

應用水氣輻射天頂延遲觀測量於 GPS 相對定位之研究 Application of Water Vapor Radiometer Zenith Delay Measurements in GPS Relative Positioning

陳彥欽¹ 陳國華² 楊名³
Yan-di Chen Kwo-Hwa Chen Ming Yang

摘要

全球定位系統 (Global Positioning System, GPS) 訊號通過電中性介質大氣層時, 會受到對流層效應的影響造成訊號延遲誤差; 本研究探討利用水氣輻射天頂延遲觀測量作為修正對流層誤差的外部改正方法, 對於高精度 GPS 相對定位之效益; 實驗區為 2006 年 3 月 15 日到 2006 年 7 月 10 日共 118 天觀測資料, 其成果如下: (1) 利用水氣輻射儀驗證 GPS 技術所反演出的天頂延遲量, 其標準差可達 10-23 mm 等級。(2) 在陽明山到北港基線(約 218 km)計算中, 加入 WVR 觀測資料於基線解算, 可提升北港站坐標在高程方向及速度量估計的精度; 但所計算出的高程值及速度量將分別會有數個 mm 及數個 mm/year 的差異量存在。(3) 在網形計算中, 只利用兩台 WVR 儀器無法提供網形內其它各站天頂延遲修正量, 因此對於 GPS 網形解算成果並無太大助益; 但可看出水平梯度參數可提升網形解在平面方向上的定位精度。

關鍵詞: 全球定位系統、相對定位、水氣輻射儀、對流層

Abstract

As Global Positioning System (GPS) signal propagates in the neutral atmosphere, the troposphere refraction will cause the propagation path delay. This study focuses on the effect of the zenith total delay (ZTD) of troposphere derived from Water Vapor Radiometers (WVR) as the external corrections to correct troposphere delay for high precision GPS relative positioning. The GPS observations, meteorological data and WVR measurements covering 118 days from 15th

¹國立成功大學測量及空間資訊學系碩士

²國立臺北大學不動產與城鄉環境學系助理教授

³國立成功大學測量及空間資訊學系教授

March to 10th July 2006 were collected for this study. The result shows (1) A comparison of ZTD derived from GPS and WVR respectively shows an excellent agreement at 10-23 mm standard deviation. (2) The vertical positioning and velocity accuracies of the baseline of YMSM-PKGM (about 218 km) are improved by applying WVR data, and there are bias of height at several mm and velocity at several mm/yr. (3) The network solutions of Taiwan tracking stations are computed using WVR at two stations. Limited to the number of WVR instruments, which can only provide the zenith total delay corrections at two stations of the regional network in Taiwan, the accuracy is not improved significantly; however, we find out that using gradient parameters can improve the horizontal accuracy.

Keywords: Global Positioning System, relative positioning, Water Vapor Radiometers, troposphere

一、前言

台灣位於海陸交界之副熱帶氣候區，大氣中的水分子含量多且變化大，為了準確消除對流層延遲誤差，內政部引進了水氣輻射儀(Water Vapor Radiometer, WVR)，希望藉由直接的大氣觀測值，提供真實對流層延遲改正量，進而改善 GPS 相對定位精度。由於 WVR 儀器提供真實的水氣延遲量值，可以用來驗證 GPS 技術反演濕延遲量的精度，若能求得準確的大氣濕延遲量再乘上一轉換因子 Π (約 0.158-0.167)，則可將此延遲量轉化為可降水量(Precipitable Water, PW)，對於短期的天氣預報至長期的氣候變遷提供一個非常重要的指標(Bevis et al., 1994; Liou and Hwang, 2000)。

對流層誤差解決方法大致上可分為經驗氣象模式、參數估計法及外部改正三種方法。經驗氣象參數對流層模型，乾延遲模式在中緯度地區的精度約 2-3 mm、而濕延遲模式誤差可達 3-5 cm，因此對流層改正無法完全用模式化消除；而參數估計方法通常為最普遍的改正方式，其優點是不需要額外架設儀器獲取氣象參數，則可得不錯的精度；相對於氣象經驗模式與參數估計方法，利用水氣輻射儀器進行真實的異質性觀測，做為外部改正的先驗資訊，對於 GPS 相對定位之影響，也將是本文主要研究的重點 (Bock and Doerflinger, 2000)。故本研究之目的在於探討利用水氣輻射天頂延遲觀測量作為修正對流層誤差的外部改正方法，其對於高精度 GPS 相對定位之效益。

二、理論背景

2.1 對流層延遲效應

對流層(Troposphere)是地表上大約 10 公里以內的中性大氣層，對於頻率低於 30GHz 的電磁波而言為非色散性(Non-dispersive)介質，而 GPS 兩種載波的頻率都小於 30GHz，因此對流層效應對 GPS 觀測量之折射影響與頻率無關。對流層延遲量之

大小變化與溫度、濕度及壓力有關，另外接收儀所在之高度及地形也會影響其變化 (Seeber, 2003)。

由於 GPS 訊號在對流層的折射度，與訊號傳遞路徑上之空氣折射率有關，不同介質折射率會隨著行進路線上不同溫度與壓力而改變 (Bevis *et al.*, 1994)。且當大氣因時間、季節及氣候環境而改變時，空氣折射率也會隨之產生變化，一般折射率影響可用下列兩點來說明：

1. 速度延遲(Retarding)：由於對流層折射率大於真空折射率，電磁波經過大氣較真空慢，此為傳遞時間延遲，可視為因傳遞時間延遲而造成傳遞路徑被拉長之距離。
2. 幾何路徑延遲(Bending)：因大氣各高度折射率不同，當電磁波在其中傳遞時會產生彎曲而不以直線行進，使得訊號從衛星到接收儀間的傳播路徑變長。

對流層折射影響量可分為兩部分，一為由乾空氣引起的乾分量，另一為由濕空氣引起的濕分量，因此可將對流層延遲量，表示為由乾延遲與溼延遲的線性組合，可表示成下式：

$$D_{trop} = 10^{-6} \int_{Path} N_d ds + 10^{-6} \int_{Path} N_w ds \quad (1)$$

其中 D_{trop} :對流層延遲量

N :折射係數(為溫度、壓力及水氣分壓的函數)

s :訊號傳遞路徑

當傳遞路徑延著天頂方向時為直線傳遞，幾何路徑彎曲延遲也就跟著消失，故天頂方向延遲量可表示為：

$$D_{trop}^z = D_{dry}^z + D_{wet}^z \quad (2)$$

其中 D_{trop}^z :天頂對流層延遲(Zenith Total Delay)

D_{dry}^z :天頂乾延遲(Zenith Dry Delay)

D_{wet}^z :天頂溼延遲(Zenith Wet Delay)

假設衛星到接收儀其傳遞路徑(Slant Path)在任意方向所造成的延遲量，與其天頂方向的延遲量有關，因此可以利用一個映射函數(Mapping Function)，將任意方向的延遲量轉換成天頂延遲量來表示：

$$D_{trop}^z = D_{dry} \times m_d(\epsilon) + D_{wet} \times m_w(\epsilon) \quad (3)$$

其中 D_{dry} :乾延遲(Dry Delay)或流體靜力延遲(Hydrostatic Delay)

D_{wet} :溼延遲(Wet Delay)

$m_d(\varepsilon)$:乾延遲映射函數(Maping Function)

$m_w(\varepsilon)$:濕延遲映射函數(Maping Function)

ε :衛星仰角(Elevation Angle)

2.2 對流層模型

由於無法得知 GPS 訊號通過大氣時所經過的各介質折射係數，通常利用地表的氣象參數(溫度、溼度、壓力)將對流層模式化。乾延遲部份約佔總延遲量 90%，可以視為跟表面壓力與溫度有關的函數，已可將乾延遲量模式化優於 1%達到 mm 等級的精度；而溼延遲部份佔總延遲量 10%左右，此部份延遲量與水氣有關，水氣分壓會隨著空間與時間高度的變化，難以將其延遲量模式化，其估計精度約 10%~20%(Skone, 2001)，下面就目前常用的三種對流層模式進行說明。

2.2.1 Saastamoinen 對流層模式

科學家已發展出許多消除對流層誤差的對流層模式，而 Saastamoinen 模式則是其中一種最常用來計算對流層延遲的模式，它是根據理想氣體法則所發展出來的，表示如下(Bauersima, 1983):

$$D_{trop} = \frac{0.002277}{\cos z} \left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - B \tan^2 z \right] + \delta R \quad (4)$$

其中 p :地表壓力

T :地表絕對溫度

e :水氣分壓

z :天頂距

B 、 δR :對流層修正係數

將溫度、溼度、壓力代入此經驗模式，則可得一個先驗的對流層延遲修正量；對於乾延遲部份而言，只需要知道精確的大氣壓力代入 Saastamoinen 模式即可得到對流層乾延遲量，其精度可達 mm 等級(Janes et al., 1991)。

2.2.2 Modified Hopfiled 對流層模式

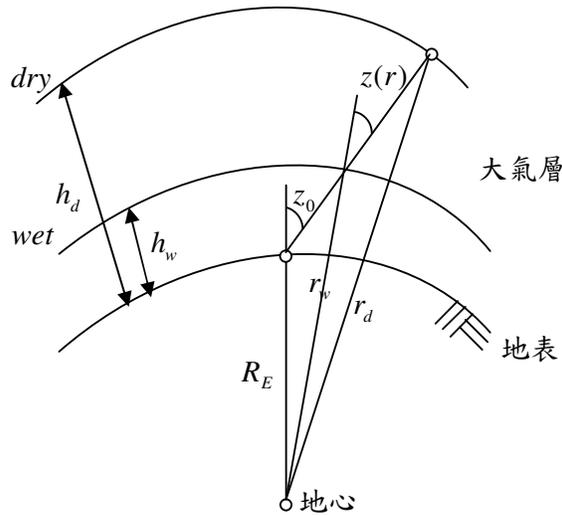


圖 1、對流層幾何路徑延遲(Hofmann-Wellenhof et al., 2001)

如圖 1，修正 Hopfiled 經驗模式是引進位置向量的長度取代高程 h 計算出對流層延遲量；假設地球半徑為 R_E ，定義 h_w 為相對於地表到溼部分大氣層的高度， H_d 則為地表到乾部份大氣層的高度，因此所對應的位置長度 $r_d = R_E + h_d$ 、 $r_w = R_E + h_w$ ，則對流層延遲量可寫成下式(Hofmann-Wellenhof et al., 2001):

$$D_{trop} = 10^{-6} \int_{Path} N_d \left[\frac{r_d - r}{r_d - R_E} \right]^4 ds + 10^{-6} \int_{Path} N_w \left[\frac{r_w - r}{r_w - R_E} \right]^4 ds \quad (5)$$

其中 N_d 、 N_w 為地表上乾、溼部分的折射率，可表示成下式:

$$N_d = c_1 \frac{e}{T} \quad (6)$$

$$N_w = c_2 \frac{e}{T} + c_3 \frac{e}{T^2} \quad (7)$$

其中 e :水氣分壓(mb)

T :絕對溫度(K)

c_1 、 c_2 、 c_3 :經驗常數

最後我們可將修正Hopfiled經驗模式可表示為:

$$D_i^{trop}(\varepsilon) = 10^{-6} N_{i,0} \left[\sum_{k=1}^9 \frac{\alpha_{k,i}}{k} r_i^k \right] \quad (8)$$

其中 i :用來表示乾部分或濕部份延遲

ε :為衛星仰角

$N_{i,0}$:地表的折射率

$$r_i = \sqrt{(R_E + h_i)^2 - (R_E \cos \varepsilon)^2} - R_E \sin \varepsilon$$

其他參數可定義為:

$$\begin{aligned} \alpha_{1,i} &= 1 & \alpha_{2,i} &= 4a_i \\ \alpha_{3,i} &= 6a_i^2 + 4b_i & \alpha_{4,i} &= 4a_i(a_i^2 + 3b_i) \\ \alpha_{5,i} &= a_i^4 + 12a_i^2b_i + 6b_i^2 & \alpha_{6,i} &= 4a_ib_i(a_i^2 + 3b_i) \\ \alpha_{7,i} &= b_i^2(6a_i^2 + 4b_i) & \alpha_{8,i} &= 4a_ib_i^3 \\ \alpha_{9,i} &= b_i^4 \end{aligned}$$

其中 $a_i = -\frac{\sin \varepsilon}{h_i}$; $b_i = -\frac{\cos^2 \varepsilon}{2h_iR_E}$

2.2.3 Niell 映射函數模式(Mapping Function)

Niell 映射函數由於不需要知道氣象參數，故其乾部分映射函數是依據緯度、橢球高及一年中所在天數(Day of Year, DOY)計算而得；而溼部分映射函數只需要知道該站的所在緯度即可求得，表示如下(Niell, 1996):

$$m_{dry}(\varepsilon) = \frac{\frac{1}{1 + \frac{a_{dry}}{1 + \frac{b_{dry}}{1 + c_{dry}}}}} {\sin \varepsilon + \frac{a_{dry}}{\sin \varepsilon + \frac{b_{dry}}{\sin \varepsilon + c_{dry}}}} + \left[\frac{1}{\sin \varepsilon} - \frac{\frac{1}{1 + \frac{a_{ht}}{1 + \frac{b_{ht}}{1 + c_{ht}}}}} {1}} {\sin \varepsilon + \frac{a_{ht}}{\sin \varepsilon + \frac{b_{ht}}{\sin \varepsilon + c_{ht}}}} \right] \times \frac{H}{100} \quad (9)$$

$$m_{wet}(\varepsilon) = \frac{\frac{1}{1 + \frac{a_{wet}}{1 + \frac{b_{wet}}{1 + c_{wet}}}}} {\sin \varepsilon + \frac{a_{wet}}{\sin \varepsilon + \frac{b_{wet}}{\sin \varepsilon + c_{wet}}}} \quad (10)$$

其中 ε 為衛星仰角

$$a_{ht} = 2.53 \times 10^{-5} \text{ km}$$

$$b_{ht} = 5.49 \times 10^{-3} \text{ km}$$

$$c_{ht} = 1.14 \times 10^{-3} \text{ km}$$

而 a_{dry} 、 b_{dry} 、 c_{dry} 、 a_{wet} 、 b_{wet} 、 c_{wet} 在各緯度的平均係數如下表1、表2所示:

表 1、Niell 乾映射函數平均係數值

Coefficient	Latitude(degree)				
	(dry)	15	30	45	60
a_{ave}	1.2769934E-03	1.2683230E-03	1.2465397E-03	1.2196049E-03	1.2045996E-03
b_{ave}	2.9153695E-03	2.9152299E-03	2.9288445E-03	2.9022565E-03	2.9024912E-03
c_{ave}	6.2610505E-02	6.2837393E-02	6.3721774E-02	6.3824265E-02	6.4258455E-02

表 2、Niell 溼映射函數平均係數值

Coefficient	Latitude(degree)				
	(wet)	15	30	45	60
a_{ave}	5.8021897E-04	5.6794847E-04	5.8118019E-04	5.9727542E-04	6.1641693E-04
b_{ave}	1.4275268E-03	1.5138625E-03	1.4572520E-03	1.5007428E-03	1.7599082E-03
c_{ave}	4.3472961E-02	4.6729510E-02	4.3908931E-02	4.4526982E-02	5.4736038E-02

2.3 GPS 對流層參數估計法

2.3.1 測站對流層參數

GPS 估計測站對流層參數時，通常先引入一個對流層先驗模式作為流層延遲修正量初始值 $\Delta\rho_{apr,k}$ ，此先驗模式修正量會隨著各測站所在位置以及時間而改變，可給予先驗對流層初始值一個先驗精度，配合對流層附加參數估計對流層殘餘誤差，再選擇適當的映射函數將其延遲量化算到天頂方向，各測站特定(Site-Specific)對流層參數可表示如下(Beutler, 2007):

$$\Delta\rho_k^i(t, z) = \Delta\rho_{apr,k}(z_k^i) + \Delta\rho_k(t)f(z_k^i) \quad (11)$$

其中 $\Delta\rho_{apr,k}(z_k^i)$:先驗對流層初始值，可以由經驗氣象模式或是水氣輻射天頂總延遲觀測量提供

$\Delta\rho_k(t)$:GPS對流層參數

$f(z_k^i)$:映射函數(Mapping Function)

因此可利用 GPS 對流層參數估計值，加上先驗對流層初始值即可推求得各站對流層天頂總延遲量(ZTD)。

2.3.2 水平梯度參數

一般的近似公式推導中，都是先建構在地球大氣結構屬於球殼層狀且介質是均勻分佈的假設下，相對於天頂向延遲量而言，非天頂向的微波訊號延遲量是具有對稱的特性存在，而且與其天頂距相關。事實上地球大氣的特性與上述理想狀況的假設仍有差距，因此在 1970 年代就有學者推導出解決的近似公式，而該項因子所造成的誤差被稱為大氣水平梯度 (Horizontal Tropospheric Gradients) 效應(Gardner, 1977；王

傳盛，2007)。

對流層天頂方向的延遲量一般定義為最小延遲量的方向(Z')，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(Z')與測站幾何天頂方向(Z)便不會一致，兩者間存在有一交會的角度 β 如圖 2。

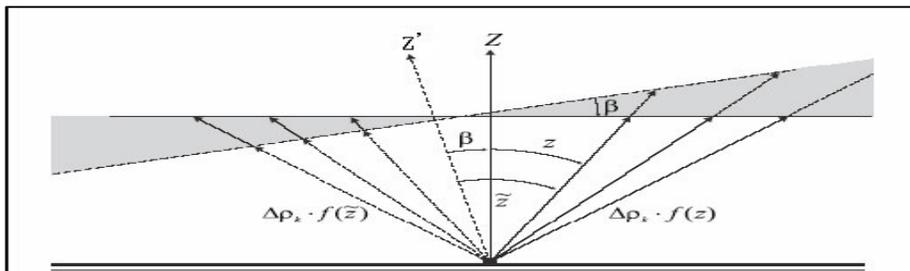


圖2、對流層天頂(Z')與測站幾何天頂(Z)方向示意圖(Meindl, 2004)

對任一 GPS 訊號而言該訊號與 Z' 方向所夾之角度 \tilde{z} 又為映射函數所使用之角度，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；因此通常以幾何天頂方向之角度 z 取代之，可將(11)式改寫為：

$$\Delta\rho_k^i(t, z) = \Delta\rho_{apr,k}(z_k^i) + \Delta\rho_k(t)f(z_k^i) \quad (12)$$

假設對流層天頂(Z')與幾何天頂(Z)所夾之角度 β 並不大，則可用下式表示角度：

$$\tilde{z}_k^i = z_k^i + \beta = z_k^i + x_k \cos(A_k^i) + y_k \sin(A_k^i) \quad (13)$$

其中 A_k^i : i 衛星到 k 接收儀之間訊號的方位角

x_k 、 y_k : 與測站相關的參數

利用(13)式可將跟時間相關的(12)式改寫成下式(Meindl, 2004):

$$\begin{aligned} \Delta\rho_k^i(t, A, z)f(\tilde{z}_k^i) &= \Delta\rho_k(t)f(z_k^i + x_k \cos(A_k^i) + y_k \sin(A_k^i)) \\ &= \Delta\rho_k(t)f(z_k^i) + \Delta\rho_k(t) \frac{\partial f}{\partial z} x_k \cos(A_k^i) + \Delta\rho_k(t) \frac{\partial f}{\partial z} y_k \sin(A_k^i) \end{aligned} \quad (14)$$

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

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

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

最後可將對流層誤差模式化表示如下(Beutler, 2007)：

$$\Delta\rho_k^i(t, A, z) = \underbrace{\Delta\rho_{apr,k}(z_k^i)}_{a \text{ priori model}} + \underbrace{\Delta^h \rho_k(t)f(z_k^i)}_{ZTD} + \underbrace{\Delta^n \rho_k(t) \frac{\partial f}{\partial z} \cos(A_k^i) + \Delta^e \rho_k(t) \frac{\partial f}{\partial z} \sin(A_k^i)}_{horizontal \text{ gradients}} \quad (15)$$

其中 $\Delta\rho_k^i$:GPS訊號由衛星i到接收儀k的對流層路徑延遲

t :觀測時間

z_k^i 、 A_k^i :由k測站觀測i衛星的天頂方向之角度及方位角

$\Delta\rho_{apr,k}(z_k^i)$:利用大氣經驗模式所計算出的延遲量初始值

$\Delta^h\rho_k(t)$:與時間有關的天頂路徑延遲參數

$\Delta^n\rho_k(t)$ 、 $\Delta^e\rho_k(t)$:南北向與東西向路徑延遲的水平梯度參數

$f(z_k^i)$:映射函數

2.4 水氣輻射儀

國內使用的儀器 WVP-1500 型是一種被動式水氣微波輻射儀，擁有介於 22GHz-30GHz 之間的 5 個觀測波段，可觀測至 10 公里高的水氣剖面；同時整套設備亦具有量測地表溫度、壓力、相對溼度的功能，此外還有 Azimuth Drive 元件可利用 GPS 衛星星曆追蹤衛星提供各方位角的量測，對每一顆可視衛星做掃描，平均十幾二十秒可記錄一筆觀測資料，量測大氣層之輻射亮溫，進而利用反演係數求得可降水量及液態水量，並產生經由大氣層所造成的路徑濕延遲量(Wet Delay)，其詳細規格如表 3，而本研究使用之資料蒐集間隔為 30 秒。利用大氣氣壓感測器所觀測的大氣壓力，代入 Saastamoinen 乾模式可求得準確的乾延遲量，再加上 WVR 儀器本身所觀測而得的濕延遲量，最後可得對流層天頂總延遲量，提供真實對流層延遲修正量，作為相對定位之外部改正方法(Saastamoinen, 1973；王傳盛，2000)。

表 3、WVP-1500 水氣輻射儀規格表(Radiometrics Corporation)

Sample Time(取樣時間)	10 sec
Accuracy(精度)	0.5 °C
Resolution(解析度)	0.25 °C
Surface Measurement Accuracy	
Temperature(溫度)	0.5 °C
Relative Humidity(相對溼度)	2%
Barometric Pressure(壓力)	0.3 mb
Operating Temperature(操作溫度)	-50 °C to +50 °C
Power(電源)	200 watts maximum
Voltage(電壓)	115 to 230V (50 to 440 Hz)
Dimensions(維度)	50×28×76 cm
Weight(重量)	32 kg
Angular Coverage(覆蓋角度)	All sky with optional azimuth scanner

水氣輻射儀具有雙頻微波輻射波段，其操作頻率為 23.8GHz 及 31.4GHz，可同步觀測大氣中的水氣含量，並決定路徑上的可降水量、液態水量及濕延遲量。對於較低的 23.8GHz 是位在弱水氣吸收頻附近，適用於總可降水量；而較高頻的 31.4GHz，

由於此微波波段中雲水的吸收係數會隨頻率增加而變大，可將其應用在雲水上的觀測。實際上 WVR 是量測大氣中的黑體亮溫，此亮溫與其吸收及散射現象有關，可藉由輻射傳送方程式轉換，微分形式的輻射傳送方程式可寫成為(劉說安，1999):

$$\frac{dB(r)}{d\tau(r)} + B(r) = J(r) \quad (16)$$

其中 B 是亮度 (W/m^2-sr)， r 是位置(距離)(m)， τ 光程(Neper, Np)， J 是源函數 (W/m^2-sr)。

從(16)式可以推得地面輻射計觀測到的大氣輻射(積分形式)為:

$$B_g = B(\infty)e^{-\tau(0,\infty)} + \int_0^{\infty} J(r)e^{-\tau(0,r)} \frac{d\tau}{dr} dr \quad (17)$$

其中

$$\tau(r, r') \equiv \int_r^{r'} K_e(r'') dr'' \quad (18)$$

K_e 為大氣的消散係數(Np/m)，該係數在 20-70GHz 微波波段主要受水氣、雲水及氧氣影響。根據 *Rayleigh-Jeans* 定律(17)式可以改寫為:

$$T_{bg} = T_{bc}e^{-\tau(0,\infty)} + \int_0^{\infty} K_a(r)T_a(r)e^{-\tau(0,r)} dr \quad (19)$$

$K_a(r)$ 為大氣體積吸收係數， $T_a(r)$ 是物理大氣絕對溫度， T_{bc} 是黑體溫度，最後跟頻率有關的光程 τ 可寫成:

$$\tau(0, \infty) = \int_0^{\infty} K_a(r) dr \quad (20)$$

利用大氣的平均輻射溫度，將所量測的輻射亮溫轉換成光程 τ (光程包含與頻率、溫度、壓力有關的氧氣、水汽壓及雲水):

$$\tau(0, \infty) = \ln \left[\frac{T_{MR}(f) - T_{bc}}{T_{MR}(f) - T_{bg}(f)} \right] \quad (21)$$

其中 T_{MR} 是大氣中的平均輻射溫度，可利用該站水氣分壓及液態水量，做線性迴歸求得反演係數，最後再藉由反演係數求得可降水量、液態水量及濕延遲量，一般對於使用 WVR 觀測溼延遲量的公式如下:

$$\Delta L_v = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i \quad (22)$$

其中， a_i 是迴歸的係數， X_i 為綜合水氣輻射儀觀測亮溫及其他可能的氣象變數(如地表壓力及溫度...等)。WVR 的頻率及反演大氣參數在溼延遲量的估計上若能夠最佳化，其產生的理論精度約 2 mm 等級；為了達到較高的精度，WVR 必須進行仔細的校正；通常使用 *Tippin-curve* 的方法進行水氣輻射儀的校正(England et al., 1992; Elgered, 1993)。

三、實驗資料及預處理

3.1 實驗資料

本研究實驗區為 2006 年 3 月 15 日到 7 月 10 日共 118 天資料，GPS 觀測資料採用國內內政部衛星追蹤站包含陽明山(YMSM)、墾丁 (KDNM)、鳳林(FLNM)、北港 (PKGM)、太麻里 (TMAM)、馬祖 (MZUM)、金門 (KMNM) 等 7 個站資料，而水氣輻射觀測資料則包含陽明山與北港兩站；分析這 118 天陽明山與北港兩站水氣輻射儀的濕延遲觀測量，可看出原始水氣觀測資料所反演的濕延遲量在某些天數觀測值會高達公尺等級，過度反演大氣中的水氣影響，不符合理想大氣所造成的路徑延遲量；且在 5 月 4 日(第 124 天)以後兩台水氣輻射儀觀測資料同時出現明顯的震盪情形，表示此段水氣輻射觀測資料受到外在濕度環境因素的影響造成反演精度不佳(Tregoning *et al.*, 1998)，如圖 3。

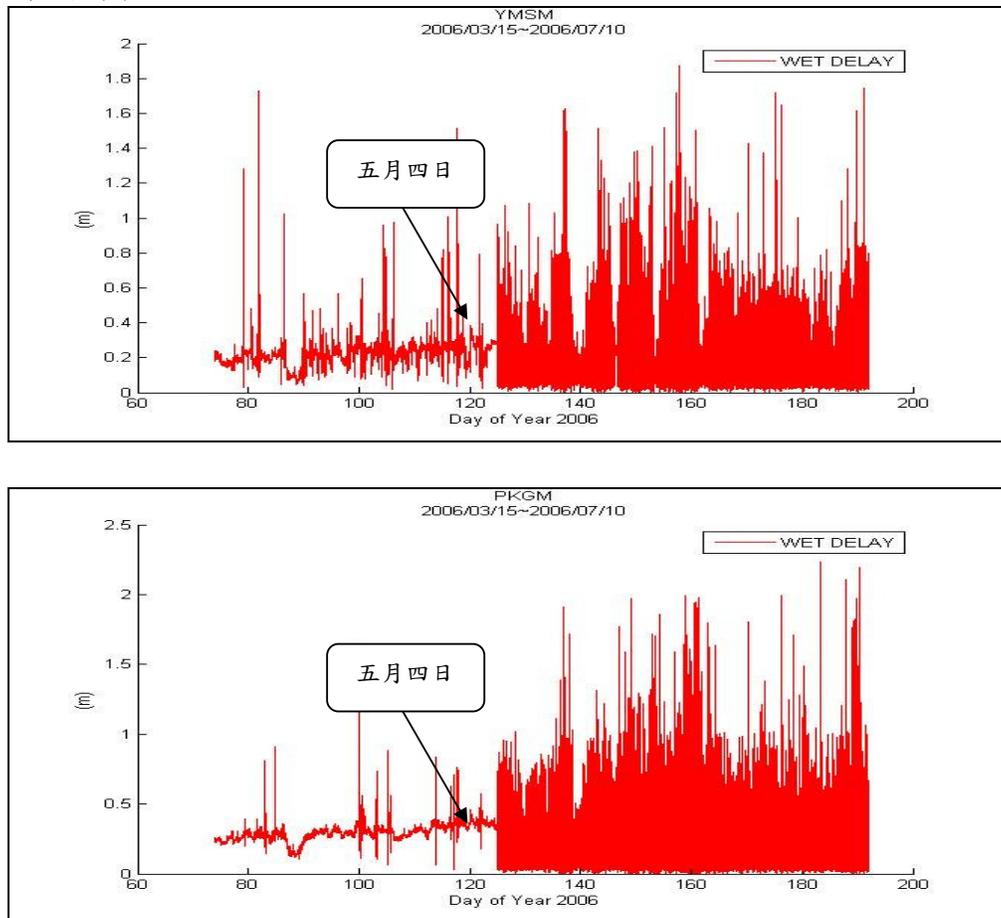


圖 3、陽明山與北港站水氣原始觀測資料濕延遲量分布圖

3.2 水氣資料預處理

由於水氣輻射觀測資料，容易受到外在環境因素影響，造成反演大氣延遲量精度不佳；因此在使用 WVR 觀測資料前，本研究先進行資料預處理的步驟，藉由預處理方法將不可靠的量測值剔除；為了之後 WVR 要與 GPS 資料做比較，並將水氣輻射觀測資料進行內插的動作，預處理方法如下(Pottiaux et al., 2002)，其成果如圖 4:

1. 剔錯:由於水氣輻射儀受到天候影響會造成觀測值過度反演，因此剔除每日 3 倍中誤差以外的觀測值，可將粗差消除。
2. 平滑化: 目前 WVR 儀器週期設定為 5 分鐘對所有衛星完成一個循環觀測，且每分鐘內平均約有 3 筆的觀測資料，因此利用平滑化罩窗大小為 15 的罩窗將觀測資料平滑化。
3. 內插:利用線性內插方法，將剔錯與平滑化後的水氣輻射資料線性內插為每小時一筆及每 30 秒一筆資料以利後續比較。

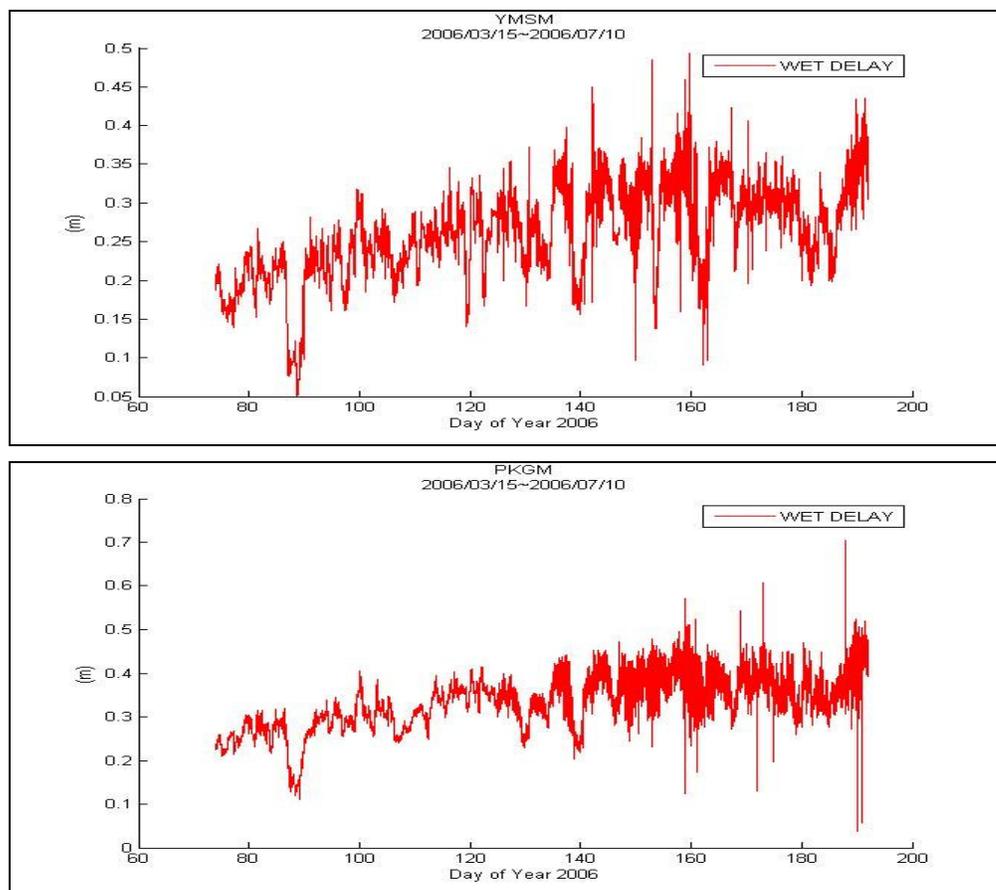


圖 4、陽明山與北港站水氣資料預處理後濕延遲量分布圖

四、實驗成果與分析

4.1 WVR 與 GPS 估計天頂延遲量比較

由於陽明山與北港兩站皆有 WVR 觀測值，在陽明山到北港站的基線計算中固定其中一站的 WVR 天頂總延遲量，再利用 GPS 參數估計另一站的天頂總延遲量，即可將 GPS 反演的天頂延遲量與該站 WVR 真實觀測量作比較，其比較方法與成果如下：

- (1) 固定陽明山站 WVR 天頂總延遲量，分別利用 GPS 參數(a)每小時及(b)每 30 秒估計北港天頂對流層總延遲量，再與北港站真實 WVR 天頂總延遲量內插為每小時及每 30 秒一筆觀測資料對應比較，如圖 5。

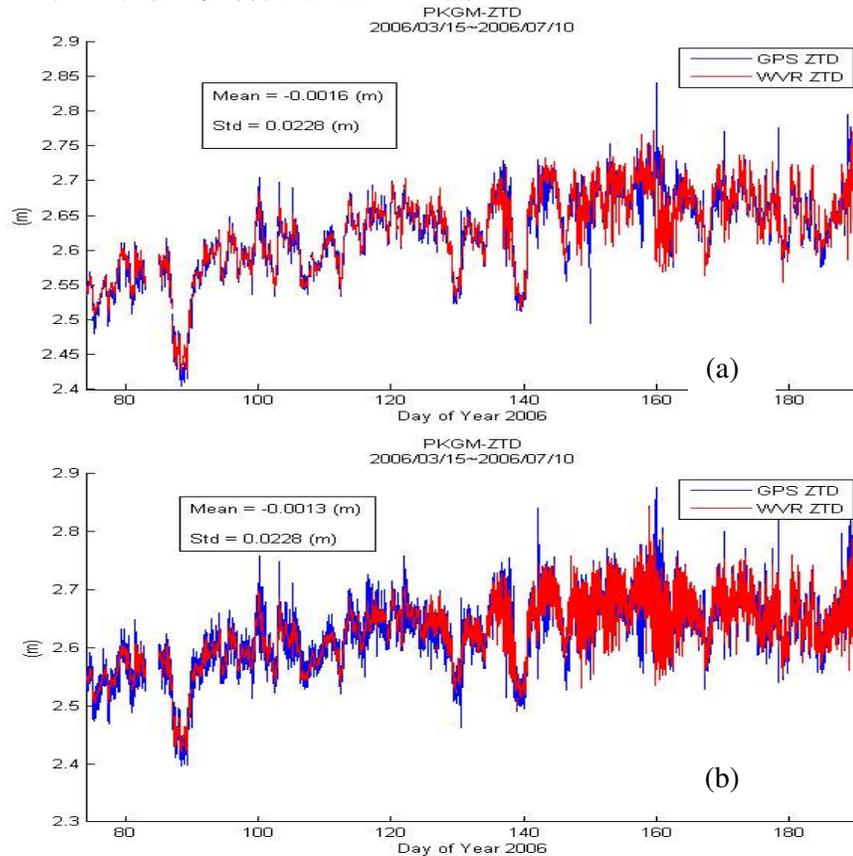


圖 5、北港站(a)每小時估計、(b)每 30 秒估計天頂總延遲量比較圖

- (2) 固定未知站北港 WVR 天頂總延遲量，分別利用 GPS 參數(a)每小時及(b)每 30 秒估計北港天頂對流層總延遲量，再與陽明山站真實 WVR 天頂總延遲量內插為每小時及每 30 秒一筆觀測資料對應比較，如圖 6。

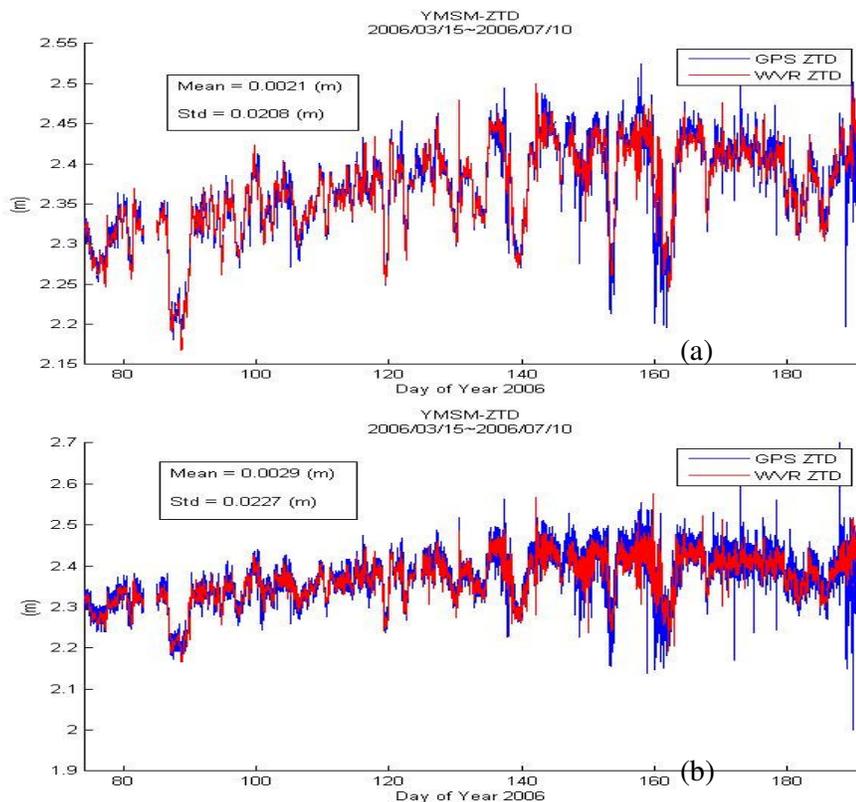


圖 6、陽明山站(a)每小時估計、(b)每 30 秒估計天頂總延遲量比較圖

由圖 5、圖 6 可知，GPS 與 WVR 兩種系統反演的天頂總延遲量 Mean 值差很小，兩系統之間的系統誤差(Bias)可在 3 mm 以內。且 GPS 不論是利用(a)每小時估計或是(b)每 30 秒估計對流層參數，兩種方法估計出來的天頂總延遲量(ZTD)與 WVR 比較皆可求得準確的天頂總延遲量，因此只要有精確的對流層先驗觀測值，對於 GPS 定位則可採用每 30 秒參數估計對流層方法，進行相對定位解算。

WVR 觀測資料在 5 月 4 日(第 124 天)之後資料較不穩定，將資料以 5 月 4 日拆解為兩區間來比較 GPS 與 WVR 之間的差異，整理於表 4。可看出水氣輻射儀在觀測環境良好的狀態下(3/15~5/4 之間)，標準差可達 10-12mm 左右；當水氣輻射儀反演精度不佳的時候(5/4~7/10 之間)，其標準差則約為 19-21 mm。

表 4、WVR 與 GPS 估計之天頂總延遲量比較成果

		2006/03/15~2006/05/04		2006/05/05~2006/07/10	
		Mean(mm)	Std(± mm)	Mean(mm)	Std(± mm)
(a) 每小時估計	YMSM	2.0	10.8	1.2	19.2
	PKGGM	-2.1	10.4	-0.7	21.4
(b) 每 30 秒估計	YMSM	2.8	12.3	1.7	21.2
	PKGGM	-1.7	12.3	-0.6	21.3

利用 GPS 技術反演天頂總延遲量(ZTD)已可達不錯的精度，只要將天頂總延遲量減掉準確的乾延遲量，即可求得的大氣溼延遲量(ZWD)，將溼延遲量再乘上一轉換因子 Π (約 0.158-0.167)，則可反推大氣中可降水量 PW 值(Liou and Huang, 2000)。

$$PW = \Pi \times ZWD \quad (23)$$

由表 4 可知，利用 GPS 技術反推大氣中水氣含量其精度是可行的，由於水氣輻射儀技術受限於價格影響、且反演精度容易受到外界環境的干擾，使其發展受到相當大的限制；相較之下 GPS 技術可廣泛的架設接收儀，覆蓋率將遠高於水氣輻射儀，因此可利用台灣區域的網形 GPS 追蹤站反演大氣層中的水氣含量，將其應用於氣候變遷及天氣預報上。

4.2 基線計算與成果分析

以陽明山站為已知站(將其坐標完全固定)，進行陽明山到北港站之基線解算，計算北港站每日解坐標，並估計其坐標變化速度量。

4.2.1 實驗方法

設計五種不同對流層改正方法，加入 WVR 天頂延遲觀測量計算北港站坐標，其五種方法概述如下：

- Case 1: 採用 Saastamoinen 對流層經驗模式，利用海平面標準氣象參數得該站延遲量初始值，再加上每小時估計一筆對流層改正參數吸收殘餘誤差，此方法為傳統 GPS 定位方法(未加入 WVR 資料)其計算成果視為對照組。
- Case 2: 加入陽明山、北港兩站 WVR 資料，作為此兩站對流層總延遲量初始值之先驗資訊(先驗精度 10 cm)並配合 GPS 每 30 秒參數估計對流層改正法。
- Case 3: 加入陽明山、北港兩站 WVR 資料，作為此兩站對流層總延遲之值給予先驗高精度並配合 GPS 每 30 秒參數估計改正(此法所估計的改正參數均為零，其定位成果與不估計對流層參數相同)。
- Case 4: 加入固定站陽明山的 WVR 資料，作為陽明山對流層總延遲量之值並配合 GPS 每 30 秒參數估計未知站北港天頂延遲量。
- Case 5: 加入未知站北港的 WVR 資料，作為北港對流層總延遲量之值並配合 GPS 參

數每 30 秒估計固定站陽明山天頂延遲量。

將上述五種方法的對流層改正方式整理於表 5，除了 Case1 傳統 GPS 定位方法利用每小時估計一筆對流層參數外；由於 GPS 觀測資料為每 30 秒接收，且有高取樣率的 WVR 觀測量作為對流層先驗資訊值，其他四種方法 Case2~Case5 則採用每三十秒估計對流層附加參數，進行基線相對定位之計算。

表 5、陽明山、北港兩站所採用的對流層改正方式

對流層改正方式	YMSM	PKGM
Case1	Saastamoinen+參數估計	Saastamoinen+參數估計
Case2	WVR +參數估計	WVR +參數估計
Case3	WVR (外部改正)	WVR (外部改正)
Case4	WVR (外部改正)	GPS 參數估計
Case5	GPS 參數估計	WVR (外部改正)

4.2.2 基線相對定位成果及分析

基線相對定位解算可求得北港站每日解的 N、E、h 坐標觀測量，由於實驗區資料天數只有 118 天，因此對於短暫的坐標變化可視為一平緩變化的線性函數，將每日解坐標利用最小二乘線性擬合法分別計算出 N、E、h 三個方向之坐標變化速度量，其方程式可寫為(Brockmann, 1997)：

$$V + l_t = l_{t_0} + \frac{d}{dt}(t - t_0) \quad (24)$$

其中 l_t 為每日解算出的衛星追蹤站 N、E、h 坐標(均為獨立觀測量)； t 是時間(t_0 為起始時間)； $\frac{d}{dt}$ 線性函數之斜率，即為坐標變化速度量； l_{t_0} 為參考時刻坐標。由(2)式可求得 N、E、h 三個方向坐標的每日解後驗單位權標準差，計算如下式：

$$\hat{\sigma}_{l_t} = \sqrt{\frac{\hat{V}^T \hat{V}}{n - u}} \quad (25)$$

其中 V : 改正數

n : 觀測量個數

u : 未知數個數

五種方法所計算之北港站每日解定位坐標及坐標變化速度量(dN、dE、dh)成果圖，整理如下：

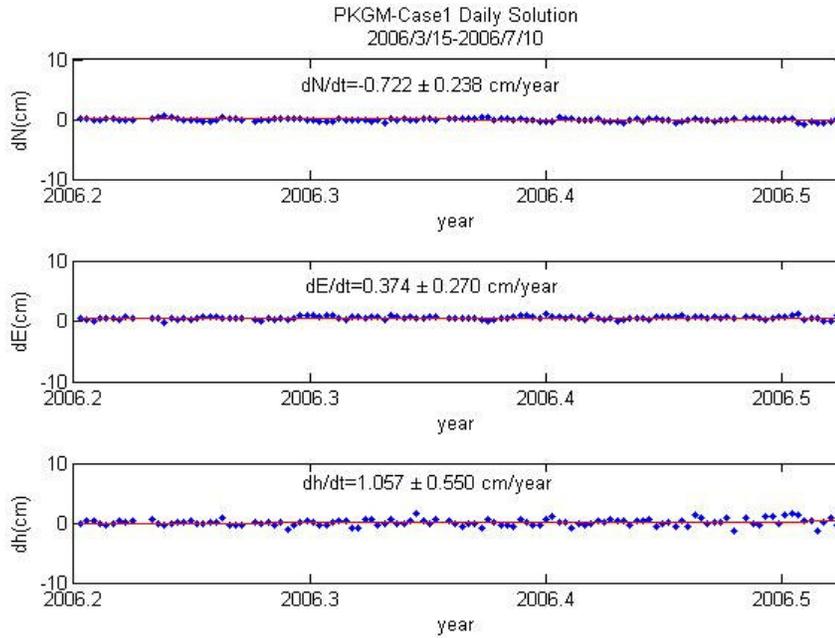


圖 7、北港站 Case1 每日坐標解時序圖

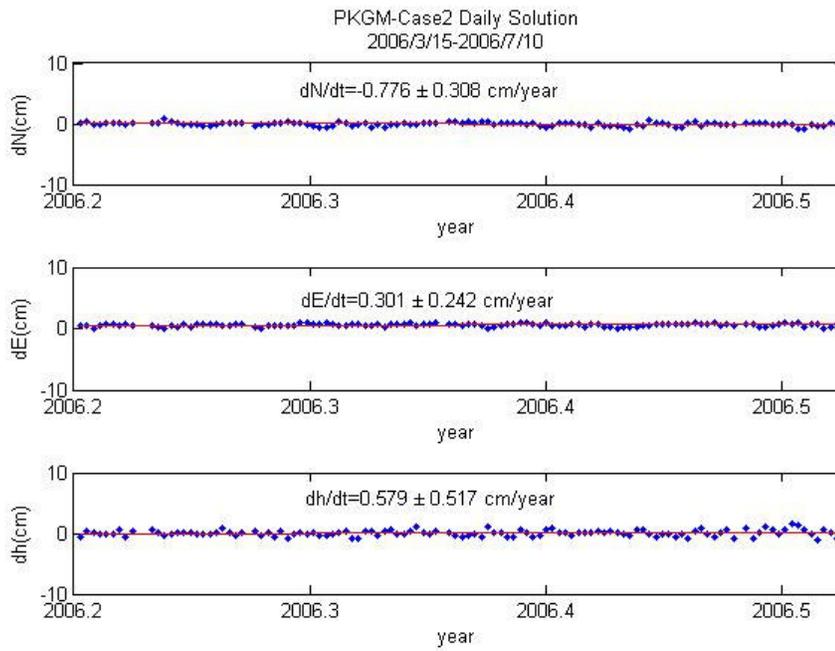


圖 8、北港站 Case2 每日坐標解時序圖

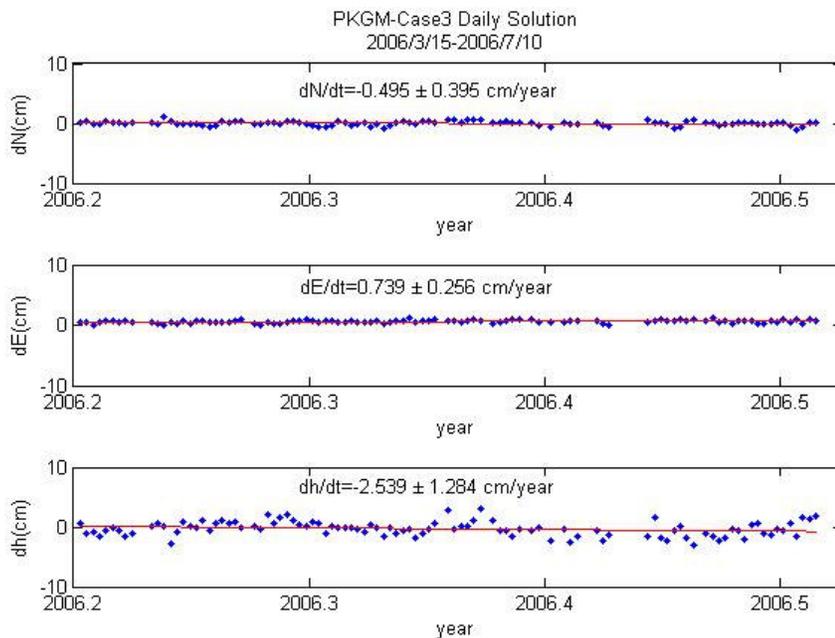


圖 9、北港站 Case3 每日坐標解時序圖

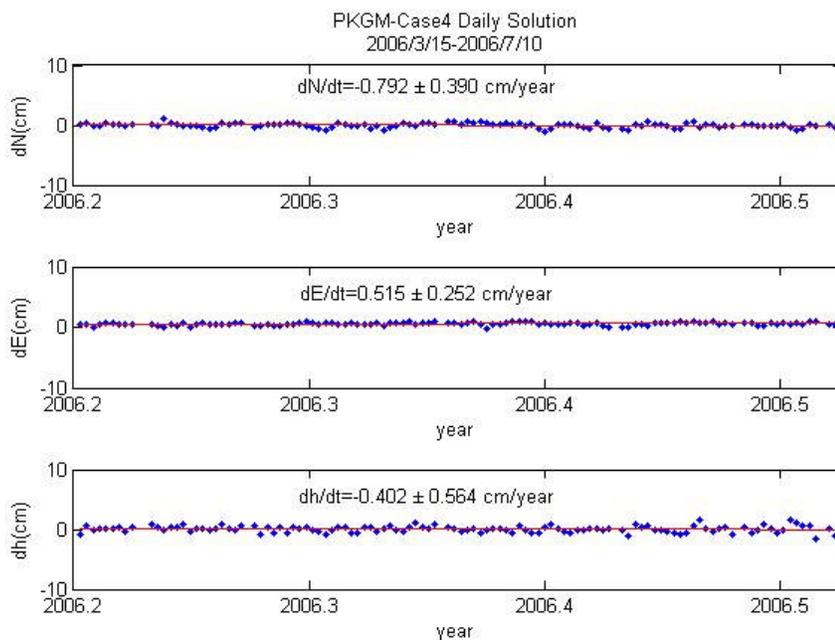


圖 10、北港站 Case4 每日坐標解時序圖

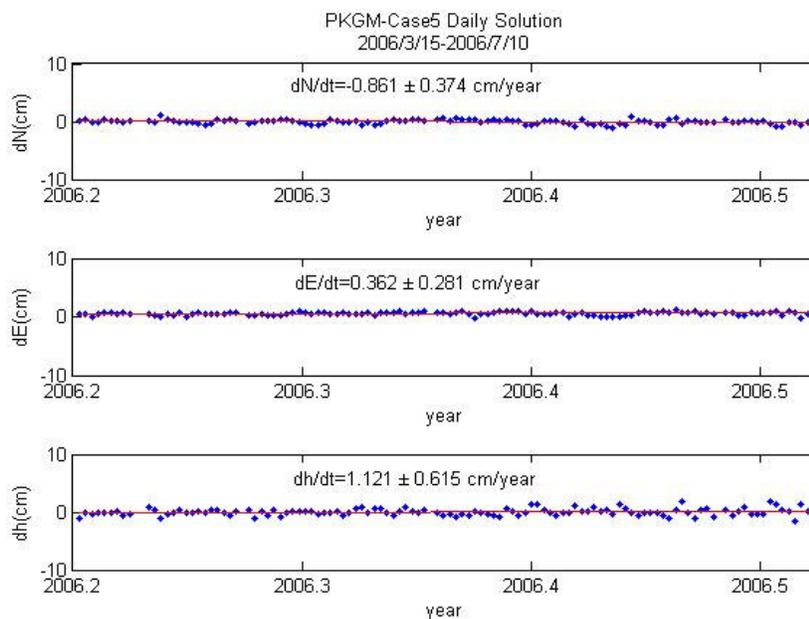


圖 11、北港站 Case5 每日坐標解時序圖

將基線定位成果整理於表 6、表 7。

表 6、北港站每日坐標觀測量後驗單位權標準差及坐標平均值較差

	每日坐標後驗單位權標準差(± mm)			坐標平均值較差(mm)		
	$\hat{\sigma}_N$	$\hat{\sigma}_E$	$\hat{\sigma}_h$	$\Delta \bar{N}$	$\Delta \bar{E}$	$\Delta \bar{h}$
Case1	2.3	2.6	5.4	---	---	---
Case2	3.0	2.4	5.1	-0.2	0.0	7.6
Case3	3.7	2.4	11.9	3.0	3.0	-6.3
Case4	3.8	2.4	5.5	2.4	2.1	5.0
Case5	3.7	2.8	6.1	2.5	2.3	4.9

表 7、北港站坐標變化速度量後驗精度及坐標變化速度量之較差

	坐標變化速度量精度(± mm/yr)			坐標變化速度量較差(mm/yr)		
	$\hat{\sigma}_{dN/dt}$	$\hat{\sigma}_{dE/dt}$	$\hat{\sigma}_{dh/dt}$	$\Delta dN/dt$	$\Delta dE/dt$	$\Delta dh/dt$
Case1	2.4	2.7	5.5	---	---	---
Case2	3.1	2.4	5.2	-0.5	-0.7	-4.8
Case3	4.0	2.6	12.8	2.3	3.7	-36.0
Case4	3.9	2.5	5.6	-0.7	1.4	-14.6
Case5	3.7	2.8	6.2	-1.4	-0.1	0.6

由表 6 可看出，Case1 利用對流層模式搭配參數估計的傳統 GPS 定位方法已可達相當高的定位精度。而利用 Case2 加入 WVR 天頂總延遲量並給予 10 cm 的先驗精度作為對流層延遲初始值，改正對流層延遲誤差，由於有較精確的 WVR 觀測初始值配合參數估計法，其定位成果與 Case1 成果比較，可以微幅提升高程方向上的定位精度，但所計算的高程坐標平均值較差存有 7.6 mm 的差異量(Bias)；並由表 7 得知，Case2 方法所估計的坐標變化速度量精度最佳外，在坐標變化速度量的估值上與 Case1 相比也有 -4.8 mm/year 的差異量存在。

當利用 Case3 方法完全相信 WVR 作為對流層延遲改正量時，會造成高程方向的坐標離散程度變大，使得高程方向的定位精度降低；由表 6 亦可看出 Case3 估計的坐標變化量精度最差外，所估計的速度量完全不同於 Case1；由於 WVR 觀測資料本身有誤差，由此可知加入 WVR 天頂總延遲觀測量直接作為對流層延遲量改正值，會使得定位精度降低，且流層延遲誤差主要是影響在高程方向的定位成果。

最後可由 Case4、Case5 的定位成果得知，基線兩端只利用其中一站的 WVR 觀測量作為對流層外部改正方法，其定位成果不管在平面 N、E 或是高程 h 方向上的定位精度，都沒有優於傳統 Case1 的 GPS 定位方法。因此加入 WVR 觀測資料於 GPS 基線解算時，除了基線兩站都要有精確的 WVR 觀測量作為對流層先驗資訊外，尚須搭配參數估計之方法，即可得到較準確的天頂延遲量改正值；利用 Case2 方法結合 WVR 外部改正及 GPS 參數估計的對流層改正方法可得到較好的坐標定位成果。

4.3 網形計算與成果分析

採用國內七個衛星追蹤站(陽明山、太麻里、北港、馬祖、金門、墾丁、鳳林)資料，固定陽明山站站坐標進行區域網平差解算各站每日解坐標。

4.3.1 實驗方法

由基線成果可知，加入 WVR 觀測資料作為修正對流層延遲的較佳方法，是利用 WVR 外部改正搭配 GPS 參數估計可得最佳解成果，因此在網形計算時只比較此方法與傳統 GPS 定位(不加入 WVR)方法的差異，並探討水平梯度參數對於網形定位的影響，其解算方法如下：

Case 1: 採用 Saastamoinen 對流層經驗模式作為修正對流層延遲初始值，並配合每小時一筆對流層改正參數加以吸收其殘餘量，此方法為傳統 GPS 定位方法(未加入 WVR 資料)其計算成果視為對照組。

Case 2: 加入陽明山、北港兩站 WVR 資料給予 10 cm 先驗精度，作為此兩站對流層總延遲量初始值，其它站則是利用 Saastamoinen 對流層經驗模式作為對流層延遲初始值，各站並配合每小時估計一筆對流層改正參數加以吸收其殘餘量。

以上兩種方法又都分為(a)估計水平梯度參數及(b)不估計水平梯度參數進行網形

解算，進而探討對流層水平梯度參數對於網形定位之效益(王傳盛，2007)。

4.3.2 網形相對定位成果及分析

將網形定位成果所計算之各站每日解坐標後驗單位權標準差，整理於表 8。

表 8、網形解每日坐標後驗單位權標準差定位成果

		(a)區域網估計水平梯度			(b)區域網不估計水平梯度		
		每日坐標後驗單位權標準差 (± mm)			每日坐標後驗單位權標準差 (± mm)		
對流層 改正	站名	$(\hat{\sigma}_0)_N$	$(\hat{\sigma}_0)_E$	$(\hat{\sigma}_0)_h$	$(\hat{\sigma}_0)_N$	$(\hat{\sigma}_0)_E$	$(\hat{\sigma}_0)_h$
Case 1	太麻里	2.8	3.1	7.9	3.0	4.1	7.9
	北港	2.2	1.8	5.5	3.7	2.8	5.9
	馬祖	3.3	2.0	6.1	3.7	3.1	7.3
	金門	2.1	2.5	6.5	2.7	3.4	6.6
	墾丁	2.8	2.4	8.4	3.2	2.7	7.4
	鳳林	2.8	2.8	9.5	3.1	3.8	10.1
Case 2	太麻里	3.1	3.1	8.2	3.0	4.1	7.7
	北港	2.3	1.8	6.0	3.7	2.9	6.3
	馬祖	3.4	2.0	6.3	3.7	3.1	7.0
	金門	2.2	2.3	6.4	2.8	3.4	6.6
	墾丁	2.8	2.2	7.5	3.2	2.7	7.6
	鳳林	2.8	2.7	9.6	3.2	3.8	10.2

由表 8 可看出，進行網形計算時由於內政部僅擁有兩台 WVR 水氣輻射儀，只能提供網形內其中兩站準確的先驗對流層改正值，因此加入兩站水氣輻射天頂延遲觀測量作為對流層外部改正方法與傳統 GPS(未加入 WVR)方法比較，其定位成果在各站所求得的坐標精度上並無明顯的優劣，Case1 與 Case2 的定位精度相當；由此可知只利用網形內其中幾站的 WVR 天頂延遲量作為對流層外部改正方法，對於網形相對定位並無太大效益。

比較(a)估計與(b)不估計水平梯度參數對於網形定位的影響，在 GPS 網形定位解算時加入水平梯度參數，各站在平面 N、E 方向的定位精度都優於未加入水平梯度參數的定位成果，平面坐標精度均有所提升，而高程方向上的精度則無太大差異。因此在網形解算時考慮水平梯度參數對於 GPS 網形定位是有幫助的，且主要影響為平面坐標上的定位精度。

五、結論與建議

比較加入 WVR 觀測資料與只利用傳統 GPS 資料解算之成果、及比較利用 GPS 技術所反演的天頂對流層延遲量與真實水氣輻射儀觀測量之差異，可以歸納以下幾點結論；最後建議如何利用水氣輻射觀測資料輔助 GPS 定位及未來對於反演大氣中水氣含量之技術與應用。

1. 利用 GPS 技術反演天頂總延遲量(ZTD)與真實水氣觀測資料比較，其標準差介於 10-23 mm 之間；其相對應的可降水量(PW)值約 1-3 mm，因此利用 GPS 反演大氣中水分子的含量與真實 WVR 觀測量比較，可達一定的吻合度。
2. 加入 WVR 水氣輻射觀測量於 GPS 基線解算時，利用 WVR 外部改正搭配參數估計的方法，確可微幅提升高程坐標精度及坐標變化速度量的估計精度。但所計算之平均高程值及坐標變化速度量與傳統 GPS 定位成果可能存有數個 mm 及數個 mm/yr 的差異量。
3. 網形定位時，由於台灣僅有兩台水氣輻射儀，導入兩站 WVR 觀測量進行網形計算，與傳統 GPS 定位成果比較，兩者方法的定位精度並無太大差異；而納入水平梯度參數，可以提升 GPS 網形解在平面方向上的定位精度，因此網形解算時應考慮對流層水平梯度參數之影響。
4. 受限於價格因素，全台灣僅擁有兩台水氣輻射儀無法普及，且目前在有颱風及暴風雨的天氣狀況下，水氣輻射儀處於不運作的狀態，造成其空間覆蓋率及實用性大大降低；然而 GPS 接收站可廣泛佈設於全台，儀器接收訊號較不受天候狀況之影響，且 GPS 反演天頂遲量的技術經由 WVR 驗證比較也可達一定的精度。因此未來可利用 GPS 網形反推台灣上空大氣層水氣含量，進而應用於氣象學上，對於短期的天氣預報至長期的氣候變遷提供一個重要的參考指標。

綜合本研究之分析成果，當 GPS 衛星定位時加入外部之 WVR 資料，可提昇其定位精度，並使得定位解算過程趨於穩定，有助於地籍測量之基本控制點、圖根點及界址點精確定位應用。

參考文獻

- 王傳盛，2000，應用 WVR 及探空氣球資料於高精度 GPS 高程之研究，國立交通大學土木研究所碩士論文，新竹。
- 王傳盛，2007，大氣延遲量水平梯度影響 GPS 定位精度之研究，第二十六屆測量學術及應用研討會論文集，第 337-348 頁。
- 劉說安、楊名，1999，GPS 估計可降水量:WVR 約束法，大氣科學，第 27 期第 2 卷，131-140。
- Bauersima, I., 1983, NAVSTAR/Global Position System(GPS) II, Radiointerferometrische Satellitenbeobachtungen., Mitteilungen der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald, Bern, Vol. 10.
- Beutler, G., Bock, H., Dach, R., Fridez, P., Gäde, A., Hugentobler, U., Jäggi, A., Meindl, M., Mervart, L., Prange, L., Schaer, S., Springer, T., Urschl, C., and Walser, P., 2007, Bernese GPS Software Version 5.0, Astronomical Institute, University of Bern.
- Bevis, M., Businger, S., Chiswell, S., Herring, T. A., Anthes, R. A., Rocken, C., and Ware, R. H., 1994, GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water, Journal

- Applied Meteorology, Vol. 33, No. 3, pp. 379-386.
- Bock, O., and Doerflinger, E., 2000, Atmospheric Processing Methods for High Accuracy Positioning with the Global Positioning System, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A, Vol. 26, No. 6-8, pp. 373-383.
- Brockmann, E., 1997, Combination of Solutions for Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System (GPS), Ph. D. Dissertation, Astronomical Institute, University of Berne, Berne, Switzerland.
- Elgered, G., 1993, Tropospheric Radio Path Delay from Ground-based Microwave Radiometry, Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry, Ed. M. Jansse, Wiley, New York.
- England, M., Ferrare, R., Melfi, S. H., Whiteman, D., and Clark, T., 1992, Atmospheric Water Vapor Measurements: Comparison of Microwave Radiometry and Lidar, Journal of Geophysical Research, Vol. 97, No. D1, pp. 899-916.
- Gardner, C. S., 1997, Correction of Laser Tracking Data for the Effects of Horizontal Refractivity Gradients, Applied Optics, Vol. 16, No. 9, pp. 2427-2432.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Collins, J., 2001, Global Positioning System: Theory and Practice, Springer-Verlag, New York.
- Janes, H.W., Langley, R.B., and Newby, S.P., 1991, Analysis of Tropospheric Delay Prediction Models: Comparisons with Ray-tracing and Implications for GPS Relative Positioning, Bulletin Geodesique, Vol. 65, No. 3, pp.151-161.
- Liou, Y. A., and Huang C. Y., 2000, GPS Observation of PW During the Passage of a Typhoon, Earth Planets and Space, Vol.52, No.10, pp.709-712.
- Meindl, M., Schaer, S., Hugentobler, U., and Beutler, G., 2004, Tropospheric Gradient Estimation at CODE: Results from Global Solutions, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 82, No. 1B, pp. 331-338.
- Niell, A. E., 1996, Global Mapping Functions for the Atmospheric Delay at Radio Wavelengths, Journal of Geophysical Research, Vol. 111, No. B2, pp. 3227-3246.
- Pottiaux, E., and Warnant, R., 2002, First Comparisons of Precipitable Water Vapor Estimation Using GPS and Water Vapor Radiometers at the Royal Observatory of Belgium, GPS Solution, Vol. 6, pp. 11-17.
- Saastamoinen, J., 1973. Contributions to the Theory of Atmospheric Refraction, Bulletin Geodesique, No. 107, pp. 13-34.
- Seeber, G., 2003, Satellite Geodesy 2nd Edition: Foundations, Walter de Gruyter, New York.
- Skone, S., 2001, Atmospheric effects on satellite navigation system, ENGO 633 Course Lecture Notes, University of Calgary, Calgary, Canada.
- Tregoning, P., Boers, R., O'Brien, D.M., and Hendy, M., 1998, Accuracy of Absolute Precipitable Water Vapor Estimates from GPS Observations, Journal of Geophysical Research, Vol. 103, No. D22, pp. 28701-28710.