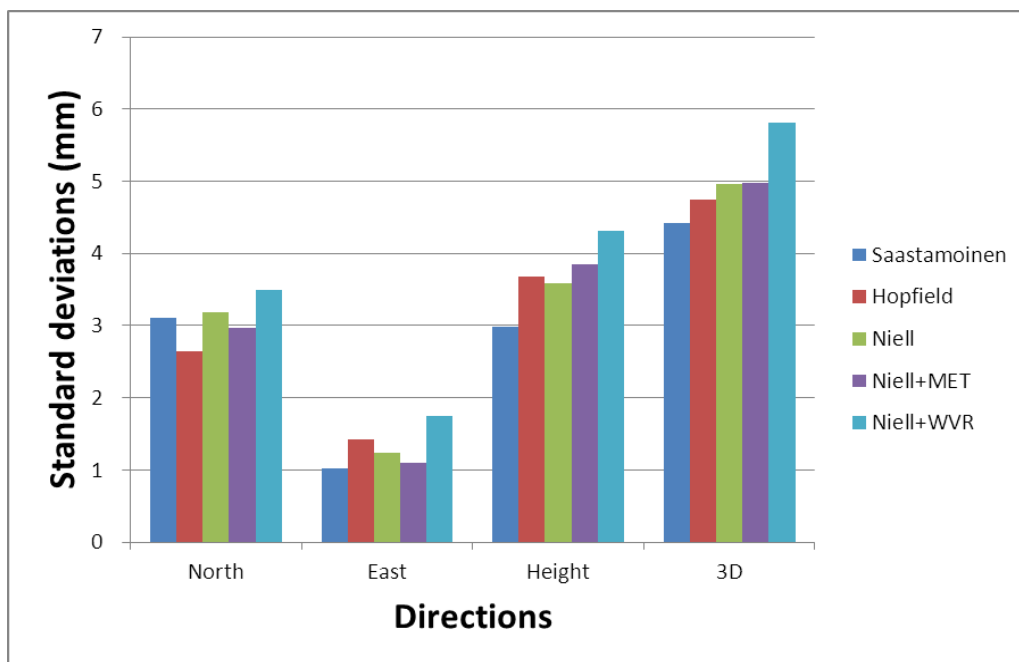


圖 3 固定墾丁計算太麻里坐標之三維方向標準差分布圖

最後來看第三條基線台南到墾丁的計算成果如表 3 及圖 4。以成果看來本研究採用的五種計算方式並無明顯的差異（3D 標準差皆介於 6.6~7.0 mm），但 Niell+WVR 雖在 N 方向比其他方法來的好，但平均來說標準誤差仍稍大，其原因可能還是觀測期間有降雨現象，造成亮溫飆高影響濕延遲的觀測所致。

表 3 固定墾丁計算台南坐標之三維方向標準差一覽表

Model	North (mm)	East (mm)	Height (mm)	3D (mm)
Saastamoinen	3.3	4.9	3.0	6.6
Hopfield	3.7	5.0	3.1	6.9
Niell	3.4	4.7	3.3	6.7
Niell+MET	3.5	4.8	3.5	6.9
Niell+WVR	3.1	5.2	3.5	7.0

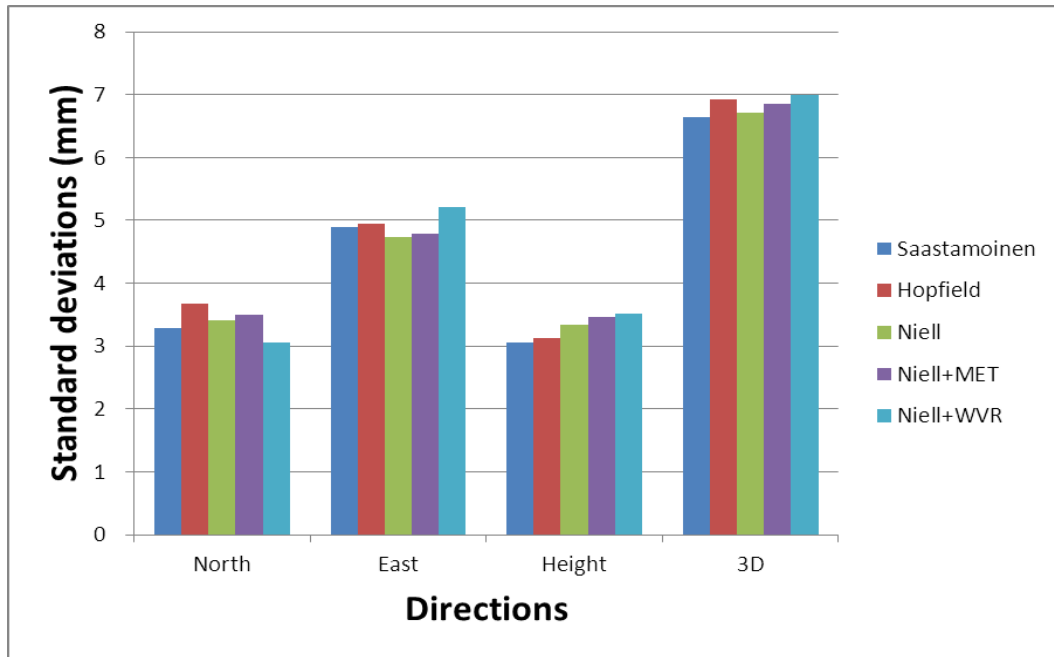


圖 4 固定墾丁計算台南坐標之三維方向標準差分布圖

由於此次的三次外業觀測資料恰巧遇到天候狀況不佳，因此造成解算精度反而降低，此一現象在文獻中也發現有同樣的問題(Wang *et al.*, 2008)；因此在下一章節當中，我們將擷取不同天候狀況的資料來進行分析，進一步探討降雨對 WVR 觀測數據的影響。

四、不同天候狀況的誤差改正探討

為了進一步分析降雨對 WVR 誤差修正的影響，我們從北港和墾丁輻射計的連續觀測資料中，篩選無降雨時期和降雨時期的資料來進行計算。無降雨時期為 2010 年 7 月 1 日到 11 日（其中 5 日、6 日無資料），降雨時期為 2010 年 8 月 6 日至 14 日，在資料處理上除了採用第三章的五種計算模式之外，第五種 Neill+WVR 還區分成 Neill+WVR1 及 Neill+WVR2，前者代表導入 Bernese 進行修正的 WVR 觀測資料為原始數據（校正前），後者則代表導入 Bernese 進行修正的 WVR 觀測資料為透過亮溫修正程式改正過後的數據（校正後），而未降雨時期的計算結果如表 4 及圖 5 所示。可以發現，Neill+WVR2 經過校正的 WVR 觀測資料，若應用在對流層誤差的修正上，有著最佳的表現（3D 標準差為 7.6 mm）；但若將原始觀測資料直接應用在 GPS 誤差改正上，其計算結果反而是最糟的（3D 標準差為 8.9 mm），因此未來在應用 WVR 來進行誤差修正時，必須小心使用該觀測資料方能獲得較佳的成果；而剩下的四種資料處理模式，其計算成果並無太大的差異。

表 4 未降雨時期固定墾丁計算北港坐標之三維方向標準差一覽表

Model	North (mm)	East (mm)	Height (mm)	3D (mm)
Saastamoinen	3.7	2.6	6.6	8.0
Hopfield	3.5	2.5	6.6	7.8
Niell	3.5	2.7	6.8	8.1
Niell+MET	3.5	2.5	6.7	7.9
Niell+WVR1	4.6	2.3	7.3	8.9
Niell+WVR2	4.2	2.3	6.0	7.6

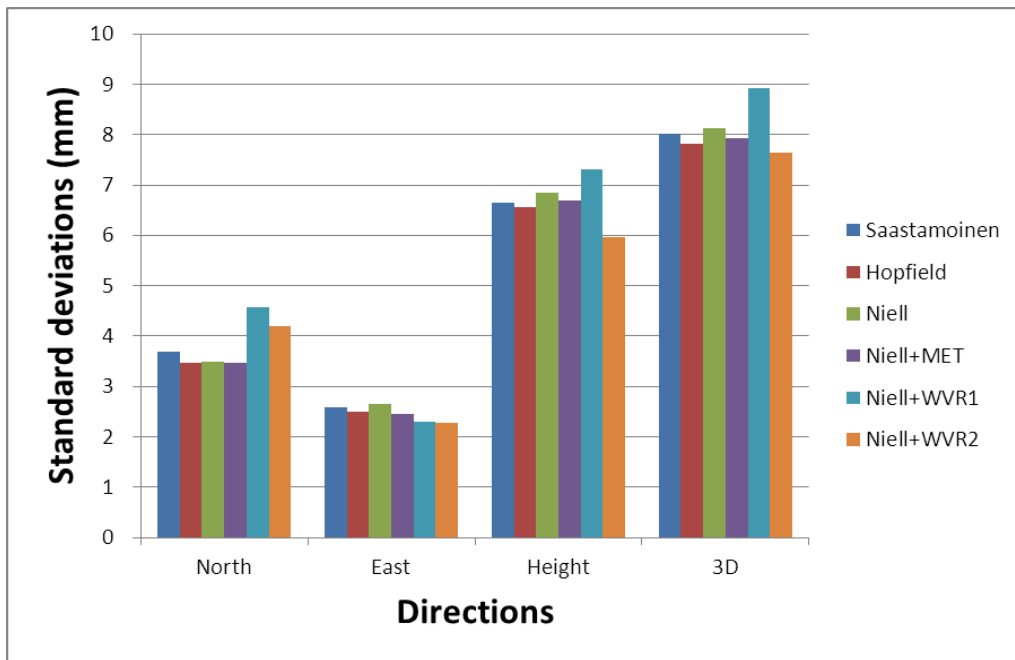


圖 5 未降雨時期固定墾丁計算北港坐標之三維方向標準差分布圖

再依相同的方法來進行資料處理，可得降雨時期的計算結果如表 5 及圖 6 所示。其中，表現最佳的為 Saastamoinen 模式（3D 標準差為 8.4 mm），其次為 Niell 與 Niell+Met（3D 標準差為 9.3 mm），接下來是 Hopfield 模式（3D 標準差為 9.8 mm），表現最差的為 Niell+WVR1（3D 標準差為 10.9 mm），此一結果與第三章類似。因為受到降雨的影響使得 WVR 觀測的濕延遲量有較大的誤差，若將該資料導入 GPS 計算來進行修正，反而會降低 GPS 定位之精度；特別要注意的是，即使該觀測資料透過亮溫修正程式來進行校正，再將校正後的 WVR 觀測資料導入 GPS 誤差改正，其定位精度也僅有微幅的提升（3D 標準差為 10.7 mm），仍然比不上傳統應用模式來進行改正的成果。因此，以目前台灣現有的儀器來說，利用 WVR 觀測資料來進行對流層誤差修正僅適用於天候較佳未降雨的時期，若當地發生降雨，還是採用傳統的模式修正可以獲得較佳的定位成果。

表 5 降雨時期固定墾丁計算北港坐標之三維方向標準差一覽表

Model	North (mm)	East (mm)	Height (mm)	3D (mm)
Saastamoinen	5.4	1.9	6.1	8.4
Hopfield	5.2	2.2	8.0	9.8
Niell	6.2	2.4	6.5	9.3
Niell+MET	6.1	2.4	6.5	9.2
Niell+WVR1	5.8	3.0	8.8	10.9
Niell+WVR2	6.3	3.0	8.1	10.7

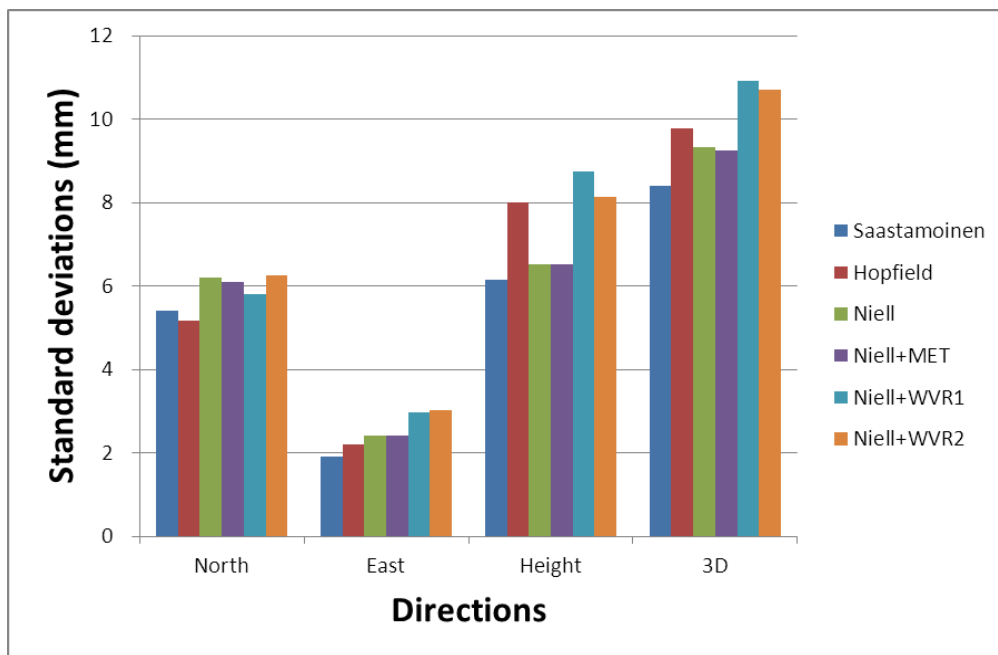


圖 6 降雨時期固定墾丁計算北港坐標之三維方向標準差分布圖

五、結論與建議

- (一) 對流層改正若採用傳統的模式 Saastamoinen、Hopfield、Niell，或者是利用模式配合地面氣象資料 (Neill+MET) 來進行修正，皆有相當穩定的表現且不受天候的影響。
- (二) 在計算中若使用模式配合水氣微波輻射計觀測資料 (Niell+WVR) 來進行誤差改正，在未降雨的時候只需先將 WVR 原始觀測資料透過亮溫修正程式進行校正，即可提升 5% 的定位精度；但若未將 WVR 資料進行校正，而直接導入 WVR 原始觀測資料來進行改正，反而會降低 GPS 基線解算的精度。在降雨的時候不論 WVR 資料是否經過校正，皆無法利用此一觀測資料來修正 GPS 對流層誤差。
- (三) 目前內政部所擁有的水氣微波輻射儀雖有防降雨遮罩，但結果顯示在大雨中的效果不佳。從觀測資料可看出，當雨水或雨滴無法及時從天線罩移除時，將會造成亮溫值的飆高，因此產生不合理的濕延遲量，使得基線計算的擾動增加，

未來應避免使用下雨時的 WVR 觀測資料。

(四)水氣微波輻射儀的觀測資料包含了天頂向及斜向的濕延遲量，而本研究目前只採用了天頂向的濕延遲量來進行修正，或許就是這個原因使得加入濕延遲改正後的定位準確度無法明顯提高；故建議未來的研究者可以嘗試修改程式，導入斜向的對流層濕延遲量，應可進一步提升在惡劣天氣下的濕延遲修正效能。

誌謝

本研究能夠順利完成，感謝國立中央大學太空與遙測研究中心劉說安教授、顏翔崑博士所提供之水氣微波輻射儀野外觀測資料，以及內政部國土測繪中心所提供之 e-GPS 基準站連續觀測資料。

參考文獻

- 內政部土地測量局，2006，《e-GPS 衛星基準站即時動態定位系統 VBS-RTK 定位測試成果報告》，內政部土地測量局。
- 王傳盛，2009，《對流層延遲效應與全球定位系統高程定位之研究》，國立中央大學太空科學研究所博士論文。
- 葉大綱、吳建廷、楊明遠、黃金城、韓治安，2011，利用七參數進行 TWD67、TWD97 與 e-GPS 定位坐標之轉換－以中壢地區為例，《地籍測量》，第 30 卷，第 1 期，頁 14-29。
- Alber, C., R. Ware, C. Rocken, and F. Solheim, 1997, GPS surveying with 1 mm precision using corrections for atmospheric slant path delay, *Geophysical Research Letters*, 24(15), pp.1859-1862.
- Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, 1992, GPS Meteorology - Remote-Sensing of Atmospheric Water-Vapor Using the Global Positioning System, *Journal of Geophysical Research*, 97(D14), pp.15787-15801.
- Bock, O. and E. Doerflinger, 2001, Atmospheric modeling in GPS data analysis for high accuracy positioning, *Physics and Chemistry of the Earth Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(6-8), pp.373-383.
- Dodson, A. H., P. J. Shardlow, L. C. M. Hubbard, G. Elgered, and P. O. J. Jarlemark, 1996, Wet tropospheric effects on precise relative GPS height determination, *Journal of Geodesy*, 70(4), pp.188-202.
- Emardson, T. R. and P. O. J. Jarlemark, 1999, Atmospheric modelling in GPS analysis and its effect on the estimated geodetic parameters, *Journal of Geodesy*, 73(6), pp.322-331.
- Hopfield, H. S., 1971, Tropospheric effect on electromagnetically measured range:

- prediction from surface weather data, *Radio Science*, 6(3), pp.357-367.
- Kim, D., R. B. Langley, J. Bond, and A. Chrzanowski, 2003, Local deformation monitoring using GPS in an open pit mine: Initial study, *GPS Solutions*, 7(3), pp.176-185.
- Kleijer, F., 2004, *Troposphere modeling and filtering for precise GPS leveling*, Ph.D dissertation, Delft University of Technology.
- Klobuchar, J. A. and J. M. Kunches, 2003, Comparative range delay and variability of the earth's troposphere and the ionosphere, *GPS Solutions*, 7(1), pp.55-58.
- Liou, Y. A. and C. Y. Huang, 2000, GPS observations of PW during the passage of a typhoon, *Earth, Planets and Space*, 52(10), pp.709-712.
- Liou, Y. A., Y. T. Teng, T. Van Hove, and J. C. Liljegren, 2001, Comparison of precipitable water observations in the near tropics by GPS, microwave radiometer, and radiosondes, *Journal of Applied Meteorology*, 40(1), pp.5-15.
- Mendes, V. B. and R. B. Langley, 1999, Tropospheric zenith delay prediction accuracy for high-precision GPS positioning and navigation, *Navigation*, 46(1), pp. 25-34.
- Niell, A., 1996, Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *Journal of Geophysical Research*, 101(B2), pp.3227-3246.
- Saastamoinen, J., 1973, Contributions to the theory of atmospheric refraction, *Bulletin Geodesique*, 107(1), pp.13-34.
- Santerre, R., 1991, Impact of GPS satellite sky distribution, *Manuscripta Geodaetica*, 16, pp.28-53.
- Wang, C. S., Y. A. Liou, and T. K. Yeh, 2008, Impact of surface meteorological measurements on GPS height determination, *Geophysical Research Letters*, 35, L23809, doi: 10.1029/2008GL035929.
- Weckwerth, T. M., V. Wulfmeyer, R. M. Wakimoto, R. M. Hardesty, J. W. Wilson, and R. M. Banta, 1999, NCAR–NOAA lower-tropospheric water vapor workshop, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(11), pp.2339-2357.
- Yeh, T. K., C. Hwang, J. F. Huang, B. F. Chao, and M. H. Chang, 2011, Vertical displacement due to ocean tidal loading around Taiwan based on GPS observations, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 22(4), pp.373-382.
- Yeh, T. K., B. F. Chao, C. S. Chen, C. H. Chen, and Z. Y. Lee, 2012, Performance improvement of network-based RTK-GPS positioning in Taiwan, *Survey Review*, 44(324), pp.3-8.