

# 導入氣象觀測資料於 GPS 網型定位高程精度之研究

學生：楊恩銘

指導教授：史天元

陳春盛

國立交通大學土木工程學系

## 摘要

GPS 信號由衛星至地表經過大氣層導致信號的折射及延遲，在對流層當中 GPS 電磁波之傳遞速率，由於 L1 及 L2 兩種頻率的信號之折射量相同，所以 GPS 觀測時，無法利用雙頻觀測消除折射量，也因此，估計對流層延遲量是否精確，成為了影響 GPS 高程定位精度的最大因素之一。

處理對流層延遲量的方法，包含氣象數學經驗模式、對流層參數估計、外部觀測資料改正。在靜態網型定位，通常會以氣象數學經驗模式配合對流層參數估計法來處理對流層延遲量。內政部於雲林縣北港站設有一台水氣微波輻射儀，可觀測此區域對流層延遲絕對量，配合對流層參數估計法可精準預估北港站附近短基線各站的延遲相對值。如此可結合外部改正配合參數估計，探討在台灣濁水溪沖積扇地層下陷區域，對靜態網型定位之坐標趨勢影響。

本研究處理之 GPS 數據，其觀測期間為 2007 年 11 月 2 日至 2008 年 12 月 31 日，共 426 天。成果顯示，加入水氣輻射儀資料後，在地層持續下陷情況較明顯的 KTES 站及 TKJS 站，高程方向標準差由 2.088 公分及 2.675 公分降低至 1.092 公分及 1.321 公分。

# **Improving height precision of GPS network with meteorology observation**

**Student: En-Ming Yang**

**Advisor: Tian-Yuan Shih  
Chun-Shung Chen**

**Department of Civil Engineering  
National Chiao Tung University**

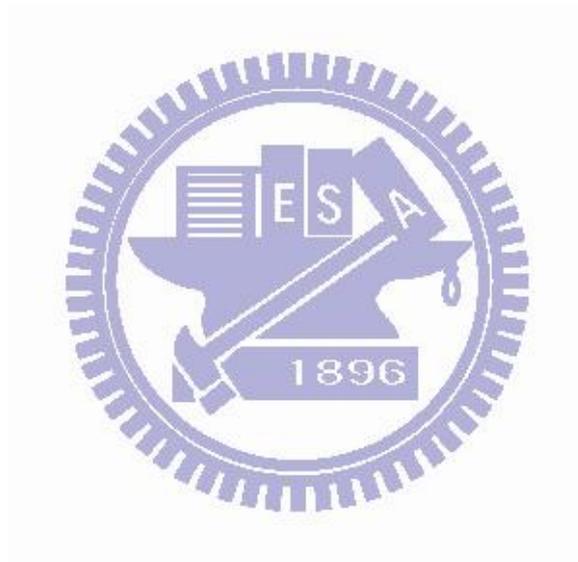
## **Abstract**

GPS signals are transmitted from satellite to earth through the atmosphere, causing refraction and delay. The tropospheric layer, which belongs to neutral atmosphere, the transmission speed of electromagnetic wave changes barely with signal frequency. For this reason, the troposphere bias cannot be eliminated with dual- frequency of carrier phase observation. Also, the troposphere bias becomes one of the most significant factors which influence the accuracy of GPS height positioning.

To reduce the troposphere bias, the strategy, meteorological experience models, parameter estimation, and external correcting is frequently used. For the static network computation, empirical meteorological models are usually combined with parameter estimation. On the other hand, the direct meteorological observations may be used for improving the positioning accuracy. This scheme is referred as correction with external observation. The Ministry of Interior has installed one WVR (Water Vapor Radiometer) at PeiKang GPS Station, which can observe the absolute troposphere bias, and predict precisely the relative troposphere bias of each short baseline station nearby PeiKang when using parameter estimation collaboratively.

This study investigates the potential of correction with external meteorological observations. From observing the time series of coordinates in a static network,

experiments are conducted. This GPS network was established in Choshui River alluvial fan of Taiwan for subsidence monitoring. The data set includes 426 days GPS daily observation from 2007/11/2 to 2008/12/31. The results show that the standard deviation of vertical direction are from 2.088cm to 1.092cm at KTES station and from 2.675cm to 1.321cm at TKJS station with WVR observation.



## 誌謝

首先感謝內政部同意本論文使用水氣微波輻射儀資料，感謝工業技術研究院能源環境資源所提供 GPS 觀測及地層下陷監測井資料。

交大的兩年如夢似幻，不僅僅是幸運二字可表達我心中的感觸，測量組的每一位，在我向前摸索的時刻適時的出現。初踏入這陌生的領域時，有學長姐們的照顧，有同學們的陪伴，然後時間漸漸的流經我的身旁。

從陳春盛老師的帶領踏入測量的領域，開始學習測量人思考事情的角度；黃金維老師在我心目中形象，刻畫成一步一步的堅持與熱情；以及不管課業上還是生活上，分享許多處事哲理的史天元老師。

最 man 的達哥、建廷學長給予許多研究路上的建議，也受到小胖、俊宜、歷韋、小光非常多照顧。正所謂北投毛毛南投建成，和金門亨利同一屋簷住了一年，新竹逸如則是住在家裡不能一起當室友，但測量九六級金堅的友情或許也值得傳頌在工二館，而悶悶就像是個圓心使我們相互環繞在一起。NATT 努力學中文使我可以輕鬆與他聊天，貓哥和高豫祺學長穩健的風範，和無時無刻炒熱氣氛的阿北、啟訓，還有漂亮的紫猗學姐，帥氣的亦證。

最重要的是，在論文寫作過程中，非常感謝大力幫助我的洪偉嘉學長和王傳盛學長，以及口試中給予許多建議的郭隆晨老師和陳國華老師，以及特地挪出時間的張嘉強老師，還有楊名老師寶貴的意見。論文的寫作過程中學習到的是研究思考與實作；意外的收穫是不同的角度、不同的角色、不同的觀點，相同的事。

然後在今天，衷心謝謝大家，很高興認識你們。

# 目錄

一、 緒論 .....	1
1-1 前言 .....	1
1-2 研究動機目的 .....	2
1-3 論文研究方法 .....	3
1-4 論文架構 .....	5
二、 GPS 訊號對流層延遲原理 .....	6
2-1 GPS 相對定位及差分原理 .....	6
2-2 對流層延遲原理 .....	8
2-3 對流層延遲絕對量與相對量之誤差 .....	11
2-4 對流層數學經驗模式 SAASTAMOINEN .....	12
2-5 對流層參數估計 .....	14
三、 氣象觀測及試驗區地層下陷 .....	16
3-1 氣象觀測儀器介紹 .....	16
3-1-1 Paroscientific MET-3A Meteorological Measurement System .....	16
3-1-2 Radiometrics WVR-1500 .....	18
3-2 研究區域簡介 .....	20
3-3 地層下陷監測方法 .....	24
3-3-1 GPS 高程測量 .....	25
3-3-2 地層下陷監測井 .....	26
四、 實驗方法及成果分析 .....	28
4-1 BERNESE 5.0 計算方法 .....	28
4-2 應用 ZWD 實測值於參數估計 .....	29
4-3 加入氣象觀測資料分析 .....	33
4-3-1 三維坐標成果 .....	35
4-3-2 基線成果 .....	37
4-4 地層下陷影響及水平位移變化分析 .....	39
五、 結論與建議 .....	44
參考文獻 .....	46
附錄一 .....	49
附錄二 .....	50
附錄三 .....	51

附錄四 .....54  
附錄五 .....56



## 圖目錄

圖 1-1、研究流程圖 .....	4
圖 2-1、GPS 衛星相對定位示意 .....	6
圖 2-2、GPS 訊號通過大氣示意 .....	8
圖 2-3、映射函數 (MAPPING FUNCTION) 示意 .....	11
圖 2-4、對流層頂平面傾斜與地表夾角 .....	15
圖 3-1、PAROSCIENTIFIC MET-3A 外型 .....	18
圖 3-2、RINEX-M 氣象觀測檔例 .....	18
圖 3-3、WVR-1500 外型 .....	19
圖 3-4、水氣微波輻射儀 MET TYPE5 檔案例，包含 ZWD 及溫度、濕度、壓力 .....	20
圖 3-5、濁水溪沖積扇相關位置 .....	21
圖 3-6、GPS 監測濁水溪沖積扇下陷使用基線網 .....	22
圖 3-7、各測站相關位置及基線組成狀態 .....	23
圖 4-1、BERNESE 5.0 軟體解算衛星資料流程 .....	29
圖 4-2、應用實測 ZWD 於參數估計實驗流程 .....	31
圖 4-3、2007 年 PKGM 站對流層天頂向總延遲量(DOY326-328) .....	31
圖 4-4、ZWD 觀測值代替約制參數估計修正值高程坐標比較 .....	32
圖 4-5、加入氣象觀測資料分析流程 .....	34
圖 4-6、基線計算成果標準差比較 .....	38
圖 4-7、高程標準差與下陷量比較 .....	43
附圖 3-1、水利署 CHSG 站標準氣象定位成果 .....	51
附圖 3-2、水利署 KTES 站標準氣象定位成果 .....	51
附圖 3-3、水利署 LNJS 站標準氣象定位成果 .....	52
附圖 3-4、水利署 TKJS 站標準氣象定位成果 .....	52
附圖 3-5、水利署 YSLL 站標準氣象定位成果 .....	53
附圖 3-6、內政部 PKGM 站標準氣象定位成果 .....	53
附圖 4-1、水利署 CHSG 站地表氣象高程成果 .....	54
附圖 4-2、水利署 KTES 站地表氣象高程成果 .....	54
附圖 4-3、水利署 LNJS 站地表氣象高程成果 .....	54
附圖 4-4、水利署 TKJS 站地表氣象高程成果 .....	54
附圖 4-5、水利署 YSLL 站地表氣象高程成果 .....	55
附圖 4-6、內政部 PKGM 站地表氣象高程成果 .....	55
附圖 5-1、水利署 CHSG 站濕延遲觀測高程成果 .....	56
附圖 5-2、水利署 KTES 站濕延遲觀測高程成果 .....	56
附圖 5-3、水利署 LNJS 站濕延遲觀測高程成果 .....	56
附圖 5-4、水利署 TKJS 站濕延遲觀測高程成果 .....	56
附圖 5-5、水利署 YSLL 站濕延遲觀測高程成果 .....	57



## 表目錄

表 2-1、SAASTAMOINEN 地面氣象模式高程修正係數 B .....	13
表 3-1、PAROSCIENTIFIC MET-3A 規格 (PAROSCIENTIFIC MET-3A DATASHEET) .....	17
表 3-2、WVR-1500 規格 (RADIOMATICS, 2005) .....	19
表 3-3、各站 GPS 天線及接收儀型號及氣象儀器 .....	24
表 3-4、地層下陷監測應用技術 .....	25
表 3-5、地層下陷監測井壓縮量與 GPS 高程變化量比較 .....	27
表 4-1、BERNESE 5.0 對各項誤差改正策略 .....	28
表 4-2、氣象觀測 GPS 高程平均值比較 .....	35
表 4-3、高程成果與標準氣象組較差 .....	35
表 4-4、氣象觀測 GPS 水平方向平均值比較 .....	36
表 4-5、水平成果與標準氣象組較差 .....	37
表 4-6、基線計算成果比較 .....	38
表 4-7、基線成果與標準氣象組較差 .....	39
表 4-8、各測站 GPS 觀測高程坐標變化與工業技術研究院監測成果比較 .....	40
表 4-9、各測站 GPS 觀測水平坐標變化比較 .....	41
表 4-10、各測站 GPS 觀測水平位移距離及方向 .....	42
表 4-11、三維方向標準差與下陷量 .....	42
附表 1-1、GPS 追蹤站坐標先驗值 .....	49
附表 1-2、測站氣象觀測資料天數 .....	49
附表 2-1、ZWD 觀測值代替約制參數估計修正值均方根誤差比較 .....	50

# 一、緒論

## 1-1 前言

全球衛星定位系統 (GNSS, Global Navigation Satellite Systems) 在空間大地測量上有別於傳統測量方法, 擁有作業快速、方便、高精度等優點, 此外, 可以做長期連續高頻率施測的特性使其適合應用於特定點位三維坐標的長期觀測, 特別是用於固定站的長期位移監測上, 可觀測地表位置的變化來了解板塊運動或是地層下陷區的監控。GNSS 固定追蹤站的長期觀測不僅可以得到季節性高程變化, 高頻率的連續觀測, 更可進一步觀察周變化甚至當日變化趨勢, 提升 GNSS 觀測在高程坐標的監測敏銳性。

在各種 GNSS 系統中, GPS (Global Positioning System) 堪稱為目前應用最普及者。影響 GPS 高程精度的各項因素中, 有兩項較難解決, 第一個是 GPS 衛星在天空中分佈不佳, 觀測角度過低 (一般以 15 度為門檻), 在伽利略系統升空後, GNSS 系統之衛星數量增加了, 衛星分佈條件也會更好, 可以提高此部分的控制力; 第二個是高程定位受對流層折射影響很大, 特別在水氣造成的濕延遲影響較大 (Davis et al., 1985)。

對流層延遲量修正不易, 因此嘗試使用高精度地面氣象觀測儀觀測, 取代標準氣象估計值, 使對流層數學經驗模式估計之對流層延遲量更趨近於真實環境情況; 而導入了水氣微波輻射儀的觀測, 可提供垂直剖面的氣象觀測值, 再利用反演公式推導出最難預估準確的濕延遲量觀測量, 但其是否對於 GPS 三維坐標定位成果有所幫助, 陳春盛(2000)提到利用水氣微波輻射儀所獲致之濕延遲量較利用 Saastamoinen 數學模式推估而得準確, 因此這些差異便反映在計算出來的成果中, 特別是高程坐標, 因此在進行 GPS 觀測或計算時如果能仔細的考量並加入對流層折射因素, 則對於成果會有相當的助益。

## 1-2 研究動機目的

在氣象預報及監測的領域中，水氣的觀測是一個重點，由於水的三態變化造成各種天氣變化，而水氣微波輻射儀（WVR，Water Vapor Radiometer）可觀測大氣中剖面的水氣含量，以及對於可降水量(PWV，Precipitable Water Vapor)的估計。王承賢（2000）以 GPS 觀測量估算可降水量，與 WVR 及探空氣球實際觀測相互比較，提到 WVR 會受到超過飽和水氣影響產生較大誤差，因此需以品質管（Quality Control）步驟（正負兩個標準差）過濾這些干擾。WVR 可取代以傳統探空氣球觀測所得可降水量，改善時間解析度的不足，同時以不同觀測儀器比對及校正，找出彼此的差異及誤差來源。而當降雨時，需減少儀器受到降雨干擾及做適當的校正。WVR 受氣候影響大，但優點是有較好的時間解析度，因此可用以觀測濕度較低的氣候環境下的對流層剖面水氣情況。

曾佩莉（2004）在解算可降水量時提到推演流程，利用水氣影響較小的高山站，以一整年資料建立模式推估得到的 ZWD，加上 Saastamoinen 配合地表壓力及緯度資訊得到高山站之估計天頂總延遲量。以 Bernese 計算出待求站與高山站相對的大氣總延遲量  $\Delta TD$ ，進而得到待求站的濕延遲量，最後可得到可降水量。其利用短基線求解可降水，以高山地表氣象模式產生合歡山可降水模式，因此不再需要國外站的 GPS 資訊（超長基線），且因基線較短，衛星觀測品質較好，周波脫落等情況少，Bernese 軟體處理時間也較迅速。

當只有區域性的 GPS 觀測資料時，要獲得準確的絕對對流層延遲量方法，除了建立區域估計模式外，也可以利用 WVR 觀測得到，以提升 GPS 衛星定位中的對流層延遲量估計品質，達到更佳定位成果。

本研究選取的試驗區為位於台灣本島西部平原的濁水溪沖積扇，長年以來持續有地層下陷的現象，重要交通建設行經此地，必受下陷造成結構形變之影響，尤其是像台灣高速鐵路在虎尾地區快速下陷，至土庫鎮達到最大下陷量，因此未來虎尾與土庫地區為

高速鐵路最容易造成差異沉陷的地區，同時也是最值得重視的地區（水利署，2008），嚴重時可能使軌道變形，造成列車高速行進的危害。因此若能提升此路段三維坐標監測精度，可以提高監測的敏感度，及早發現危險的潛勢，避免重大交通危害。

本研究利用外部氣象觀測改正配合對流層附加參數估計方法，希望在地層持續下陷區域能改善 GPS 高程方向定位成果，而內政部於北港設有水氣微波輻射儀可提供垂直剖面之對流層資訊，可觀測小區域範圍之濁水溪沖積扇地區的對流層天頂總延遲量變化。在 GPS 解算部分，使用瑞士伯恩大學開發之 Bernese 5.0 軟體，對於消除對流層延遲誤差部分，採用數學經驗模式配合對流層附加參數估計方法，以及外部氣象觀測改正配合對流層附加參數估計方法，比較之間的差異。

### 1-3 論文研究方法

由於外部氣象觀測資料可提供氣象觀測值，可導入數學經驗模式而得真實氣象值產生之對流層延遲初始值；也能依理論公式將 WVR 量測之光程數據反演得到對流層濕延遲量實測估計量，進而推估準確天頂向對流層延遲量 (ZTD, Zenith Tropospheric Delay)，本研究嘗試各種方法，探討是否可提升 GPS 垂直高程方向定位成果。

本研究以濁水溪沖積扇的五個水利署 GPS 固定站連續觀測資料，評估 GPS 高程定位時，使用實測氣象觀測資料後造成的高程定位精度差異性；以及位在地層下陷區，各個不同的測站有不同下陷速度，是否會影響加入實測氣象觀測資料後 GPS 高程定位的精度。在各個測站的地層下陷程度觀測上，以經濟部水利署（2008）的 GPS 固定站之規劃建置與觀測分析成果報告書中，高程水準測量以及地層下陷監測井之深層壓縮量做為檢核，GPS 觀測時間為 2007 年 11 月 2 日至 2008 年 12 月 31 日，共 426 日，透過地面氣象儀以及 WVR 獲得的氣象數據，濾除差異過大以及錯誤的資料後，加入至 GPS 解算流程中。

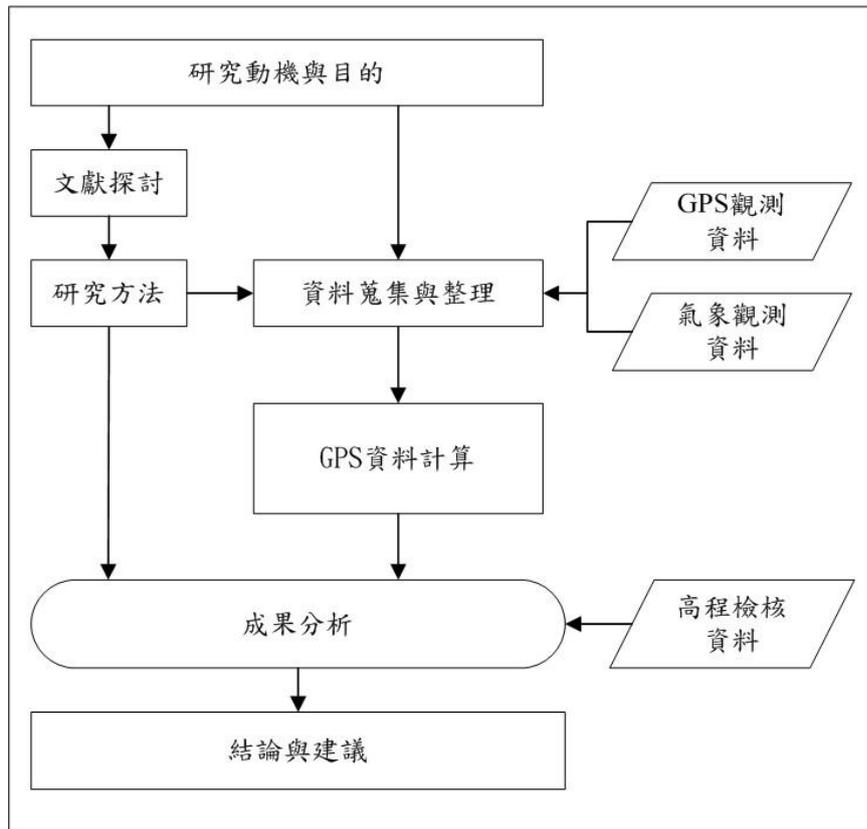


圖 1-1、研究流程圖



## 1-4 論文架構

本論文以不同的對流層延遲處理方法，導入實測氣象觀測資料，應用在高程持續變動之測站，來評估高程向定位之精度影響，內容包括了五個章節：

### 第一章 緒論

敘述動機目的及研究流程。

### 第二章 GPS 訊號對流層延遲原理

簡介 GPS 相對定位及差分原理，對流層延遲原理及對流層處理方法包括使用數學經驗模式、參數估計，了解對流層相對及絕對誤差對於 GPS 定位的影響。

### 第三章 氣象觀測及試驗區地層下陷

介紹本研究兩種氣象設備，以及獲得的觀測資料簡介；並且簡介本研究的試驗區，濁水溪沖積扇，及 GPS 基線網型組成狀況；最後簡介本研究用以驗證的地層下陷監測資料。

### 第四章 實驗方法及成果分析

介紹本研究以 Bernese 5.0 軟體解算的方法及流程，進行相對定位之解算，包括加入天頂濕延遲量於參數估計法中，以及比較標準氣象與地表氣象觀測數據、濕延遲量觀測數據之不同對流層延遲處理策略，探討及分析成果。

### 第五章 結論與建議

評估加入氣象儀器對於 GPS 相對定位網形坐標高程是否有其效益，對於解算成果的說明，以及未來導入氣象觀測數據的建議。

## 二、GPS 訊號對流層延遲原理

### 2-1 GPS 相對定位及差分原理

GPS 衛星測量定位基本原理是以 GPS 訊號中的電碼虛擬距離或是雙頻載波相位觀測量，使用至少四顆衛星，量測衛星到測站之距離，再利用空間距離交會法解出測站之三維坐標位置與接收儀時鐘誤差。而單純以單一測站接收訊號所得之定位結果為單點定位，所求得之坐標為地心絕對坐標，由於對於誤差的改正，除了對接收儀時鐘誤差利用多餘衛星觀測量來做改正，而電離層折射及對流層折射誤差只能利用全球模式處理，而存在其它誤差無法有效消除，因此定位精度較差。

若有兩個可同步觀測的測站時，使用相對定位求解兩測站的相對位置，目標為求出基線之向量  $\Delta R_{12}$ ，由已知坐標參考站推求未知點坐標，如圖 2-1 (Wells, 1987)，則大部分的系統誤差可以因為同步觀測可予以消除或是降低，使精度提高。

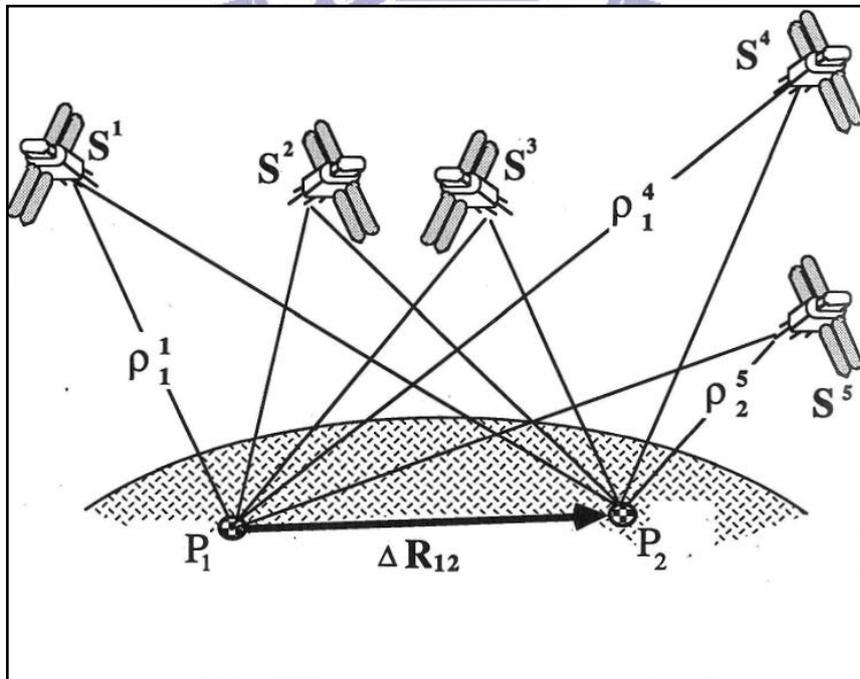


圖 2-1、GPS 衛星相對定位示意 (Wells, 1987)

利用載波相位同步觀測可組成一次差分、二次差分、三次差分等不同的差分方程，省略衛星軌道誤差項及隨機誤差後，原始載波相位方程式為（2-1 式）（Wells, 1987）：

$$\Phi = \rho + c(dt - dT) + \lambda \cdot N - d_{ion} + d_{trop} \quad (2-1)$$

其中

$\Phi$ ：載波相位觀測量

$\rho$ ：幾何距離

$c$ ：光速

$\lambda$ ：L1/L2 波長

$N$ ：週波未定值

$dt; dT$ ：衛星及接收儀時鐘誤差

$d_{ion}$ ：電離層延遲量

$d_{trop}$ ：對流層延遲量

以地面一次差分觀測 $\Delta$ 為例，利用地面基線兩端測站同步觀測同一衛星所得的兩個載波相位觀測值之差，觀測方程式將變成（2-2 式）：

$$\Delta\Phi = \Delta\rho + c(\Delta T) + \lambda \cdot \Delta N - \Delta d_{ion} + \Delta d_{trop} \quad (2-2)$$

一次差分可將衛星時鐘誤差及大部分衛星軌道誤差去除，若測站距離靠近則可減低許多的大氣折射誤差項。若繼續以兩測站同步觀測兩衛星所得一次差觀測量相減，成為二次差分 $\nabla\Delta$ 如（2-3 式）：

$$\nabla\Delta\Phi = \nabla\Delta\rho + \lambda \cdot \nabla\Delta N - \nabla\Delta d_{ion} + \nabla\Delta d_{trop} \quad (2-3)$$

在二次差分後可將接收儀時鐘誤差消除，大氣折射殘餘誤差進一步降低，至此若能解出整數週波值，則剩餘的系統誤差主要剩下的就是大氣折射誤差。再以兩測站在連續時刻同步觀測兩衛星所得二次差觀測量之差，為三次差分如（2-4 式）：

$$\delta\nabla\Delta\Phi = \delta\nabla\Delta\rho - \delta\nabla\Delta d_{ion} + \delta\nabla\Delta d_{trop} \quad (2-4)$$

理想情況下，週波未定值會被消除，通常三次差可用來檢查週波脫落以及過濾粗差。但由於差分觀測方程式會逐漸使觀測量明顯的減少，且將使得各觀測量之間擁有相關性，是使用差分模型時需要注意到的。

## 2-2 對流層延遲原理

GPS 衛星定位測量，影響精度的主要誤差來源一般可分為三類：

- 1.與 GPS 衛星有關的誤差。
- 2.與訊號傳播路徑有關的誤差。
- 3.與接收儀有關的誤差。

在訊號傳播方面，主要包括大氣折射誤差及多路徑效應，大氣折射誤差又分為電離層誤差及對流層誤差（曾與儲，1999）。GPS 訊號由衛星至地表會經過充滿介質之大氣層，非真空的介質可能導致訊號的折射及延遲，在非中性大氣介質中的離子化區之折射，因其與頻率平方有關，可使用雙頻載波相位訊號 L1 及 L2 組合出無電離層折射效應的 L3 觀測量，消除電離層的訊號折射誤差；可是對流層僅含少量帶電離子，幾乎不影響電磁波傳遞，屬於中性大氣，頻率在 15Hz 以下之電磁波經過中性（neutral）大氣時，其傳遞速率不隨頻率變化而有變化，屬於非色散（non-dispersive），GPS 載波相位訊號頻率為 1575.42MHz（L1）及 1227.60MHz（L2），在中性大氣中的影響量是相同的，因此無法如同電離層折射修正，利用雙頻載波相位訊號來消除其延遲量。

大氣因受引力影響，越靠近地表大氣介質濃度越高，使訊號傳遞在大氣不同高度有不同的折射率，使中性大氣延遲產生了速度延遲(Retarding)及幾何路徑延遲(Bending)，如圖 2-2（Ichikawa et al., 2006）。

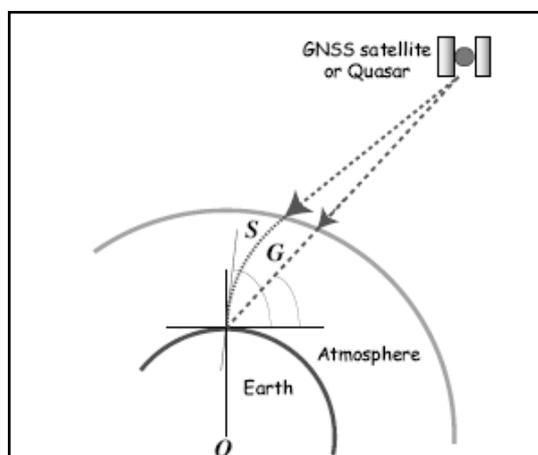


圖 2-2、GPS 訊號通過大氣示意

若以  $\Delta L$  表示對流層延遲量，可表示為 (2-5 式)：

$$\Delta L = \int n(s)ds - G \quad (2-5)$$

其中

$n$ ：訊號路徑上的折射率

$s$ ：測站位置

$G$ ：衛星至測站的直線距離

同時式 (2-5 式) 又可寫成：

$$\Delta L = \int [n(s) - 1]ds + (S - G) \quad (2-6)$$

其中  $S$  為幾何路徑彎曲的距離。而 (2-6 式) 中的  $\int [n(s) - 1]ds$  代表速度延遲項， $(S - G)$  代表幾何路徑彎曲延遲，而路徑彎曲延遲當仰角 15 度觀測時會造成約 1cm 的影響量，此效應約僅佔總路徑延遲的 0.1% (Bevis, 1992)，當電磁波傳遞路徑沿天頂方向時為直線傳遞，路徑彎曲效應也跟著消失，因此 GPS 觀測路徑長主要受到速度延遲之影響，因此延遲量可寫成 (2-7 式)：

$$\Delta L = \int [n(a) - 1]ds = 10^{-6} \int N^{\text{trop}} ds \quad (2-7)$$

其中

$N^{\text{trop}}$ ：對流層折射係數

$N^{\text{trop}}$  可表示為 (2-8 式) (Thayer, 1974)：

$$N^{\text{trop}} = (k_1 \frac{P_d}{T})Z_d^{-1} + (k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2})Z_w^{-1} \quad (2-8)$$

其中

$P_d$ ：乾空氣分壓 (mb)

$e$ ：水氣分壓 (mb)

$T$ ：溫度 (K)

$k_1, k_2, k_3$ ：常數

$Z_d$ ：乾空氣壓縮因子

$Z_w$ ：水氣壓縮因子

Hopfield (1969) 將 $N^{\text{trop}}$  分為乾延遲量及濕延遲量如 (2-9 式) :

$$N^{\text{trop}} = N_{\text{dry}}^{\text{trop}} + N_{\text{wet}}^{\text{trop}} \quad (2-9)$$

乾延遲量又稱為天頂向流體靜力延遲 (ZHD, Zenith Hydrostatic Delay), 理論值約為 2.3 公尺, 約佔整個延遲量的 90% (Janes et al, 1989), 以常用的數學模式求得結果皆相當接近, 若有準確的地表壓力值即可求得; 濕延遲量 (ZWD, Zenith Wet Delay) 在兩極和赤道地區大概在 0 到 30 公分間變化, 中緯度則約是數公分至 20 公分 (Elgered, 1993), 若利用數學模式輔以地面氣象資料來估計, 誤差約在 3 到 5 公分, 在鋒面過境時上升到 5 到 8 公分 (Ichikawa et al., 1995), 利用數學模式推估而得的濕延遲量因為水氣分佈不均及變化速度快而難以預期, 成效並不理想。而按照 Essen & Froom (1951) 導出之經驗公式, 可將折射係數表示為 (2-9 式) :

$$\begin{aligned} N_{\text{dry}}^{\text{trop}} &= c1 \frac{P_d}{T} ; \quad c1 = 77.64 \text{Kmb}^{-1} \\ N_{\text{wet}}^{\text{trop}} &= c2 \frac{e}{T} + c3 \frac{e}{T^2} ; \quad c2 = -12.96 \text{Kmb}^{-1} ; \quad c3 = 3.718 \cdot 10^5 \text{K}^2 \text{mb}^{-1} \end{aligned} \quad (2-10)$$

若以天頂方向的對流層延遲量 (ZTD, Zenith Tropospheric Delay) 預估對流層總延遲量, 此 ZTD 為天頂方向估計值, 因此可去除路徑彎曲效應, 再分別給定乾延遲量和濕延遲量不同的映射函數 (mapping function), 如圖 2-3 (Ichikawa et al., 2006), 將天頂方向的估計值轉換至實際 GPS 衛星所在之仰角高度來改正觀測量如 (2-11 式) :

$$D_{\text{trop}}^z \times f(\theta_a^i)_{\text{dry};\text{wet}} = D_{\text{dry}}^i + D_{\text{wet}}^i = D_{\text{trop}}^i \quad (2-11)$$

其中

$D_{\text{trop}}^z$  : 估計對流層天頂向總延遲量

$f(\theta_a^i)$  : 映射函數

$\theta$  : 衛星仰角高度

$i$  : 第  $i$  顆衛星

$D_{\text{dry}}^i$  : 乾延遲改正量

$D_{\text{wet}}^i$  : 濕延遲改正量

在理想假設均質的大氣環境使用映射函數，標準氣象模式造成乾延遲誤差約僅數 mm 到數 cm，造成濕延遲誤差小於 1cm (Janes et al., 1991)，但實際上水氣分佈情況比乾空氣更複雜，大氣層也並非均質環境，濕延遲估計量以映射函數化算至衛星仰角高度會更加困難。

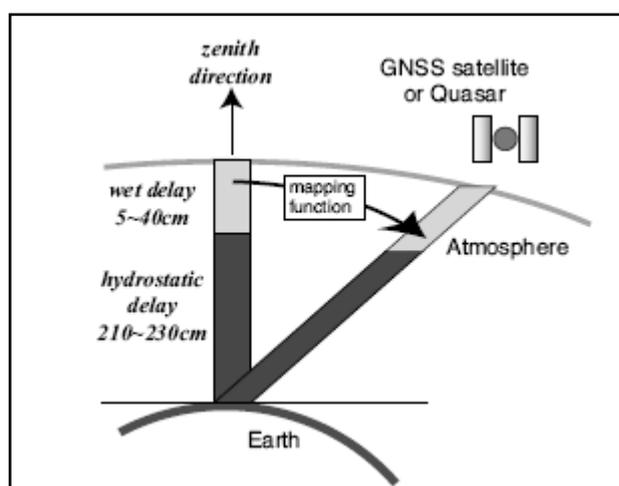


圖 2-3、映射函數 (mapping function) 示意 (Ichikawa et al., 2006)

## 2-3 對流層延遲絕對量與相對量之誤差

Dach et al. (2007) 提到，對流層的偏差量可分做兩項探討：(1)相對對流層偏差是指基線的一端點相對於另外一端點的對流層折射誤差；(2)絕對對流層偏差是指整個基線包含兩端點的對流層折射誤差。而 Beutler et al. (1988) 提到相對對流層偏差最主要影響的是測站的高程值；而絕對對流層偏差則使估計基線長度產生尺度的偏差。

首先將相對對流層延遲偏差可用 (2-12 式) 表示：

$$\Delta h = \frac{\Delta \rho_r^z}{\sin(E_{\min})} \quad (2-12)$$

其中

$\Delta h$ ：測站高程誤差

$\Delta \rho_r^z$ ：相對天頂向對流層延遲誤差

$E_{\min}$ ：GPS 觀測所採用的最低仰角

上式是假設在測站之上的衛星均勻分布於天空中，但實際情況 GPS 衛星軌道面與赤道擁有  $55^\circ$  的傾角，因此衛星在天空中的分佈情形不會是均勻分佈，而在衛星裁角 (cutoff angle)  $20^\circ$  的情況下相對對流層延遲偏差 1 公分會造成相對高程上的估計產生約 3 公分的誤差，裁角降低至  $3^\circ$  時，誤差將增加至 19 公分。

絕對的對流層延遲偏差可表示為 (2-13 式)：

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta \rho_a^z}{R \cdot \cos(z_{\max})} \quad (2-13)$$

其中

$l, \Delta l$ ：基線長度及其相對誤差

$\Delta \rho_a^z$ ：絕對天頂向對流層延遲誤差

$R$ ：地球半徑

Dach et al. (2007) 提到在衛星裁角  $20^\circ$  的情況下絕對對流層延遲偏差 10 公分會造成 0.05ppm 的尺度誤差，裁角降低至  $3^\circ$  時，尺度誤差將增加至 0.3ppm。絕對對流層延遲偏差影響量要比相對對流層延遲偏差小，但基線長度超過 20 公里時仍然需要考慮。

以數百公里至數千公里超長基線求解，可得到準確的絕對天頂對流層總延遲，但短基線僅可得到基線網間準確的相對天頂對流層總延遲。在增加可觀測對流層垂直剖面的 WVR 觀測資料時，Pacione et al. (2002) 比較了經驗水氣模式和地面的 WVR-1100 的可降水量值，經驗水氣模式由 Saastamoinen 導出 ZTD 求解 ZWD 值，比較的結果發現，GPS 估計之 ZWD 可達到 mm 等級的精度。其中發現以 VLBI (Very Long Baseline Interferometry) 方法得到之 ZTD，會小於 GPS 估計得到的 ZTD 約 1.5 公分，但也可能是不同解算方法與不同裁角設定造成的差異。

## 2-4 對流層數學經驗模式 Saastamoinen

對流層的延遲量由於無法使用雙頻觀測消除，因此通常會使用模型估計作為處理的策略，其中最廣為人知的就是 Saastamoinen (1973) 基於理想氣體狀況提出的模式如 (2-14 式)：

$$\rho = \frac{0.002277}{\cos z} \left[ p + \left( \frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - \tan^2 z \right] \quad (2-14)$$

其中

p：大氣壓力 (mb)

e：水氣分壓 (mb)

T：溫度 (K)

z：天頂距

而 Bauersima (1983) 加入了修正係數成為 (2-15 式)：

$$\rho = \frac{0.002277}{\cos z} \left[ p + \left( \frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - B \tan^2 z \right] + \delta R \quad (2-15)$$

其中 B 為測站高度之改正， $\delta R$  則依衛星仰角及測站高度設定，在 Bernese 軟體中之 Saastamoinen 模式僅使用 B 做為修正係數，如表 2-1。而導入模式中的氣象參數，乃是依據海平面標準氣象模式(standard atmosphere model)設定高程 0 公尺處之氣象初始值，以大氣壓力 1013.25mb、溫度 18°C 與相對濕度 50% 為 Bernese 軟體中建議使用數值，用以估計出各測站所在高程位置的氣象值。

表 2-1、Saastamoinen 地面氣象模式高程修正係數 B (Bauersima, 1983)

測站高程(m)	B(mb)
0	1.156
500	1.079
1000	1.006
1500	0.938
2000	0.874
2500	0.813
3000	0.757
4000	0.654
5000	0.563

為了得到穩定的高程解，因此選擇非實際觀測的數學經驗模式，做為處理對流層延遲策略之解算方法，數學經驗模式仍可以準確預估乾延遲量，其中 Saastamoinen 模式經過 Mendes and Langley (1999) 驗證可達優於 1mm 等級。若可得準確乾延遲量，那麼只要可求得準確的濕延遲量，即可預估出更準確的天頂向對流層總延遲量。

## 2-5 對流層參數估計

利用參數估計法計算對流層延遲量，可將對流層參數表示為 (2-18 式)：

$$\rho_s^i(t, z) = \Delta\rho_{\text{priori},s}(\theta_s^i) + \Delta\rho_s(t) \times f(\theta_s^i) \quad (2-18)$$

其中

$\Delta\rho_{\text{priori},s}(\theta_s^i)$ ：先驗對流層初始值。

$\Delta\rho_s(t)$ ：天頂向延遲參數（先驗對流層初始值之改正量）。

$f(\theta_s^i)$ ：映射函數。

先驗對流層初始值是利用數學經驗模式代入觀測或估計之氣象參數所解算出的對流層延遲量的先驗初始值，而後利用約制平差解算出 GPS 二次差分觀測量後之改正量作為先驗值之修正值，將先驗對流層初始值加上先驗對流層初始值之改正量即為天頂向總延遲量估計值。對流層總延遲量為 ZHD 和 ZWD 加總，估計對流層延遲量為先驗對流層初始值和改正量相加，若數學經驗模式求解之先驗對流層初始值可準確預估 ZHD，那麼先驗值的改正量項即可代表為 ZWD。

另外由於假設大氣為均勻介質，天頂向對流層延遲量會具有對稱性，而若對流層頂與地球表面並不平行而且存在  $\beta$  角度時，如圖 2-4，則會產生大氣水平梯度（Horizontal Tropospheric Gradients）上的誤差。

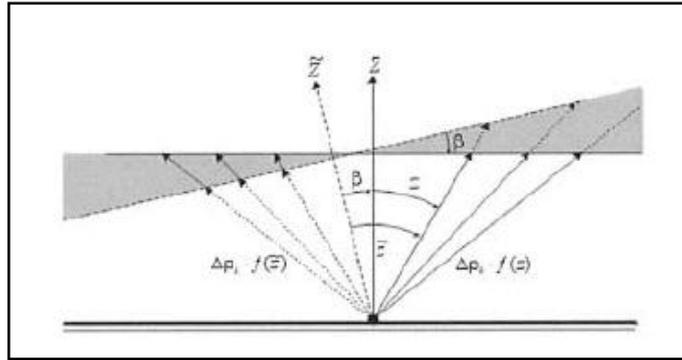


圖 2-4、對流層頂平面傾斜與地表夾角 (Meindl et al., 2004)

因此在 (2-18 式) 的改正項可加上一項水平梯度參數改寫成為 (2-19 式) :

$$\Delta\rho_k(t, A, \theta) \times f(\tilde{\theta}_a^i) = \Delta\rho_a(t) \times f(\theta_a^i) + \Delta\rho_a(t) \times [x_a \cos(A_a^i) + y_a \sin(A_a^i)] \quad (2-19)$$

其中

$$\tilde{\theta}_a^i = \theta_a^i + \beta = \theta_a^i + x_a \cos(A_a^i) + y_a \sin(A_a^i)$$

$A_a^i$  : 測站至衛星之方位角

$\theta_a^i$  : 衛星與地表垂直之天頂距

$\tilde{\theta}_a^i$  : 衛星與層狀大氣垂直之天頂距

$x_a$ ;  $y_a$  : 與測站相關的係數

在本研究中, 在加入水平梯度參數後的估計天頂對流層總延遲量(ZTD)成果約在 0m-3m 之間, 震盪幅度較水氣微波輻射儀實際觀測值 (約 2.4m-2.6m) 大, 因此並未使用水平梯度參數。

## 三、氣象觀測及試驗區地層下陷

### 3-1 氣象觀測儀器介紹

實測的氣象觀測數據可輔助 GPS 解算，王傳盛等（2005）提到在估計對流層延遲量時，不精確的地表氣壓值，會使橢球高程每日求解成果出現公分級以上的偏差值；以短時間觀測（4 小時）並使用 24 個對流層附加參數進行參數估計，發現大致上每一天日間的 GPS 高程觀測成果大部分會小於晚上，且數量級達到數公分，再配合地表氣象觀測資料輔以 24 個對流層附加參數重新進行計算，則發現並無差異。

而陳彥欉（2008）在 GPS 觀測中加入 WVR 觀測資料輔助解算的方法，加入 WVR 水氣輻射觀測量於 GPS 基線解算時，由於有高取樣率且較準確的先驗對流層初始值，配合每 30 秒估計對流層參數方法，其定位成果與傳統 GPS 解算成果比較，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 定位成果間可能有數個 mm 及數個 mm/yr 的差異量。

本研究首先採用 MET-3A 地表氣象設備，去除標準氣象參數與地表氣壓值的差異，獲得更好的對流層初始參數值；並以 WVR-1500 水氣微波輻射儀接收大氣中水氣資訊，在良好的觀測環境下能提供更準確的對流層濕延遲估計量，進而提升解算成果。

#### 3-1-1 Paroscientific MET-3A Meteorological Measurement System

本研究區域內選定內政部水利署五個 GPS 追蹤站，皆設置了 MET-3A 地面氣象量測儀器，可提供高精度的氣壓、溫度以及相對濕度的量測資料，如圖 3-4。壓力的量測於 620 ~ 1100hPa 的範圍內可提供 0.08hPa 的精度；溫度介於 -50 ~ +60°C 的範圍中可以有

0.1°C的精度；相對濕度在 25°C時誤差小於 2%。

當 MET-3A 連接至 GPS 接收儀時，量測的氣象觀測值會藉由 GPS 接收儀輸出為 RINEX-M 檔的格式，如圖 3-5。若有需要，觀測記錄內容可設定與 GPS 衛星觀測資料同步，每筆 GPS 觀測資料都會伴隨一筆該時刻觀測而得的氣壓、溫度及相對濕度。

表 3- 1、Paroscientific MET-3A 規格 (Paroscientific MET-3A datasheet)

PERFORMANCE	
PRESSURE	
Range:	620 to 1100 hPa (9 to 16 psia)
Resolution:	Better than 0.001 hPa
Accuracy, Including Pressure Hysteresis, Repeatability, Linearity, & Temperature Conformance	Better than $\pm 0.08$ hPa
Stability	Better than 0.1 hPa per year
TEMPERATURE	
Range	-50 to +60 Deg C
Resolution	Better than 0.01 Deg C
Accuracy	Better than $\pm 0.1$ Deg C
Stability	Better than 0.1 Deg C Per Year
HUMIDITY	
Range	0 to 100%
Accuracy	Better than $\pm 2\%$ RH at 25°C
Saturation Recovery Time	2 Minutes or Less
ENVIRONMENTAL	
Maximum Pressure	1240 hPa (18 psia)
Operating Temperature Range	-50 to +60 Deg C
Aspiration Flow Rate	4.5 meters/second
Weight	4.2Kg (9.2 lb.)
OUTPUT	
RS-232 Bi-Directional Interface	

\*註：hPa = mb



圖 3-1、Paroscientific MET-3A 外型

2.10 METEOROLOGICAL DATA								RINEX VERSION / TYPE	
SPIDER U2,1,0,2267				2007 11 03 00:03				PGM / RUN BY / DATE	
CHSG								MARKER NAME	
CHSG								MARKER NUMBER	
3	PR	TD	HR					# / TYPES OF OBSERV	
Paroscientific			*Met3A DQ102602					PR SENSOR MOD/TYPE/ACC	
Paroscientific			*Met3A DQ102602					TD SENSOR MOD/TYPE/ACC	
Paroscientific			*Met3A DQ102602					HR SENSOR MOD/TYPE/ACC	
-2943591.2034	5039544.1015	2564156.5111		24.4807	PR SENSOR POS XYZ/H				COMMENT
Measurements recorded in GPS time								END OF HEADER	
07	11	02	00	00	19	1014.2	20.7	73.3	
07	11	02	00	00	49	1014.3	20.7	73.0	
07	11	02	00	01	19	1014.3	20.7	72.9	
07	11	02	00	01	49	1014.3	20.8	73.0	
07	11	02	00	02	19	1014.4	20.7	73.2	
07	11	02	00	02	49	1014.3	20.7	73.1	
07	11	02	00	03	19	1014.3	20.7	73.0	
07	11	02	00	03	49	1014.1	20.7	72.7	
07	11	02	00	04	19	1014.3	20.7	72.9	
07	11	02	00	04	49	1014.3	20.8	72.9	
07	11	02	00	05	19	1014.3	20.7	73.0	
07	11	02	00	05	49	1014.3	20.7	73.1	
07	11	02	00	06	19	1014.3	20.8	73.2	
07	11	02	00	06	49	1014.3	20.8	73.2	
07	11	02	00	07	19	1014.3	20.8	73.2	
07	11	02	00	07	49	1014.4	20.8	73.4	

圖 3-2、RINEX-M 氣象觀測檔例

### 3-1-2 Radiometrics WVR-1500

WVR-1500 是美國 Radiometrics 公司製造之雙頻可攜式微波輻射計，如圖 3-6。儀器頻率介於 22-30 GHz 之間，有五個觀測頻率（分別為：在弱水氣吸收頻的 22.235GHz；以及 23.035GHz、23.835GHz、26.235GHz、30.000GHz），可觀測至 10 公里高的水氣剖面。以黑體溫度為 290k 的情況下設定各區段頻率率定出的黑體溫度，觀測亮溫值，再使用內政部水氣微波輻射儀之轉檔程式，反演出對流層之濕延遲觀測量。本研究使用的水氣微波輻射資料由內政部所提供，以內政部提供之轉檔程式，將原始的水氣微波輻射觀測資料轉換成 Bernese 可讀之氣象格式檔案 (\*.MET)，本研究使用其中一種氣象

格式：MET type5 格式如，圖 3-7，包含天頂向施延遲量（ZWD）、溫度、相對濕度、大氣壓力。

表 3- 2、WVR-1500 規格（Radiomatics, 2005）

Ground-based microwave radiometer (WVR-1500) features	
Specifications	
Sampling time	10 s
Resolution	0.25 °C
Accuracy	0.5 °C
Surface Measurement Accuracy	
Temperature	0.5 °C
Relative Humidity	2%
Barometric Pressure	0.3 mb
Operating Temperature	-50°C to +50°C
Power	200 watts maximum
Dimensions	50x28x76 cm <sup>3</sup>
Weight	32 kg



圖 3- 3、WVR-1500 外型

TEST										BERNESE MET_FILES		
STATION : PRGM										UTC-LOCAL TIME(HOURS) = 0 TYP= 5 #VALUES= 4 MOD= 1		
JJ	MM	DD	HH	MM	SS	PPP.PP	TT.TT	HH.HH	ZW_delay			
08	03	06	00	01	45	1020.20	14.85	89.00	0.135			
08	03	06	00	01	51	1020.20	14.85	88.90	0.137			
08	03	06	00	02	09	1020.20	14.85	89.00	0.133			
08	03	06	00	02	21	1020.20	14.85	89.00	0.135			
08	03	06	00	02	49	1020.20	14.85	88.90	0.135			
08	03	06	00	03	03	1020.30	14.85	89.00	0.136			
08	03	06	00	06	17	1020.20	15.15	88.10	0.136			
08	03	06	00	06	29	1020.20	15.05	88.10	0.136			
08	03	06	00	06	40	1020.20	15.15	88.00	0.136			
08	03	06	00	06	57	1020.20	15.15	87.80	0.134			
08	03	06	00	07	09	1020.20	15.15	87.70	0.135			
08	03	06	00	07	34	1020.20	15.15	87.80	0.135			
08	03	06	00	07	52	1020.20	15.25	87.90	0.139			
08	03	06	00	11	17	1020.20	15.25	87.60	0.136			
08	03	06	00	11	28	1020.20	15.25	87.60	0.135			
08	03	06	00	11	39	1020.20	15.25	87.50	0.133			
08	03	06	00	11	54	1020.20	15.25	87.60	0.134			
08	03	06	00	12	07	1020.20	15.35	87.70	0.135			
08	03	06	00	12	32	1020.20	15.25	87.60	0.134			
08	03	06	00	12	54	1020.20	15.25	87.90	0.138			
08	03	06	00	16	17	1020.30	15.45	87.10	0.135			
08	03	06	00	16	28	1020.30	15.55	87.30	0.135			

圖 3-4、水氣微波輻射儀 MET type5 檔案例，包含 ZWD 及溫度、濕度、壓力



### 3-2 研究區域簡介

台灣本島因超抽地下水，導致已有包括台北、桃園、彰化、雲林、嘉義、台南、高雄、屏東、宜蘭等九大縣市產生地層下陷，其中位於西部彰化、雲林、嘉義三縣市仍有持續下陷的情況（水利署，2008）。本研究主要探討區域為台灣主要地層下陷區域之一的濁水溪沖積扇地區，如圖 3-5（經濟部中央地調所）。使用水利署設置的五個長期 GPS 衛星固定追蹤站，包括雲林縣元長鄉客厝國小（KTES）、林內鄉林內國中（LNJS）、土庫鎮土庫國中（TKJS）、虎尾鎮新興國小（YSLL）及彰化縣大城鄉西港國小（CHSG），每日作 24 小時 GPS 觀測，以單日座標解記錄各站變化。

以往 GPS 觀測解算地層下陷區域，會加入內政部 eGPS 衛星固定站資料作為網形外圍約制框架參考站如圖 3-6，本研究不使用內政部 eGPS 衛星固定站，僅探討濁水溪沖積扇區域內各站之坐標變化，因 Bernese 軟體在解算短基線時，僅能得到準確的相對大氣延遲量，若以長基線的解算方法計算距離過短的基線，則會使求解的值出現較大的震盪（曾珮莉，2004）。工研院站（TNML）與濁水溪沖積扇測區距離約 150 公里，設定

為坐標固定基準站，加入一條較長的基線（TNML-PKGM）至基線網中，使 ZTD 估計量得到較穩定且接近氣象儀器實測值。計算時，以工研院能源環境資源所之地層下陷監測使用的 GPS 固定站坐標初始值，將工研院站起始坐標固定後，觀測各站與 TNML 之相對坐標位移量，使研究成果與以往監測數據擁有相同基準可相互比較。

各站 GPS 天線及接收儀型號及氣象儀器資訊，如表 3-1；因內政部於北港站設置了一台水氣微波輻射儀 WVR-1500，可提供北港站對流層絕對天頂延遲量，因此組基線網時由北港站（PKGM）為中心，連接其它 GPS 固定站產生放射狀基線，如圖 3-7。再利用 Bernese 軟體估計對流層參數方法估算附近短基線其它站的對流層相對天頂延遲量；以工研院能源環境資源所地層下陷監測所使用之固定站坐標初始值進行約制，且將工研院站（TNML）固定起始坐標為相對定位坐標基準，使研究成果與以往監測數據擁有相同基準可相互比較。

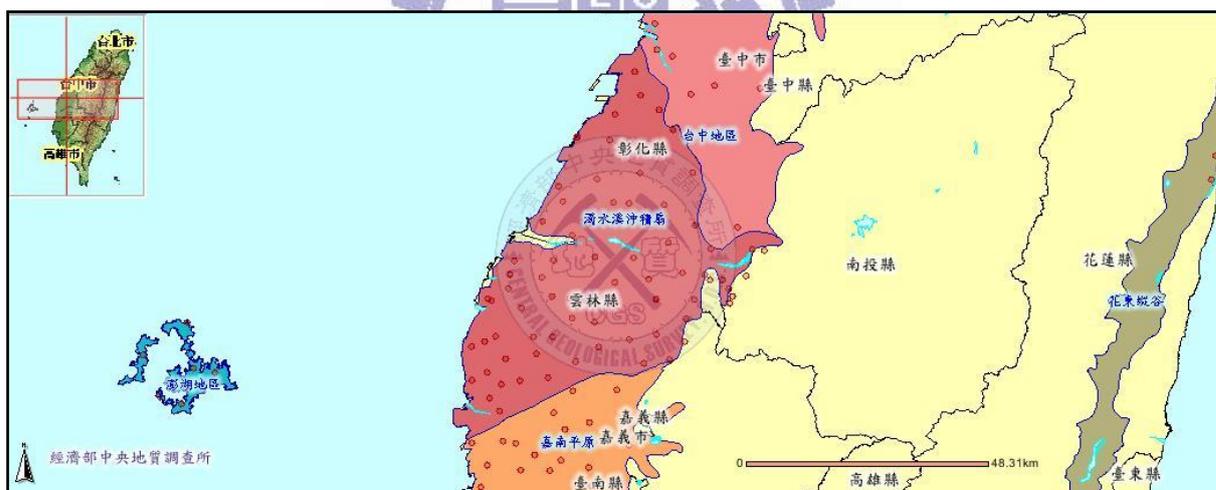


圖 3-5、濁水溪沖積扇相關位置（經濟部中央地調所，地質資料整合查詢網頁）

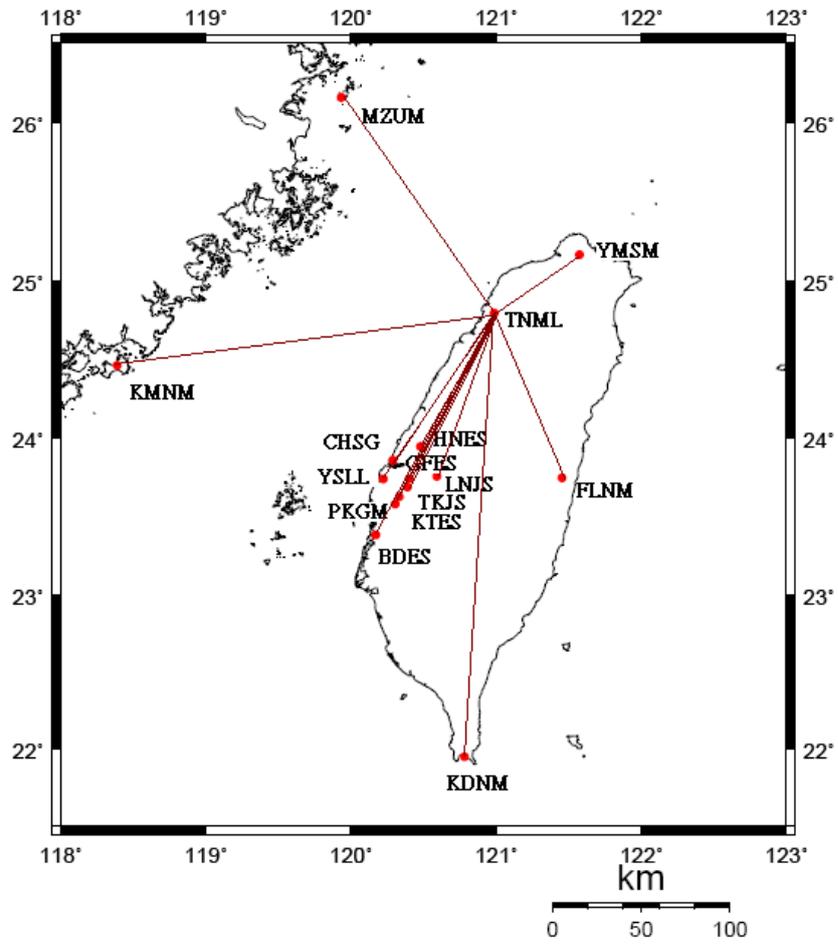


圖 3- 6、GPS 監測濁水溪沖積扇下陷使用基線網

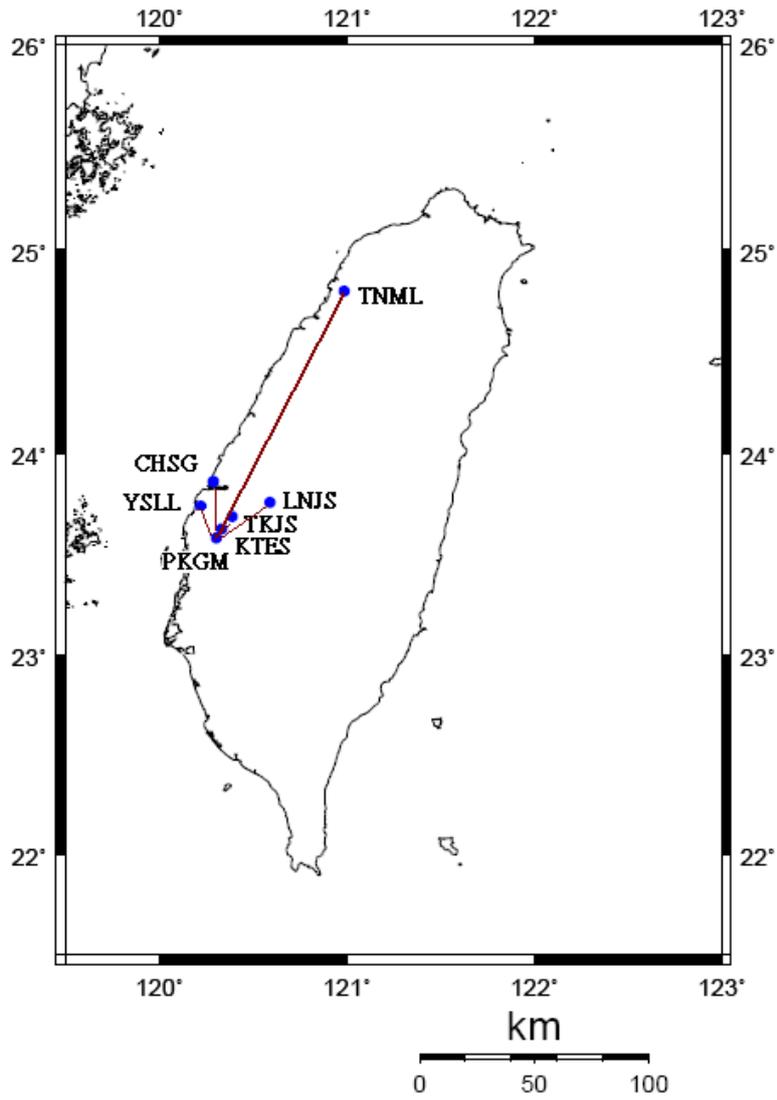


圖 3-7、各測站相關位置及基線組成狀態

表 3-3、各站 GPS 天線及接收儀型號及氣象儀器

測站	天線盤型號	接收儀型號	氣象儀器	
			MET-3A	WVR-1500
工研院站(TNML)	AOAD/M_T	AOA BENCHMARK ACT	—	—
西港國小(CHSG)	LEIAT504	LEICA GX1230	○	—
客厝國小(KTES)	LEIAT504	LEICA GX1230	○	—
林內國中(LNJS)	LEIAT504	LEICA GX1230	○	—
土庫國中(TKJS)	LEIAT504	LEICA GX1230	○	—
新興國小(YSLI)	LEIAT504	LEICA GX1230	○	—
北港站(PKGM)	TPSCR3_GGD	TPS ODYSSEY_E	—	○

### 3-3 地層下陷監測方法

目前台灣對於地層下陷監測與防治，所應用之技術涵蓋地質鑽探、土壤物理/化學及力學試驗、分層地層壓縮監測、精密水準測量、精密 GPS 測量、地質統計、數值模擬、地理資訊系統等（地層下陷防治資訊網），不僅如此，除傳統之技術外也加入新科技應用，如微波干涉成像技術（INSAR）、放射源測定地層變動技術等。

同時運用監測地表及地下之土地變形量，是地層下陷監測行之有年之方法。在監測地表的表面高程測量方面，主要包含水準測量及 GPS 衛星測量兩種；而地表之下的地層監測，以地層下陷監測井觀測地下水位的變動及各個深度地層的壓縮情況。水準測量、GPS 高程測量、地層下陷監測井之特點及適用時機如表 3-4。水利署之 GPS 測量以及地層下陷監測井壓縮量觀測成果，包含本研究的 GPS 觀測時間區段，可檢核各測站的沉陷趨勢。

表 3-4、地層下陷監測應用技術（經濟部水利署，2008）

	特點	適用時機
水準測量	地面高程精度優於 GPS 測量，施測成本較昂貴費時。	適用於需高精度的高程測量，精度要求以閉合差測量精度小於 $3\text{mm}\sqrt{K}$ 為原則。
GPS 高程測量	可長期高頻率持續施測，作業過程省時，可獲得三維坐標。	適用於測區範圍大、測點少時，精度要求為重複基線總水平分量 $\leq 10\text{mm}+2\text{ppm}$ ，總垂直分量 $\leq 25\text{mm}+5\text{ppm}$ 。
地層下陷監測井	直接監測地表以下的土地變形，提供地面高程測量無法觀測的地質水文資訊。	適用於已發生地層下陷之區域的長期監測地下土地變形。

### 3-3-1 GPS 高程測量

GPS 高程測量觀測可得三維坐標，可同時獲得水平向及高程向定位成果，所換算得到之高程值為橢球高，擁有長期高頻率持續施測之優點，對於地表監測擁有比水準測量更高的靈敏度，因此更適合觀測短時間內點位之坐標位移變化。但因 GPS 訊號受大氣及天線所在環境影響，存在其它干擾，除獲得地表資訊外可能含有其它氣象及施測環境造成的影響量，精度不如水準高程測量。

由於 GPS 所求得的坐標是地心坐標（Geocentric Coordinate），可直接化算成水準測量所使用的大地坐標（Geodetic Coordinate），但由於 GPS 使用之地心或橢圓系統中描述之地形並不適合作為一般民生之用（史天元，2005），本研究將解算後所得的 TWD97（X, Y, Z）地心坐標以內政部提供之 MTWDCON 坐標轉檔程式轉換成 TWD97(N, E, H) 區域地平坐標，維持高程向的認知，但也須將平面及高程分離定義。而橢球高與正高間的關聯可用（3-1 式）表示：

$$H = h - N \quad (3-1)$$

其中

H：大地水準面高程(正高)

h：橢球面高程

N：大地起伏

水準測量使用的正高系統具有物理意義，而監測地層下陷時所使用的是兩不同時間高程值的相對值 $\Delta d$ 記錄變化量，如(3-2式)：

$$\Delta d = \text{height}_{t_2} - \text{height}_{t_1} \quad (3-2)$$

其中

$\Delta d$ ：兩不同時間高程變化；

$\text{height}_{t_1}$ ：在  $t_1$  時刻之高程值；

$\text{height}_{t_2}$ ：在  $t_2$  時刻之高程值。

若以兩不同時間水準測量得正高變化量 $\Delta H$ 代表地表的高程變化量 $\Delta d$ ，則可將(3-1式)代入成為(3-3式)：

$$\begin{aligned} \Delta d &= \Delta H = (H_2 - H_1) = (h_2 - h_1) - (N_2 - N_1) \\ &= \Delta h - \Delta N \end{aligned} \quad (3-3)$$

在小範圍區域內之大地起伏變化量甚小，若假設 $\Delta N = 0$ ，則 $\Delta d = \Delta H = \Delta h$ ，利用兩時間的水準測量高程相對值和 GPS 測量高程相對值即可互相比較。

### 3-3-2 地層下陷監測井

在地下水超抽地區，由於地下水補注不及會造成水位的下降，進而引起地層壓縮變形。利用地層下陷監測井可掌握地下水位的變化以及各個深度之地層壓縮量，監測地層之壓縮行為及特性，提供地層下陷最直接的驗證資料。本區域地層下陷井深度皆達 300 公尺，利用監測井的感應環可得各深度的壓縮情形，並可與地表高程測量成果相互比對地層壓縮與地表下陷之關聯，若以監測井壓縮量觀測到的下陷量比地表高程測量觀測而

得知下陷量少的話，則表示地層下陷壓縮層位於比監測井更深之處無法觀測到，所以地層下陷監測井雖可觀測地表以下之地層變化情況，但若有地表高程測量成果之輔助，則可獲得更多資訊，其中水準測量施測成本較高觀測頻率次數少，因此通常以可長期且高頻率觀測之 GPS 測量作為輔助地層下陷監測井之數據。

比較壓縮量與 GPS 高程測量之較差成果，如表 3-5，在 CHSG 站顯示出 GPS 觀測地表下陷量要比地層下陷井觀測下陷量少 0.5 公分，可能成因是在比地層下陷井可觀測深度之下的地層產生回彈作用，或是量測誤差使地表下陷量少於地層下陷井的壓縮量；而 TKJS 站的 GPS 觀測地表下陷量比地層下陷井觀測量多 2.9 公分，顯示在更深層處仍發生地層下陷壓縮現象。

表 3-5、地層下陷監測井壓縮量與 GPS 高程變化量比較（經濟部水利署，2008）

測站	地層下陷監測井 壓縮量(cm)	GPS 測量高程變化 量 $\Delta h$ (cm)	壓縮量與高程變化 較差(cm)	期距 (西元年/月)
CHSG	-0.9	-0.40	0.5	2007/12-2008/12
KTES	-3.3	-4.42	-1.1	2007/12-2008/12
LNJS	--	-0.39	--	--
TKJS	-3.7	-6.63	-2.9	2007/12-2008/12
YSSL	-1.9	-2.46	-0.6	2007/12-2008/12

## 四、實驗方法及成果分析

### 4-1 Bernese 5.0 計算方法

本研究使用瑞士伯恩大學天文研究所 (Institute of Astronomy, University of Bern) 發展之 Bernese 5.0 處理 GPS 觀測資料，使用美國 IGS (The International GNSS Service) 提供之精密星曆，以 PKGM 站為中心點組成放射狀基線網，固定 TNML 站坐標為相對定為基準站解算，而 Bernese 5.0 在各項改正模式策略，如表 4-1。

表 4-1、Bernese 5.0 對各項誤差改正策略 (鍾易達, 2005)

誤差來源	誤差種類	Bernese 5.0 處理策略
衛星相關誤差	軌道誤差	採用 IGS 公佈之精密星曆
	衛星時鐘誤差	組成一次差觀測量消除
訊號傳播相關誤差	對流層延遲誤差	標準模式與附加修正參數模式同步改正
	電離層延遲誤差	以 L3 二次差觀測量去除之
接收儀相關誤差	天線相位中心變化	採用 IGS 公佈之相位中心率定修正值
	接收儀時鐘誤差	組成二次差觀測量消除
	整數週波未定值求解	以 QIF 法(Quasi Iono. Free)搜尋整數解
	週波脫落	以三次差觀測量進行偵測與補償
測站位置	測站坐標誤差	網形平差套合至 TWD97 之坐標

而本研究使用解算方法步驟，如圖 4-1，概述如下：

- (1) <RXOBV3> 將原始之 RINEX 格式觀測資料檔轉換成 Bernese 軟體格式。
- (2) <PRETAB> 將 IGS 精密星曆配合地球自轉參數轉成表列式衛星軌道資訊 (Tabular Orbit) 及衛星時鐘資訊，再建立標準衛星軌道 (Standard Orbits)。
- (3) <CODSPP> 以 C/A 及 P 電碼觀測量進行單點定位，估算出接收儀時鐘改正並寫入相位觀測量之中。
- (4) <SNGDIF> 以 PKGM 為中心組成星狀基線網，產生相位一次差觀測量。
- (5) <MAUPRP> 利用三次差觀測量偵測及補償週波脫落 (Cycle Slip)。

- (6) <GPSEST> 以二次差觀測量進行殘差估計、求解週波未定值、估計各項相關參數、以及求得最終坐標定位解。

最後再將解算得到 TWD97 (X, Y, Z) 地心坐標解，利用內政部提供之 MTWDCON 坐標轉檔程式轉成 TWD97 (N, E, H) 區域地平坐標，將高程方向及水平方向獨立分析探討。

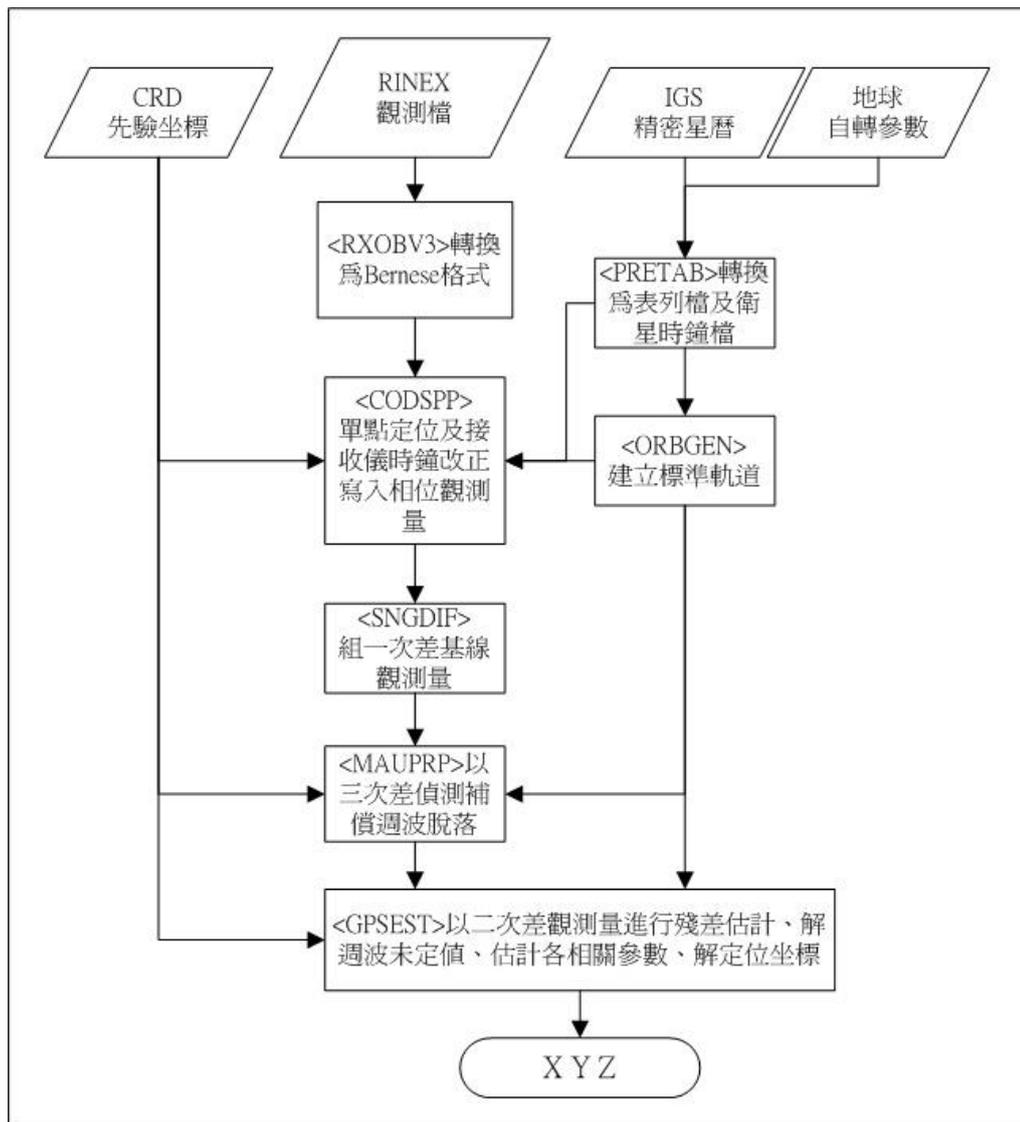


圖 4- 1、Bernese 5.0 軟體解算衛星資料流程

#### 4-2 應用 ZWD 實測值於參數估計

曾佩莉 (2004) 在解算可降水量時提到推演流程，利用 Huan 模式 (WVR 觀測) 推估得到的 ZWD，加上 Saastamoinen 數學模式估計 ZHD，兩者相加可獲得 ZTD，在短基線情況下能有較好的觀測品質，且克服了短基線求解 GPS 無法獲得絕對對流層延遲量。

在 2-5 節中的 (2-18) 式提到參數估計法中的天頂向總延遲量估計參數，包含了氣象參數導入數學經驗模式得到的先驗對流層初始值，以及用 GPS 二次差分觀測量約制平差的改正量為修正值。若數學經驗模式求解之先驗對流層初始值可得到準確之 ZHD，那麼先驗值的改正量在物理意義上即幾乎可代表為 ZWD。按此意義可設計以下實驗，由標準氣象模式代入數學經驗模式得到先驗對流層初始值代表 ZHD，再利用 PKGM 站 WVR 實測反演而得的 ZWD 觀測量為改正量，其餘各站以與 PKGM 之參數估計相對差值加上 ZWD 觀測值作為改正量，來預估出整日每小時一個共 24 個批次參數導入計算對於解算高程之影響，不論標準氣象模式或 WVR 實測值皆使用 Wet\_Niell 濕延遲映射函數，觀測解算時間為 2007 年第 326 天至 328 天，實驗流程如圖 4-2。使用約制法時做參數估計時，固定 TNML 站解算 (Corr\_Fix) 或是以約制各追蹤站方法 (Corr\_Constrained) 所得的改正量 (ZWD 估計量) 如圖 4-3，成果在公分量級以內，因此僅以固定 TNML 之解比較。



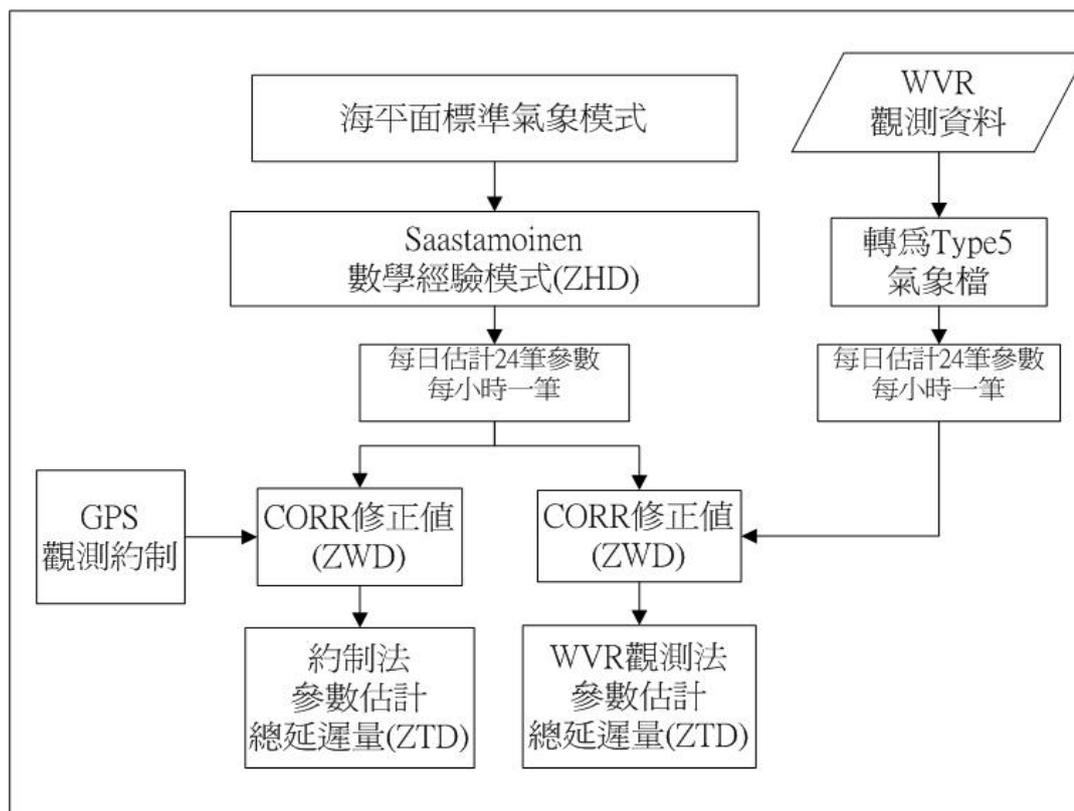


圖 4-2、應用實測 ZWD 於參數估計實驗流程

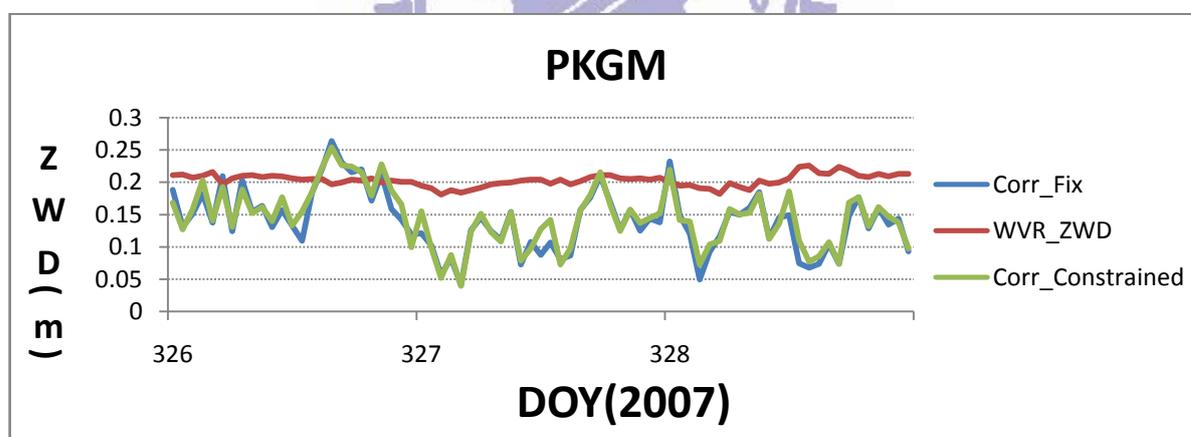


圖 4-3、2007 年 PKGM 站對流層天頂向總延遲量(DOY326-328)

成果如圖 4-4，加入了實際觀測之 ZWD 為改正量，降低了各站高程坐標的均方根誤差，如附表 2-1，但會使高程向定位坐標之離散程度加大，可能是由於參數估計中計算得到之改正量尚包含 ZHD 的估計誤差及其它例如時鐘誤差、軌道誤差及多路徑效應等，最主要的原因可能是需要有更適用於 ZWD 實際觀測的映射函數來得到各仰角衛星觀測值更好的修正量。

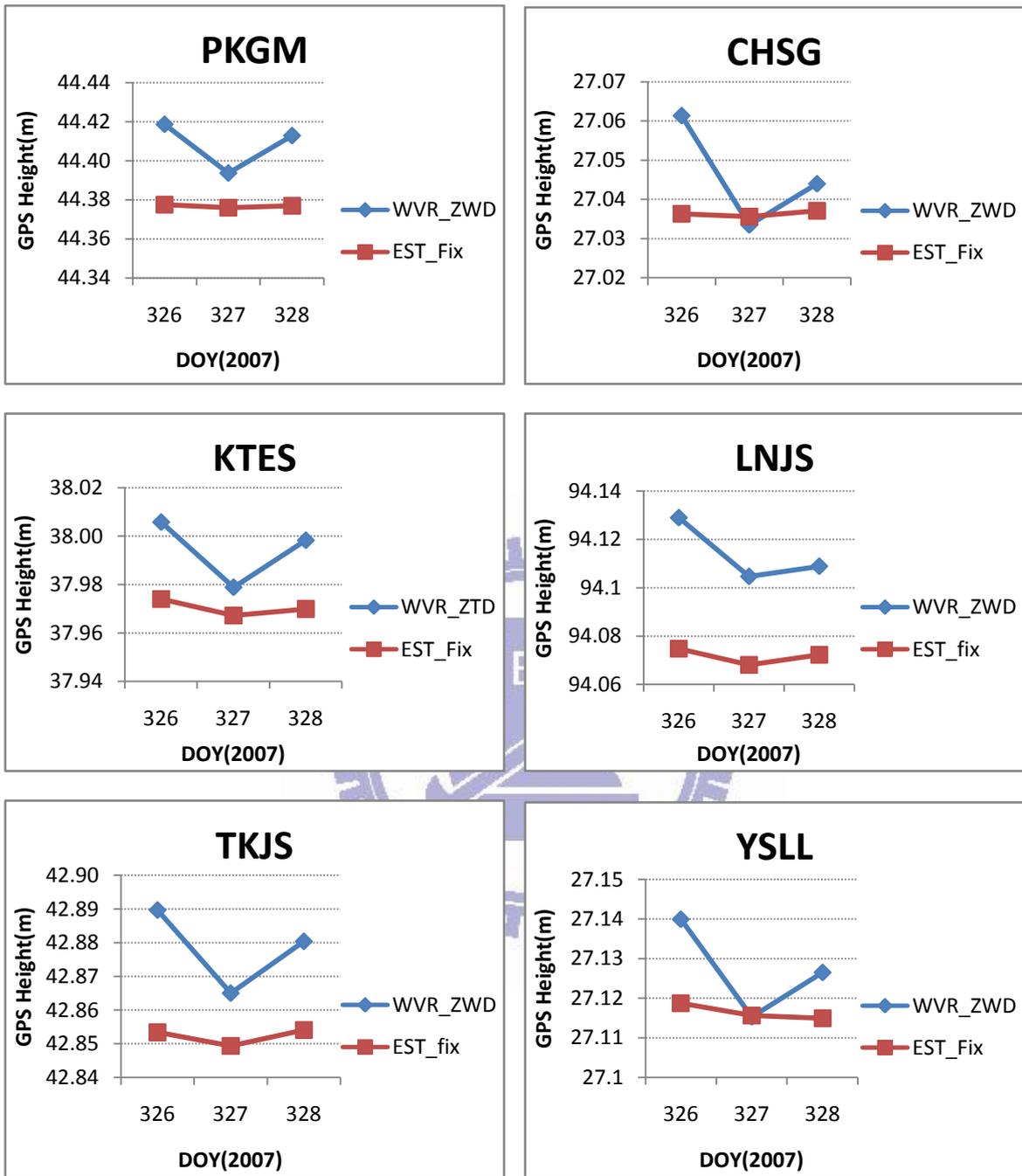


圖 4- 4、ZWD 觀測值代替約制參數估計修正值高程坐標比較

### 4-3 加入氣象觀測資料分析

本研究使用兩種氣象觀測儀器，包括地面氣象儀器及水氣微波輻射儀。地面氣象儀器型號為 MET3-A，可量測地表溫度、相對濕度及大氣壓力值，地面氣象觀測值不足以代表實際 GPS 訊號通過對流層剖面處，不能當作為真值，但仍然具有實際觀測的參考性。

Bernese 軟體使用海平面標準氣象模式（高程 0 公尺處，溫度 18°C、相對濕度 50%、壓力 1013.25mB）推估不同高度之點位的氣象值，加入至所選擇的對流層數學模式中，所以相同測站的對流層先驗初始值在每個時間的估計量都會相同；而地面氣象觀測檔可以取代利用標準氣象值推估得到的氣象參數，進而產生較佳的對流層先驗初始值及修正值，使對流層數學模式估計值更能接近真實環境。

此外也加入了水氣微波輻射儀觀測資料，可觀測垂直對流層剖面變化的。本實驗使用內政部 PKGM 站 WVR 觀測資料，轉換成 MET type5 格式檔案為外部修正方法，配合參數估計作為處理對流層之策略。在陳彥杖（2008）及王傳盛（2009）研究顯示，不使用參數估計修正殘餘誤差，唯獨信賴氣象觀測儀可完全修正對流層延遲的方法，對於高程成果穩定性並無幫助，因此本實驗流程中導入外部資料將會使用參數估計法來吸收殘餘誤差。

計算成果分為標準氣象、地表氣象、濕延遲觀測三組，地表氣象組加入了五個水利署 GPS 追蹤站之地表氣象觀測數據，濕延遲觀測組則使用內政部 PKGM 站 WVR 觀測數據，實驗流程如圖 4-5。因為並非每個點位皆有地表氣象觀測資料，這些點位是利用無地表氣象觀測資料時的參數估計值代替，附表 1-2 為各站氣象資料蒐集天數，已檢查氣象原始檔案屏除儀器異常量測之數據。

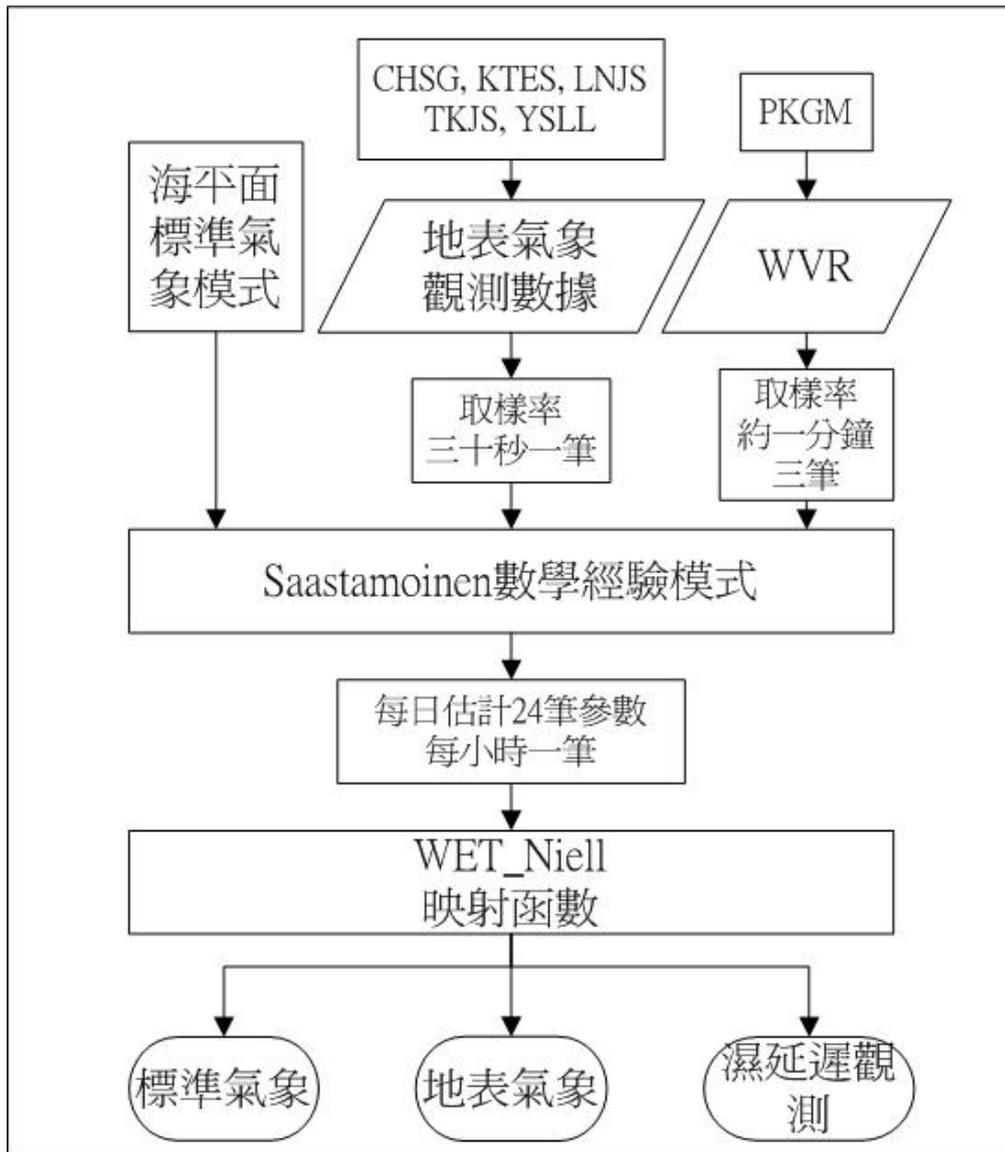


圖 4-5、加入氣象觀測資料分析流程

對於 GPS 觀測量之對流層延遲，Dach et al. (2007) 建議處理策略是使用海平面標準氣象參數代入數學模式，與附加參數估計同步改正。本實驗一方面探討以實際測量之地表氣象資料來產生較佳的數學經驗模式估計對流層先驗初始值，是否對於高程定位成果有所幫助；另一方面則利用 WVR 實測 ZWD 和地表氣象資料配合評估氣象觀測對於三維坐標解算的影響。

#### 4-3-1 三維坐標成果

水利署五站及內政部 PKGM 站採用標準氣象、地表氣象及濕延遲觀測三組之高程坐標解算平均值及標準差之成果，如表 4-2 及表 4-3；水平坐標解算成果平均值及標準差，如表 4-4 及表 4-5；各站的平面及高程計算成果趨勢列於附錄三、四、五。其中相對定位中固定坐標的 TNML 站資料完整天數為 347 天，放射狀基線網中心點 PKGM 站資料完整天數為 361 天，兩站皆有完整資料的日數才能計算正常之網形解，而其共同完整天數為 308 天。

表 4-2、氣象觀測 GPS 高程平均值比較

測站	標準氣象組		地表氣象組		濕延遲觀測組	
	高程平均值(m)	標準差(cm)	高程平均值(m)	標準差(cm)	高程平均值(m)	標準差(cm)
CHSG	27.0249	1.082	27.0290	0.869	27.0215	0.941
KTES	37.9467	2.088	37.9489	2.002	37.9335	1.092
LNJS	94.0725	0.690	94.0762	0.746	94.0756	0.834
TKJS	42.8188	2.675	42.8223	2.491	42.8005	1.321
YSLI	27.1057	1.174	27.1080	1.078	27.1032	1.050
PKGM	44.3670	1.235	44.3670	1.228	44.3740	1.040

表 4-3、高程成果與標準氣象組較差

測站	地表氣象組		濕延遲觀測組	
	高程平均值(cm)	標準差(cm)	高程平均值(cm)	標準差(cm)
CHSG	0.41	-0.213	-0.34	-0.141
KTES	0.22	-0.086	-1.32	-0.996
LNJS	0.37	0.056	0.31	0.144
TKJS	0.35	-0.184	-1.83	-1.354
YSLI	0.23	-0.096	-0.25	-0.124
PKGM	0	-0.007	0.70	-0.195

使用海平面標準氣象模式的標準氣象組為對照組，成果顯示導入地表氣象實測資料後，地表氣象組定位高程會與標準氣象組產生 0.23-0.41 公分的高程上升差異，而 PKGM 站因為並無地表氣象資料，高程與標準氣象組並無差距；比較 WVR 濕延遲觀測組與標準氣象組則無明顯的高程向平移趨勢，差異最大為 TKJS 站達到-1.83 公分。

比較標準差較差值，除 LNJS 站標準差值在加入兩種氣象數據後皆呈現上升以外，其餘各站都降低了。而濕延遲觀測組在 KTES 站標準差降低了 0.996 公分，TKJS 站降低了 1.354 公分，差異較大。

表 4-4、氣象觀測 GPS 水平方向平均值比較

測站		標準氣象組		地表氣象組		濕延遲觀測組	
		水平方向 平均值(m)	標準 差 (cm)	水平方向 平均值(m)	標準 差 (cm)	水平方向 平均值(m)	標準 差 (cm)
CHSG	N	2639738.8299	0.235	2639738.8299	0.236	2639738.8297	0.285
	E	177597.1943	0.214	177597.1943	0.211	177597.1945	0.261
KTES	N	2613831.6105	0.226	2613831.6105	0.230	2613831.6113	0.240
	E	182074.4218	0.164	182074.4218	0.165	182074.4211	0.187
LNJS	N	2628221.5742	0.350	2628221.5742	0.353	2628221.5758	0.335
	E	208427.5656	0.284	208427.5655	0.283	208427.5633	0.280
TKJS	N	2620603.7307	0.213	2620603.7307	0.220	2620603.7309	0.244
	E	187770.1576	0.185	187770.1576	0.185	187770.1574	0.199
YSSL	N	2626354.2556	0.248	2626354.2556	0.252	2626354.2538	0.273
	E	170718.7605	0.282	170718.7605	0.283	170718.7611	0.239
PKGM	N	2608670.7232	0.233	2608670.7232	0.237	2608670.7230	0.275
	E	179111.8878	0.139	179111.8878	0.141	179111.8877	0.193

表 4-5、水平成果與標準氣象組較差

測站		地表氣象組		濕延遲觀測組	
		水平方向 平均值 (cm)	標準差 (cm)	水平方向 平均值 (cm)	標準差 (cm)
CHSG	N	0.00	0.001	-0.02	0.050
	E	0.00	-0.003	0.02	0.047
KTES	N	0.00	0.004	0.08	0.014
	E	0.00	0.001	-0.07	0.023
LNJS	N	0.00	0.003	0.16	-0.015
	E	-0.01	-0.001	-0.23	-0.004
TKJS	N	0.00	0.007	0.02	0.031
	E	0.00	0.000	-0.02	0.014
YSLI	N	0.00	0.004	-0.18	0.025
	E	0.00	0.001	0.06	-0.043
PKGGM	N	0.00	0.004	-0.02	0.042
	E	0.00	0.002	-0.01	0.054

以標準氣象組為對照組做較差比較，地表氣象組對於水平坐標解幾乎沒有影響，標準差差距達 mm 等級以下；濕延遲觀測組除 LNJS 站的 NE 兩方向及 YSLI 站的 E 方向標準差降低最多達 0.043cm，其餘皆呈現增加情況，差距最大為 PKGGM 站 E 方向之 0.054cm，加入氣象資料對水平方向影響量皆不超過 1mm。

#### 4-3-2 基線成果

本實驗探討位於濁水溪沖積扇區域，以 PKGGM 為中心組成之放射狀基線網，並以其中五條基線變化了解相對形變，包括 PKGGM-CHSG (31km)、PKGGM-KTES (6km)、PKGGM-LNJS (35km)、PKGGM-TKJS (14km)、PKGGM-YSLI (19km)。基線長度計算平均如表 4-6；再比較各基線成果標準差如圖 4-6，加入 WVR 資料後的標準差值，除了 PKGGM-YSLI 變小外其餘都些微上升，但都在 mm 量級以內。各基線較差及均方根比較如表 4-7，加入地表氣象實測資料之基線平均長度比海平面標準氣象模式解算長，但

影響在公分以內；加入 WVR 資料後，在 PKGM-KTES 及 PKGM-TKJS 平均長度影響為 -1.32 公分及 -1.83 公分，均方根誤差達 -0.996 公分及 -1.354 公分左右，但對其它基線影響較小。

表 4-6、基線計算成果比較

測站	標準氣象組		地表氣象組		濕延遲觀測組	
	基線長平 均值(m)	標準差 (cm)	基線長平 均值(m)	標準差 (cm)	基線長平 均值(m)	標準差 (cm)
PKGM-CHSG	31105.0132	0.209	31105.0132	0.207	31105.0133	0.263
PKGM-KTES	5950.7483	0.118	5950.7483	0.115	5950.7490	0.126
PKGM-LNJS	35237.0147	0.122	35237.0147	0.121	35237.0140	0.243
PKGM-TKJS	14743.2121	0.147	14743.2121	0.146	14743.2124	0.159
PKGM-YSSL	19574.2740	0.266	19574.2740	0.267	19574.2724	0.221

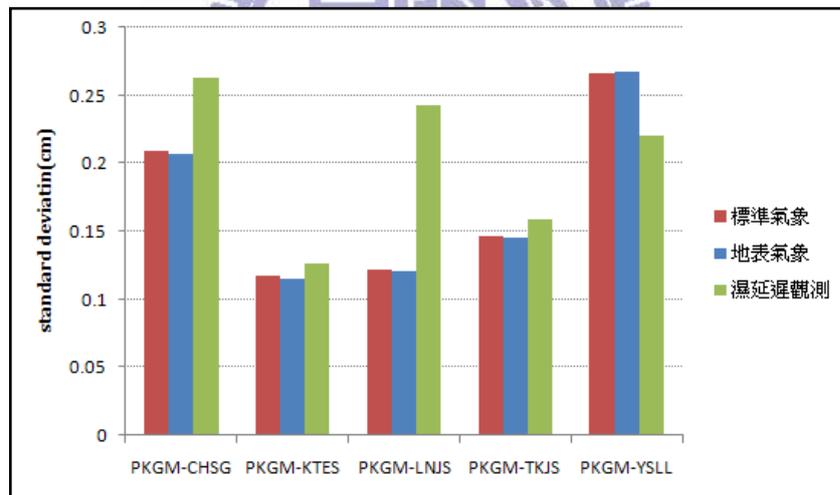


圖 4-6、基線計算成果標準差比較

表 4-7、基線成果與標準氣象組較差

測站	地表氣象組		濕延遲觀測組	
	基線平均 長度較差 (cm)	均方根誤 差 rms (cm)	基線平均 長度較差 (cm)	均方根誤 差 rms (cm)
PKGM-CHSG	0.00	1.85	0.01	2.78
PKGM-KTES	0.00	0.89	0.07	2.80
PKGM-LNJS	0.00	2.74	-0.07	4.10
PKGM-TKJS	0.00	1.37	0.03	3.15
PKGM-YSL	0.00	1.88	-0.16	2.91

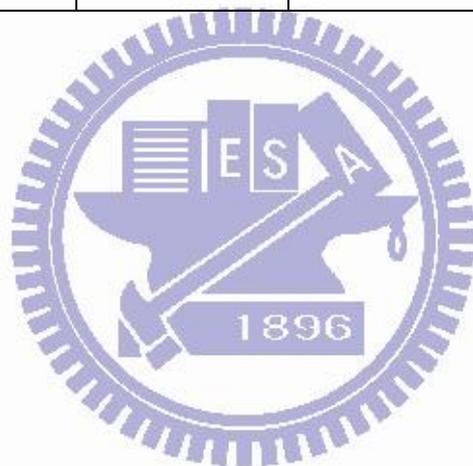
#### 4-4 地層下陷影響及水平位移變化分析

本研究 GPS 觀測資料共 426 日，此階段分析為了比較各測站解算之坐標位移量，以解算第一週（2007/11/2-2007/11-8）平均坐標及最後一週（2008/12/25-2008/12/31）平均坐標相減，得到觀測期間內的測站位移情況，但由於 WVR 觀測資料從 2007/11/22 開始，第一週以（2007/11/22-2007/11/25）平均坐標與最後一週（2008/12/25-2008/12/31）平均坐標相減，如表 4-8。

高程坐標變化方面，與標準氣象組比較，地表氣象組在 CHSG 站及 LNJS 站分別出現-0.37 公分及-0.19 公分的差距，其餘高程坐標變化量幾乎與標準氣象組相符；而濕延遲觀測組成果則與地表氣象組差距在 0.4 公分之內，顯示在求解相對高程坐標變化趨勢時，加入外部氣象觀測值對於成果影響不大。在地層下陷監測方法的互相比對，高程水準測量並無計算相同時間段之 GPS 測量資料可與高程水準測量相互驗證，僅可得到不同時段測站下陷量的差異。使用工業技術研究院監測成果，比較地層下陷監測井壓縮量及 GPS 測量高程變化量，與本研究解算之觀測期間下陷量大致相符。其中 LNJS 站未在地層下陷區域內，因此高程變化量較小，而 CHSG 則可由監測井壓縮量大於地表 GPS 高程下陷量，觀測到下陷情況有趨緩的現象。

表 4-8、各測站 GPS 觀測高程坐標變化與工業技術研究院監測成果比較

測站	高程坐標變化(cm)			工研院成果(cm)	
	標準氣象組	地表氣象組	濕延遲觀測組	地層下陷 監測井 壓縮量	GPS 測量 高程 變化量
CHSG( $\Delta h$ )	-0.36	0.01	0.03	-0.9	-0.40
KTES( $\Delta h$ )	-4.29	-4.28	-3.94	-3.3	-4.42
LNJS( $\Delta h$ )	-0.01	0.18	0.25	--	-0.39
TKJS( $\Delta h$ )	-6.19	-6.19	-5.81	-3.7	-6.63
YSLL( $\Delta h$ )	-2.42	-2.43	-2.04	-1.9	-2.46
PKGGM( $\Delta h$ )	-0.84	-0.83	-0.72	--	--



在水平坐標變化比較成果如表 4-9 及表 4-10，地表氣象組和標準氣象組非常的接近，兩組之水平坐標變化除 CHSG 站往東南方移動外，其餘各站水平坐標變化都是往西南方向；濕延遲觀測組則有 CHSG 站、TKJS 站、YSSL 站往東南方，PKGM 站往東北，KTES 站、LNJS 站往西南方移動的趨勢，不過水平位移都在公分級以下。

表 4-9、各測站 GPS 觀測水平坐標變化比較

測站	水平坐標變化(cm)		
	標準氣象組	地表氣象組	濕延遲觀測組
CHSG( $\Delta N$ )	-0.57	-0.57	-0.57
CHSG( $\Delta E$ )	0.38	0.38	0.62
KTES( $\Delta N$ )	-0.10	-0.10	-0.08
KTES( $\Delta E$ )	-0.25	-0.26	-0.04
LNJS( $\Delta N$ )	-0.13	-0.13	-0.05
LNJS( $\Delta E$ )	-0.3	-0.31	-0.17
TKJS( $\Delta N$ )	-0.35	-0.34	-0.34
TKJS( $\Delta E$ )	-0.10	-0.11	0.08
YSSL( $\Delta N$ )	-0.82	-0.81	-0.78
YSSL( $\Delta E$ )	0.11	-0.10	0.28
PKGM( $\Delta N$ )	-0.20	-0.19	0.24
PKGM( $\Delta E$ )	-0.10	-0.11	0.11

表 4- 10、各測站 GPS 觀測水平位移距離及方向

測站	水平位移距離(cm)及方向		
	標準氣象組	地表氣象組	濕延遲觀測組
CHSG	0.69(SE)	0.69(SE)	0.71(SE)
KTES	0.27(SW)	0.28(SW)	0.09(SW)
LNJS	0.33(SW)	0.34(SW)	0.18(SW)
TKJS	0.36(SW)	0.36(SW)	0.35(SE)
YSSL	0.83(SW)	0.82(SW)	0.83(SE)
PKGM	0.22(SW)	0.22(SW)	0.26(NE)

若以三維方向標準差與高程下陷量相互比較，如表 4-11 及圖 4-7，高程下陷量為標準氣象組之成果。以標準氣象組為對照組資料，濕延遲觀測組之高程方向標準差，在下陷速度較快的 KTES 站及 TKJS 站，KTES 站從 2.088cm 降低至 1.092cm，TKJS 站從 2.675cm 降低至 1.321cm，位於非下陷區的 LNJS 站標準差從 0.690cm 微幅的上升至 0.834cm，其餘 CHSG 站、YSSL 站、PKGM 站標準差則微幅的下降。在水平方向標準差方面，濕延遲觀測組成果除了 LNJS 站及 YSSL 站的 E 方向外，標準差也較標準氣象組些微的增加，歸因於原本坐標穩定的測站，加入濕延遲觀測資料後使成果增加差異性；而測站如果坐標位移較大，則 WVR 的濕延遲觀測測量將可吸收其變異量。

表 4- 11、三維方向標準差與下陷量(單位：cm)

高程下陷量(標準氣象)	標準差 測站	標準氣象組			地表氣象組			濕延遲觀測組		
		N	E	H	N	E	H	N	E	H
-0.36	CHSG	0.235	0.214	1.082	0.236	0.211	0.869	0.285	0.261	0.941
-4.29	KTES	0.226	0.164	<b>2.088</b>	0.230	0.165	2.002	0.240	0.187	<b>1.092</b>
-0.01	LNJS	0.350	0.284	0.690	0.353	0.283	0.746	0.335	0.280	0.834
-6.19	TKJS	0.213	0.185	<b>2.675</b>	0.220	0.185	2.491	0.244	0.199	<b>1.321</b>
-2.42	YSSL	0.248	0.282	1.174	0.252	0.283	1.078	0.273	0.239	1.050
-0.84	PKGM	0.233	0.139	1.235	0.237	0.141	1.228	0.275	0.193	1.040

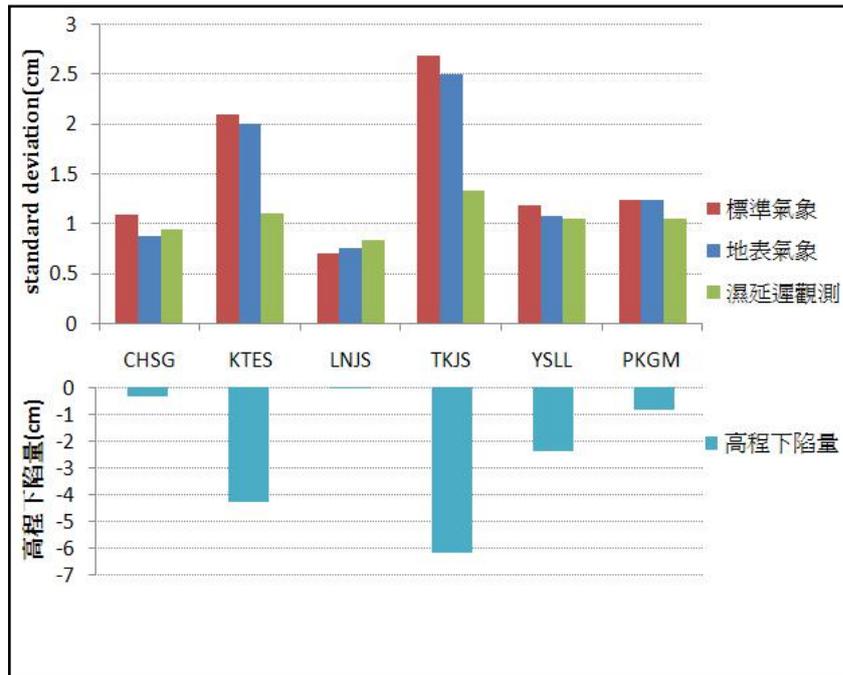


圖 4-7、高程標準差與下陷量比較



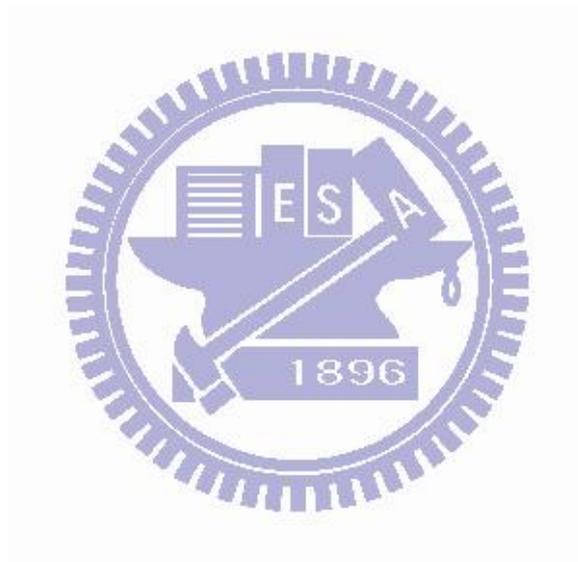
## 五、結論與建議

本研究對水氣微波輻射儀所在之北港為中心及濁水溪沖積扇的五個水利署追蹤站，使用 GPS 靜態基線網定位，求解高程及平面坐標，並分析基線向量變化，以及研究時間區段之高程及水平坐標變化量，本研究以標準氣象、地表氣象、濕延遲觀測三種對流層延遲量處理策略進行成果比較與分析，結論與建議如下：

1. 加入濕延遲觀測值於參數估計之實驗，可使各測站之均方根誤差降低，但高程坐標離散程度也隨之變大。將濕延遲觀測量當作先驗對流層初始值的改正量時，僅處理了濕延遲量的估計，但其餘的誤差並未經由改正量來吸收消除，因此高程解算結果並未改善。
2. 以標準氣象組為對照組，比較濕延遲觀測組，KTES 及 TKJS 站之高程標準差分別由 2.088 公分及 2.675 公分降低至 1.092 公分及 1.321 公分，但水平方向標準差上升約 0.02 公分，部分水平精度的降低可使下陷程度較嚴重處之高程定位穩定度提升。而 KTES 及 TKJS 站高程變化，分別由 -4.29 公分及 -6.19 公分降低至 -3.94 公分及 -5.81 公分，換言之使用 GPS 導入外部氣象改正原先期望高程方向敏感度提高，但成果使高程方向的長期變化趨勢變小。
3. 海平面標準氣象模式是以固定的氣象參數導入數學經驗模式中，因此估計對流層參數會是穩定的數值，較貼近穩定的氣候環境，如果氣候條件變異性很大則會增加估計上的誤差，因此導入實際氣象觀測值有其助益。但為維持高程穩定度上的成果而使用參數估計法產生的修正值，也同時將數學經驗模式之先驗初始值的差異量吸收，因此解算的成果與使用海平面標準氣象模式在靜態網形解算成果差異僅 0.23 公分至 0.41 公分。
4. 加入氣象觀測資料時，參數估計法會吸收氣象實際觀測資料的差異量，難以看出加入氣象觀測資料後之差異；若不使用參數估計法時，則必須相信對流層先驗延遲量已無估計延遲量之殘餘誤差，以及其餘觀測誤差的影響。而且氣象觀測資料在擁有

足夠的觀測精度之下，若可增加適當的前處理步驟，做適當的過濾取樣，可得到更佳的外部氣象觀測改正成果。

5. 由於 WVR 觀測資料必須轉換成 Type 5 的氣象檔導入 Bernese 軟體解算，在此步驟時需先將掃描各角度衛星所得氣象資料以理論及經驗公式反演為天頂方向濕延遲量，容易受到氣候變化影響而降低反演精度。在修正對流層誤差時又以映射函數將天頂向對流層延遲量轉換成至觀測衛星所在的各個仰角高度，如何選擇適合 WVR 氣象資料的映射函數也值得深入探討。

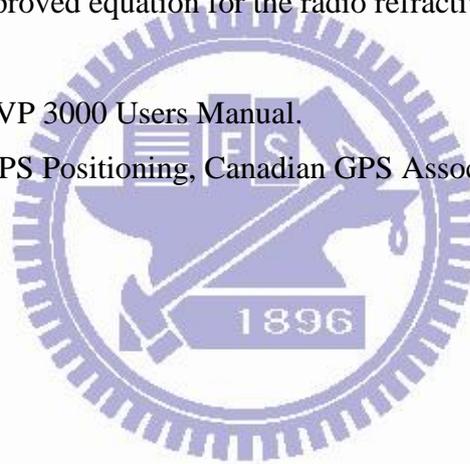


## 參考文獻

- 王承賢，2000。WVR、GPS 及氣球探空觀測可降水量之比較，國立中央大學碩士論文。
- 王傳盛，2005。利用地表氣象資料提升 GPS 衛星追蹤站定位精度，中央大學太空及遙測研究中心。
- 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，國立中央大學博士論文。
- 史天元，2005。以橢球系統進行測製再經正高化算生產地形圖討論，2005 年台灣地理資訊學會年會暨學術研討會論文集。
- 水利署，2001。台灣地區地層下陷之監測、調查及分析(1/4)計畫電子書，經濟部水利署。
- 水利署，2002。地下水觀測站井佈置檢討計畫電子書，經濟部水利署。
- 水利署，2008。GPS 固定站之規劃建置與觀測分析成果報告書，經濟部水利署。
- 李旭志，1999。GPS 接收儀天線多路徑效應之研究，國立交通大學碩士論文。
- 地層下陷防治資訊網。  
URL：<http://www.water.tku.edu.tw/sub91/>。
- 施永富，2002。測量學(第二版)，三民書局。
- 陳彥杅，2008。應用水氣輻射天頂延遲觀測量於 GPS 相對定位之研究，國立成功大學碩士論文。
- 陳春盛，2000。應用 WVR 及探空氣球資料於高精度 GPS 高程之研究，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。
- 曾珮莉，2004。近即時 GPS 觀測可降水技術之研究，國立中央大學碩士論文
- 曾清涼、儲慶美，1999。GPS 衛星測量原理與應用，成功大學衛星資訊研究中心。  
經濟部中央地調所，地質資料整合查詢網頁。  
URL：<http://www.moeacgs.gov.tw/app/index.jsp>。
- 鍾易達，2005。GPS 固定站觀測資料之驗證制度研究，國立交通大學碩士論文。
- Bauersima, I., 1983, NAVSTAR/Global Positioning System (GPS) II,  
Radioin-Terferometrische Satellitenbeobachtungen, Mitteilungen der  
Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald, Bern, vol 10.
- Beutler, G., I. Bauersima, W. Gurtner, M. Rothacher, T. Schildknecht, and A. Geiger, 1988,  
Atmospheric refraction and other important biases in GPS carrier phase observations, in  
Atmospheric Effects on Geodetic Space Measurements, Monograph 12, 15-43.

- 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-Atmospheres*, 97(D14), 15787–15801.
- Dach R., U. Hugentobler, P. Fridez. and M. Meindl, 2007, Bernese GPS Software Version 5.0, Institute of Astronomy, University of Bern.
- Davis, J. L., T. A. Herring, Shapiro, II, A. E. E. Rogers, and G. Elgered, 1985, Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length, *Radio Science*, 20(6), 1593–1607.
- Dodson, A. H., Shardlow, P. J., Hubbard, L. C. M., Dlgered, G., and Jarlemark, P. O. J.,1996, Wet Tropospheric Effects on Precise Relative GPS Height Determination, *Journal of Geodesy*, Vol. 70, 188-202.
- Elgered, G.,1993, Tropospheric radio-path delay from ground-based microwaveradiometry , in *Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry*, edited by M. A. JANSSEN, Wiley, New-York.
- Essen, L., and K.D. Froome , 1951, The refractive indices and dielectric constants of air and its principal constituents at 24 000 Mc/s, *Proceedings of Physical Society*, 64(B), 862-875.
- Hopfield, H.S., 1969, Two-quadratic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data, *Journal of Geophysical Research*, 74, 4487-4499.
- Ichikawa, R., M. Kasahara, N. Mannoji and I. Naito, 1995, Estimation of atmospheric excess path delay based on three dimensional numerical prediction model data, *Journal of the Geodetic Society of Japan*, 41(4), 379-408.
- Ichikawa, R., M. Sekido, and Y. Koyama, 2006 , A Software Package Development for Estimating Atmospheric Path Delay based on JMA Numerical Weather Prediction Model, *Uchu Kagaku Gijutsu Rengo Koenkai Koenshu*, Vol 50, 1-15.
- Janes, H.W., R.B. Langley, S.P Newby, 1991, A comparison of several models for the prediction of tropospheric propagation delay. In: *Proceedings of the Fifth International Geodetic Symposium on Satellite positioning*, Las Cruces, New Mexico, March 13-17, 2, 777-788
- Janes, H. W., R. B. Langley, and S. P. Newby, 1991, Analysis of tropospheric delay prediction models: comparisons with ray-tracing and implications for GPS relative

- positioning, *Journal of Geodesy*, 65(3), 151-161.
- 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.
- Mendes, V. B., and R. B. Langley, 1999, Tropospheric zenith delay prediction accuracy for high-precision GPS positioning and navigation, *Navigation*, 46(1), 25-34.
- Paroscientific, 1999. MET-3A datasheet.
- Pacione, R., E. Fionda, R. Ferrara, R. Lanotte, C. Sciarretta, and F. Vespe, 2002, Comparison of atmospheric parameters derived from GPS, VLBI and a ground-based microwave radiometer in Italy, *Physics and Chemistry of the Earth* 27 (2002) 309–316.
- Saastamoinen, J., 1973, Contributions to the theory of atmospheric refraction, *Bulletin Géodésique*, 47(1), 13-34.
- Thayer, G. D., 1974. An improved equation for the radio refractive index of air. *Radio Sci.*, 9: 803-807.
- Radiomatics, 2005. TP WVP 3000 Users Manual.
- Wells, D., 1987. Guide to GPS Positioning, Canadian GPS Associates.



附錄一

附表 1- 1、GPS 追蹤站坐標先驗值

測站	坐標先驗值			備註
	X	Y	Z	
工研院站(TNML)	-2982779.7692	4966663.9156	2658806.3895	Fixed
西港國小(CHSG)	-2943591.2034	5039544.1015	2564156.5111	—
客厝國小(KTES)	-2952829.6627	5046227.1876	2540466.3962	—
林內國中(LNJS)	-2972574.2811	5027919.6712	2553758.4769	—
土庫國中(TKJS)	-2956342.2304	5041014.3432	2546695.5751	—
新興國小(YSLI)	-2940439.8607	5047662.0668	2551879.4446	—
北港站(PKGM)	-2951342.3482	5049504.1312	2535725.7428	Ref. of star

測站	坐標先驗值			備註
	N	E	H	
工研院站(TNML)	2743399.0283	248720.4050	77.4553	Fixed
西港國小(CHSG)	2639740.0680	177597.4364	24.4810	—
客厝國小(KTES)	2613833.8804	182074.4875	34.9659	—
林內國中(LNJS)	2628224.0672	208427.5733	92.2727	—
土庫國中(TKJS)	2620606.2408	187770.2104	40.8855	—
新興國小(YSLI)	2626354.4208	170714.9950	33.2383	—
北港站(PKGM)	2608672.1050	179111.8857	40.8525	Ref. of star

附表 1- 2、測站氣象觀測資料天數(PKGM 為 WVR 資料)

測站	CHSG	KTES	LNJS	TKJS	YSLI	PKGM
完整資料天數	422	275	382	353	260	195

## 附錄二

附表 2-1、ZWD 觀測值代替約制參數估計修正值均方根誤差比較

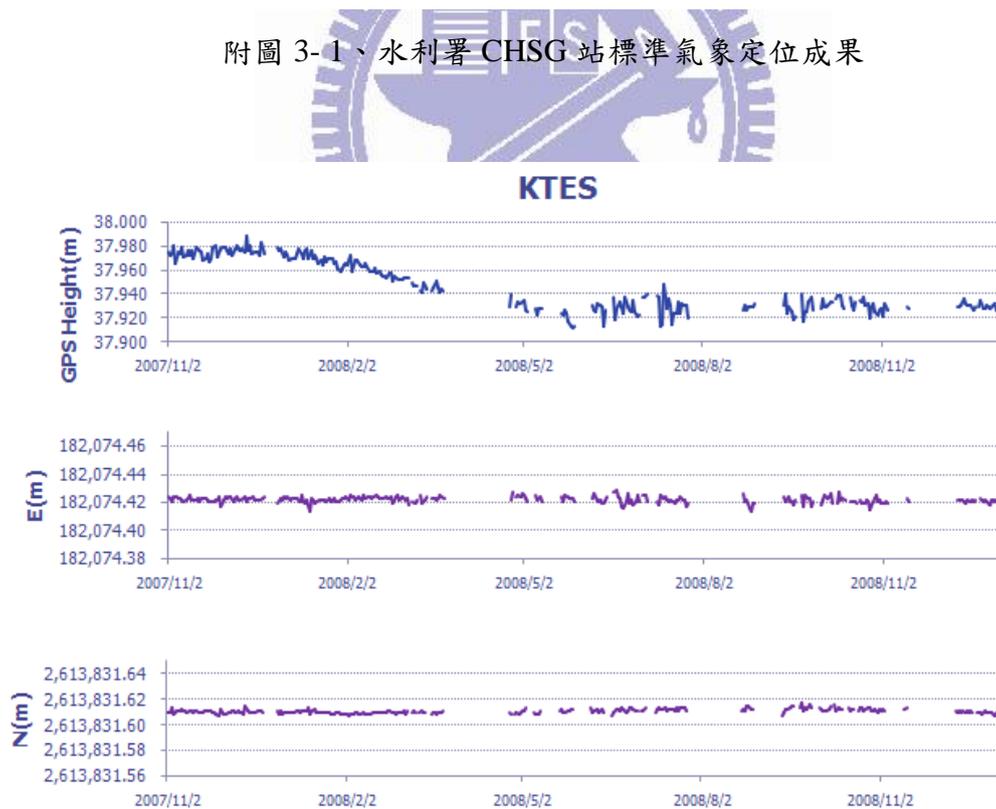
測站	約制參數估計修正值(cm)	ZWD 觀測值為修正值(cm)
DOY 326(2007)		
西港國小(CHSG)	0.16	0.08
客厝國小(KTES)	0.16	0.08
林內國中(LNJS)	0.18	0.08
土庫國中(TKJS)	0.17	0.08
新興國小(YSLI)	0.17	0.08
北港站(PKGM)	0.15	0.08
DOY 327(2007)		
西港國小(CHSG)	0.17	0.08
客厝國小(KTES)	0.17	0.08
林內國中(LNJS)	0.18	0.08
土庫國中(TKJS)	0.17	0.08
新興國小(YSLI)	0.17	0.08
北港站(PKGM)	0.15	0.08
DOY 328(2007)		
西港國小(CHSG)	0.18	0.08
客厝國小(KTES)	0.18	0.08
林內國中(LNJS)	0.19	0.09
土庫國中(TKJS)	0.19	0.09
新興國小(YSLI)	0.19	0.09
北港站(PKGM)	0.16	0.08

### 附錄三

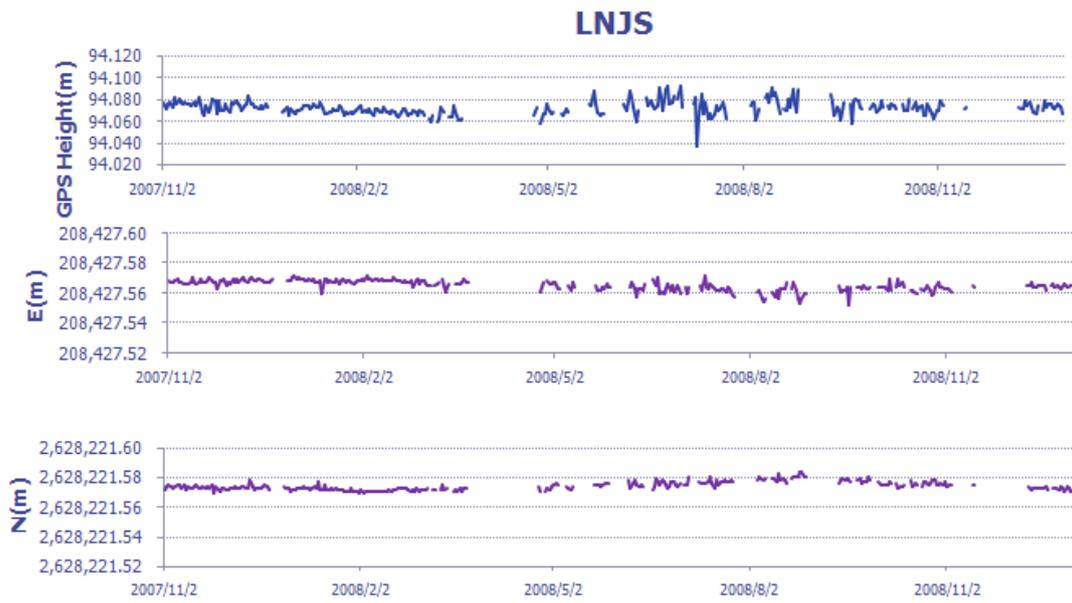
#### CHSG



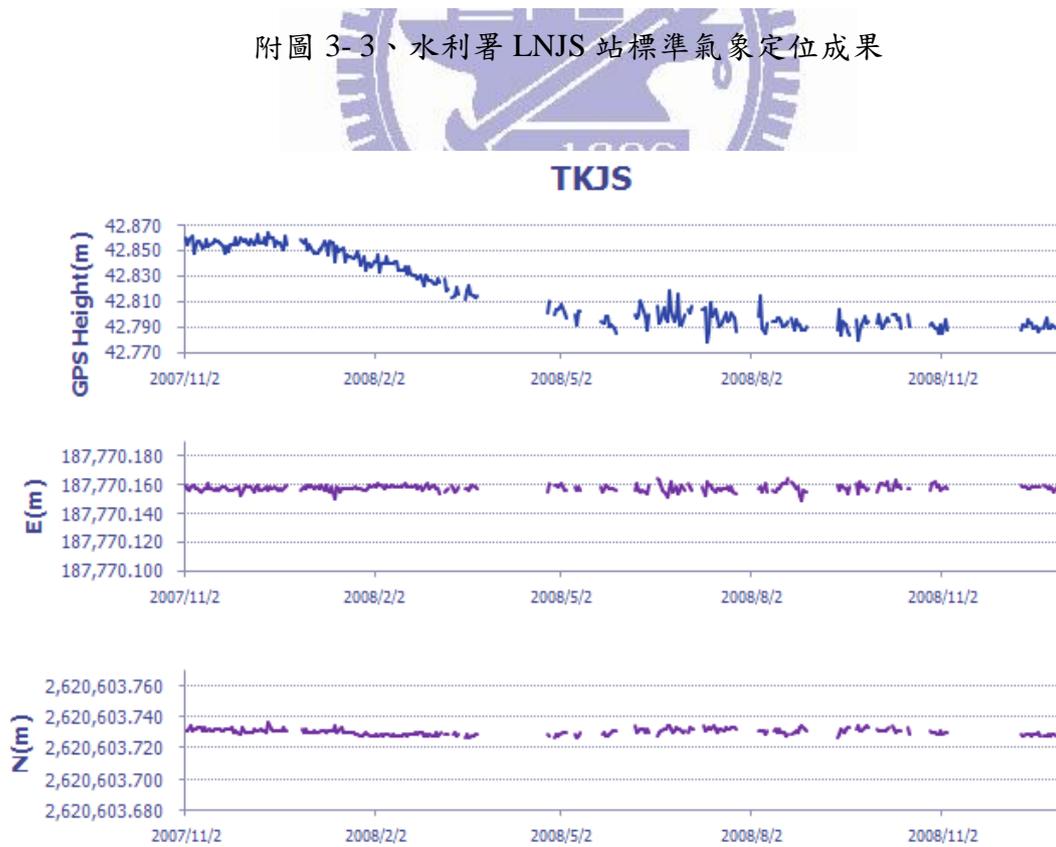
附圖 3-1、水利署 CHSG 站標準氣象定位成果



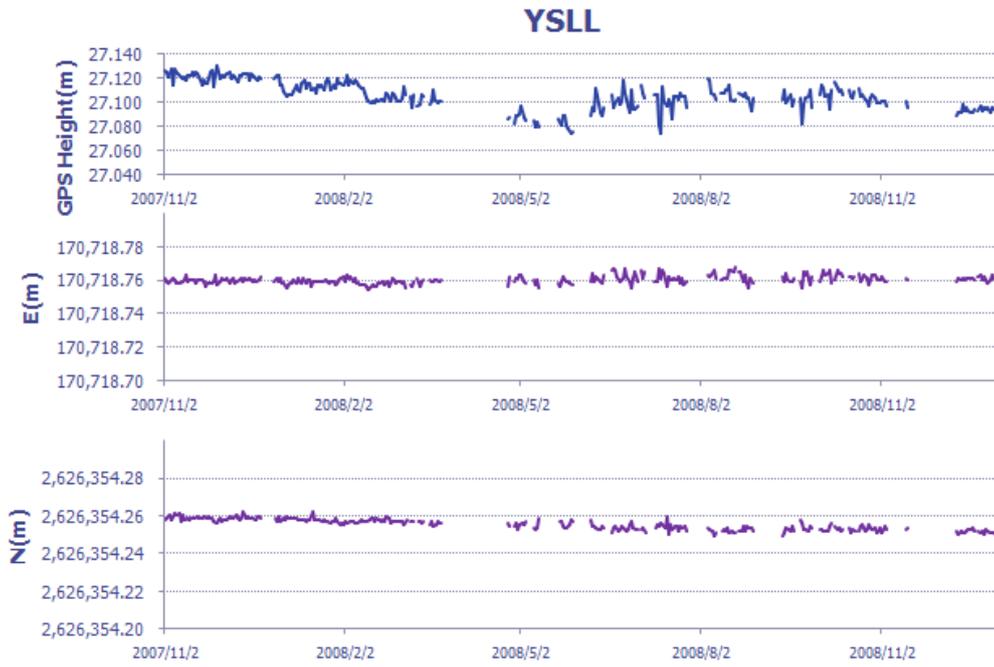
附圖 3-2、水利署 KTES 站標準氣象定位成果



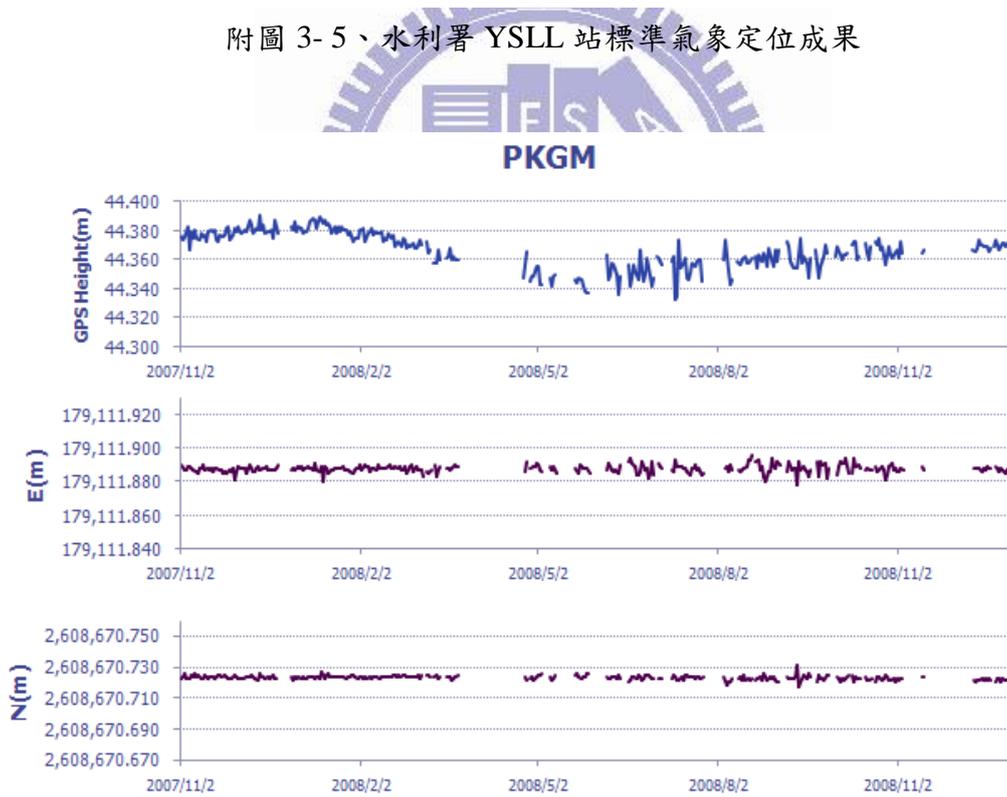
附圖 3-3、水利署 LNJS 站標準氣象定位成果



附圖 3-4、水利署 TKJS 站標準氣象定位成果



附圖 3- 5、水利署 YSLL 站標準氣象定位成果



附圖 3- 6、內政部 PKGM 站標準氣象定位成果

## 附錄四



附圖 4- 1、水利署 CHSG 站地表氣象高程成果



附圖 4- 2、水利署 KTES 站地表氣象高程成果



附圖 4- 3、水利署 LNJS 站地表氣象高程成果



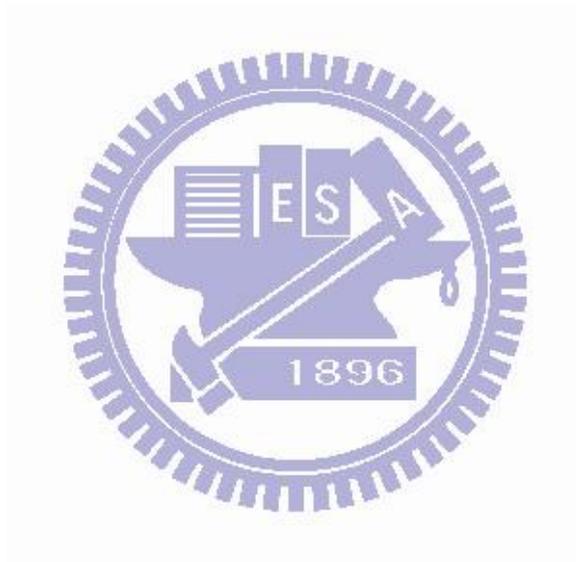
附圖 4- 4、水利署 TKJS 站地表氣象高程成果



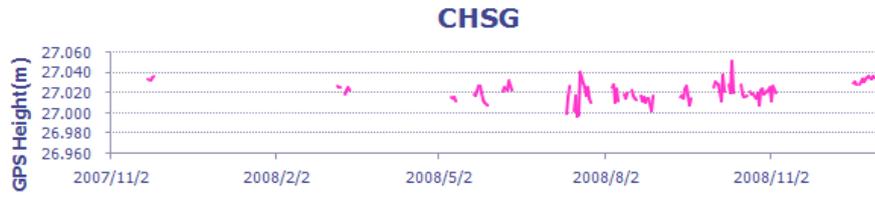
附圖 4- 5、水利署 YSL 站地表氣象高程成果



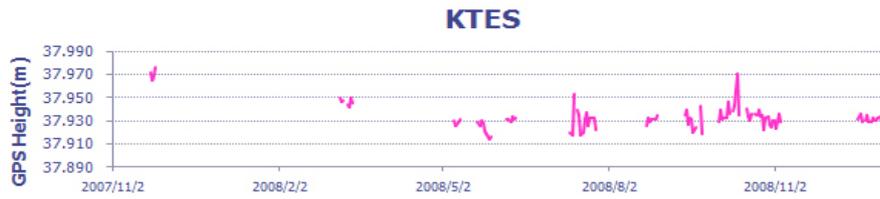
附圖 4- 6、內政部 PKGM 站地表氣象高程成果



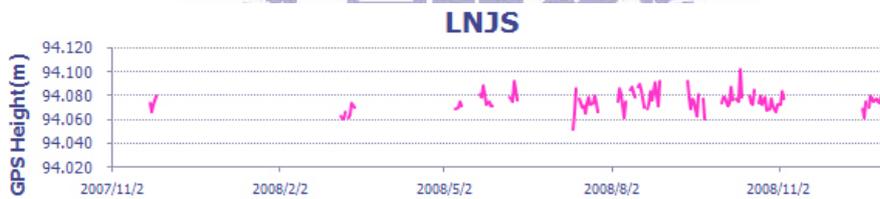
## 附錄五



附圖 5- 1、水利署 CHSG 站濕延遲觀測高程成果



附圖 5- 2、水利署 KTES 站濕延遲觀測高程成果



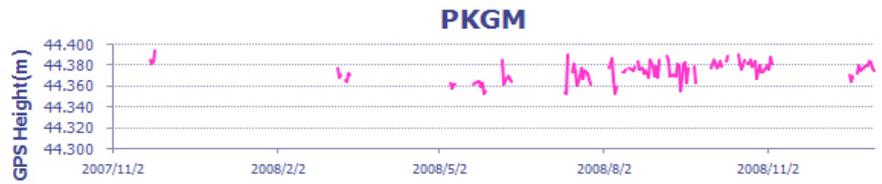
附圖 5- 3、水利署 LNJS 站濕延遲觀測高程成果



附圖 5- 4、水利署 TKJS 站濕延遲觀測高程成果



附圖 5- 5、水利署 YSLL 站濕延遲觀測高程成果



附圖 5- 6、內政部 PKGM 站濕延遲觀測高程成果

