

發展臺灣區域性對流層延遲

估算模式先期研究作業

期末報告修正本

計畫主持人：楊 名 教授

國立成功大學測量及空間資訊學系

共同主持人：江凱偉 助理教授

國立成功大學測量及空間資訊學系

參與研究人員：李孟穎 助理研究教授

國立成功大學測量及空間資訊學系

委託單位：內政部國土測繪中心

執行單位：國立成功大學

中華民國 99 年 7 月 15 日

中文摘要

臺灣地區已建立高密度的即時動態電子基準站定位服務網路，足以提供即時的高精度測量需求。內政部國土測繪中心已於臺灣地區完成建置 78 個連續電子基準站，且其中約有 15 個站設置有地面氣象設備，並利用 Trimble 公司發展之 GPSNet 軟體作為計算中心的核心軟體，惟目前對流層改正模式均使用全球性改正模式來吸收對流層的延遲誤差。

精密單點定位 (Precise Point Positioning, PPP) 是利用高精度的 GPS 衛星星曆和衛星時錶差，以及單部 GPS 接收儀的雙頻載波相位觀測值進行定位，在全球範圍內進行靜態或動態定位作業，再利用國際 GNSS 服務組織(International GNSS Service, IGS) 所提供的精密星曆，實現了全球都可以使用高精度定位結果。對於台灣區域性模式研究而言，PPP 技術可以提供高密度、高時間解析度 e-GPS 觀測網的絕對對流層延遲量。本計畫案利用 e-GPS 站，搭配地面氣象設備觀測資料，探討 e-GPS 站資料結合 PPP 技術應用於絕對對流層延遲估算及其可能之相關應用，同時發展臺灣區域性對流層模式並分析區域性模式與全球性模式差異，提出其可能之科學應用。

關鍵字：全球定位系統、對流層模型、精密單點定位

Abstract

The electronic-global satellite real-time kinematic positioning system (e-GPS) is managed by the National Land Survey and Mapping Center (NLSC), Ministry of the Interior, Executive Yuan of ROC (Taiwan). The e-GPS network uses continuous satellite observations and processes them continually. Currently, there are 78 operational stations available for various services and 15 stations are equipped with meteorological sensors. The NLSC applies the GPSNet package as the core processing engine but this package uses global tropospheric model to eliminate the impact of tropospheric delay.

The availability of precise GPS satellite orbit and clock products provided by IGS has enabled the development of a novel positioning methodology known as Precise Point Positioning (PPP). Based on the processing of pseudorange and carrier phase observation from a single GPS receiver, this approach effectively eliminates the inter-limitation introduced by differential GPS (DGPS) processing as no base station is necessary. Therefore, PPP offers an alternative to DGPS that is simpler than and almost as accurate as DGPS. As a result, users can directly use IGS products to perform the high accuracy in the ITRF frame by using PPP technique. It can decrease the cost of purchasing receivers because PPP needs only one receiver to perform high positioning accuracy. It also retains the absolute message of the states estimated. It possesses the superiority in the field of atmosphere, meteorology and tides. In term of studying the regional tropospheric model, PPP is able to provide absolute tropospheric wet delay with high time and spatial resolution. Therefore, this project facilitates the measurements provided by e-GPS networks with proper meteorological measurements to conduct a pilot study concerning the use of GPS network PPP for deriving absolute tropospheric wet delay to support the development of regional tropospheric model. In addition, the comparisons between several global tropospheric delay models and proposed regional model are provided and potential scientific applications of GPS network PPP derived absolute tropospheric wet delay are discussed.

Keywords: Global positioning system, Tropospheric model, Precise point positioning

目 錄

第一章 前言	12
§ 1.1 工作項目	13
§ 1.2 工作期間與進度	15
第二章 國內外 PPP 發展及對流層誤差模式之回顧	17
§ 2.1 現行水汽含量偵測技術與設備	19
§ 2.2 GPS 氣象學	22
§ 2.3 對流層對 GPS 觀測量之影響	24
§ 2.4 精密單點定位技術之發展現況	37
§ 2.5 GNSS 發展現況之回顧	40
第三章 開發絕對天頂對流層延遲計算軟體	46
§ 3.1 PPP 精密單點定位數學模型	46
§ 3.2 PPP 精密單點定位之參數估計策略	49
§ 3.3 PPP 精密單點定位方法	60
§ 3.4 絕對天頂對流層延遲估計	71
§ 3.5 精密單點定位絕對天頂對流層延遲估計軟體介面	72
§ 3.6 參數設定	78
§ 3.7 動態精密單點定位精度及效益分析	84
§ 3.8 利用 PPP 估計 e-GPS 站絕對天頂對流層總延遲	113
第四章 氣象資料、e-GPS 站資料，及乾濕延遲量之空間推估	116
§ 4.1 去群集時空趨勢回歸法	116
§ 4.2 地理統計方法與克利金空間推估	119
§ 4.3 氣象資料處理與推估 e-GPS 站絕對對流層乾延遲	130
§ 4.4 推估 e-GPS 站絕對對流層濕延遲	137
§ 4.5 發展台灣區域性對流層延遲修正模式	141

第五章 成果與精度分析.....	145
§ 5.1 e-GPS 站與 WVR 天頂對流層濕延遲量之比較.....	145
§ 5.2 e-GPS 站每日觀測資料處理.....	148
§ 5.3 乾延遲相關氣象資料說明.....	149
§ 5.4 以氣象資料推估 e-GPS 站天頂對流層乾延遲量之精度比較.....	150
§ 5.5 e-GPS 站天頂對流層總延遲量推估之精度比較.....	151
§ 5.6 台灣區域性對流層延遲修正模式與全球模式比較.....	153
§ 5.7 e 利用台灣區域性對流層延遲修正模式與全球模式之單點定位 精度比較.....	156
§ 5.8 e-GPS 站天頂對流層監測技術之可能科學應用.....	158
第六章 辦理科技計畫成果發表會與教育訓練以及提送論 文.....	172
§6.1 辦理科技計畫成果發表會及教育訓練.....	172
§6.2 參與國內外學術會議及提送論文.....	177
第七章 結論與建議.....	178
參考文獻	180
附錄一 期中審查委員意見及修正辦理情形.....	186
附錄二 期末審查委員意見及修正辦理情形.....	191
附錄三 提送論文摘要.....	195

圖 目 錄

圖 2.1 大氣層之垂直分佈.....	19
圖 2.2 水汽含量與高度之關係.....	19
圖 2.3 大氣層中氣體之密度與高度之關係圖.....	20
圖 2.4 大氣層中水氣循環之關係圖.....	20
圖 2.5 探空氣球.....	21
圖 2.6 水汽輻射計(WVR).....	22
圖 2.7 GPS、探空氣球、WVR 的天頂溼延遲量比較圖.....	24
圖 2.8 GPS 訊號傳播之路徑.....	26
圖 2.9 反射係數與高度之關係.....	28
圖 2.10 對流層延遲與衛星仰角之關係.....	29
圖 2.11 對流層幾何路徑延遲.....	32
圖 2.12 三模型對流層總延遲量比較圖.....	33
圖 2.13 Modified Hopfield Model 與 Saastamoinen Model 和 Hopfield Model 的差異圖.....	33
圖 2.14 GPS 訊號穿越對流層之路徑.....	34
圖 2.15 IGS 觀測網.....	38
圖 2.16 2009 年 11 月 11 日之 GPS 星群.....	42
圖 2.17 2010 年 2 月 11 日之 GLONASS 星群.....	44
圖 3.1 地球與月球的示意圖.....	63
圖 3.2 精密單點定位演算法之資料處理流程.....	71
圖 3.3 精密單點定位天頂對流層延遲量軟體主視窗畫面.....	73
圖 3.4 精密單點定位天頂對流層延遲量軟體選單按鈕介紹.....	74
圖 3.5 衛星觀測量改正數介紹.....	74
圖 3.6 衛星軌跡運行圖介紹.....	75

圖 3.7 資料解算時的衛星仰角與方位角.....	76
圖 3.8 資料解算時的靜態軌跡.....	76
圖 3.9 衛星選取的結果.....	77
圖 3.10 精密單點定位處理器參數解算成果介面	77
圖 3.11 參數設定欄位.....	79
圖 3.12 天線設定介面.....	79
圖 3.13 初始坐標設定介面.....	80
圖 3.14 氣象參數設定介面.....	80
圖 3.15 衛星選擇設定介面.....	81
圖 3.16 PPP 模式設定介面.....	82
圖 3.17 PPP 資料輸出選擇介面.....	82
圖 3.18 氣象資料格式範例.....	83
圖 3.19 輸出成果的展示.....	84
圖 3.20 本研究架設參考主站之二等衛星控制點(S810).....	85
圖 3.21 e-GPS 站及 S810 位置示意圖(藍色三角形為 e-GPS 站，紅色三 角形為 S810 二等衛星控制點，綠色圓形為 GPS 移動 站).....	86
圖 3.22(a) 2009 年 1 月 9 日 CIME(七美站)PPP 靜態定位誤差.....	88
圖 3.22(b) 2009 年 1 月 9 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化...88	88
圖 3.22(c) 2009 年 2 月 5 日 CIME(七美站)PPP 靜態定位誤差.....	89
圖 3.22(d) 2009 年 2 月 5 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化...89	89
圖 3.22(e) 2009 年 2 月 23 日 CIME(七美站)PPP 靜態定位誤差.....	90
圖 3.22(f) 2009 年 2 月 23 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化...90	90
圖 3.23(a) 2009 年 1 月 9 日 CISH(旗山站)PPP 靜態定位誤差.....	91
圖 3.23(b) 2009 年 1 月 9 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化...91	91
圖 3.23(c) 2009 年 2 月 5 日 CISH(旗山站)PPP 靜態定位誤差.....	92
圖 3.23(d) 2009 年 2 月 5 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化...92	92

圖 3.23(e)	2009 年 2 月 23 日 CISH(旗山站)PPP 靜態定位誤差.....	93
圖 3.23(f)	2009 年 2 月 23 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化	93
圖 3.24(a)	2009 年 1 月 9 日 KASH(高雄港站)PPP 靜態定位誤差..	94
圖 3.24(b)	2009 年 1 月 9 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化..	94
圖 3.24(c)	2009 年 2 月 5 日 KASH(高雄港站)PPP 靜態定位誤差...	95
圖 3.24(d)	2009 年 2 月 5 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化..	95
圖 3.24(e)	2009 年 2 月 23 日 KASH(高雄港站)PPP 靜態定位誤差..	96
圖 3.24(f)	2009 年 2 月 23 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化..	96
圖 3.25(a)	2009 年 1 月 9 日 PKGM(北港站)PPP 靜態定位誤差.....	97
圖 3.25(b)	2009 年 1 月 9 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化...	97
圖 3.25(c)	2009 年 2 月 5 日 PKGM(北港站)PPP 靜態定位誤差.....	98
圖 3.25(d)	2009 年 2 月 5 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化...	98
圖 3.25(e)	2009 年 2 月 23 日 PKGM(北港站)PPP 靜態定位誤差....	99
圖 3.25(f)	2009 年 2 月 23 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化...	99
圖 3.26(a)	2009 年 1 月 9 日 WIAN(外坵站)PPP 靜態定位誤差.....	100
圖 3.26(b)	2009 年 1 月 9 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化.	100
圖 3.26(c)	2009 年 2 月 5 日 WIAN(外坵站)PPP 靜態定位誤差.....	101
圖 3.26(d)	2009 年 2 月 5 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化..	101
圖 3.26(e)	2009 年 2 月 23 日 WIAN(外坵站)PPP 靜態定位誤差...	102
圖 3.26(f)	2009 年 2 月 23 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化.	102
圖 3.27(a)	2009 年 1 月 9 日 PPP 定位誤差(使用 IGS 最終產品)...	106
圖 3.27(b)	2009 年 1 月 9 日實驗過程中衛星顆數及 PDOP 值變化..	106
圖 3.27(c)	2009 年 2 月 5 日 PPP 定位誤差(使用 IGS 最終產品)...	107
圖 3.27(d)	2009 年 2 月 5 日實驗過程中衛星顆數及 PDOP 值變化..	107
圖 3.27(e)	2009 年 2 月 23 日 PPP 定位誤差(使用 IGS 最終產品)...	108
圖 3.27(f)	2009 年 2 月 23 日實驗過程中衛星顆數及 PDOP 值變化.	108
圖 3.27(g)	2009 年 5 月 13 日 PPP 定位誤差(使用 IGS 最終產品)...	109

圖 3.27(h) 2009 年 5 月 13 日實驗過程中衛星顆數及 PDOP 值變化	109
圖 3.27(i) 2009 年 5 月 14 日 PPP 定位誤差(使用 IGS 最終產品)...	110
圖 3.27(j) 2009 年 5 月 14 日實驗過程中衛星顆數及 PDOP 值變化.	110
圖 3.27(k) 2009 年 5 月 15 日 PPP 定位誤差(使用 IGS 最終產品)...	111
圖 3.27(l) 2009 年 5 月 15 日實驗過程中衛星顆數及 PDOP 值變化.	111
圖 3.28 利用 PPP 估計絕對天頂對流層總延遲流程圖.....	113
圖 3.29 e-GPS 站絕對天頂對流層乾延遲計算步驟.....	114
圖 3.30 e-GPS 站天頂對流層濕延遲估計流程圖.....	115
圖 4.1 多邊形法空間去群集權重示意圖.....	118
圖 4.2 分格去群集法權重示意圖.....	118
圖 4.3 去群聚最小總平均值相對應之網格大小.....	119
圖 4.4 取樣點與預測位置示意圖.....	120
圖 4.5 經驗變異圖之距離與取樣位置示意圖.....	126
圖 4.6 變異雲圖之一例.....	126
圖 4.7 距離區域範圍示意圖.....	127
圖 4.8 實驗變異圖之一例.....	127
圖 4.9 平穩型實驗變異圖參數名詞示意圖.....	128
圖 4.10 實驗變異圖與理論變異圖之套配示意圖.....	130
圖 4.11 中央氣象局氣象資料處理分析流程.....	131
圖 4.12 將氣象站氣壓觀測資料轉換至 e-GPS 站之示意圖.....	133
圖 4.13 2009 年大地水準面氣溫殘差量實驗半變異圖.....	136
圖 4.14 2009 年大地水準面氣壓殘差量實驗半變異圖及理論半變異圖	137
圖 4.15 天頂對流層濕延遲量轉換為水汽分壓流程圖.....	138
圖 4.16 2009 年大地水準面水汽分壓殘差量實驗半變異圖及理論半變異圖	141

圖 4.17 台灣區域性對流層延遲修正模式計算流程圖.....	143
圖 4.18 台灣區域性對流層延遲模式中修正 Modified Hopfield 模式之相關參數.....	144
圖 5.1 北港站 2006 年每 30 秒估計天頂對流層濕延遲量比較圖....	146
圖 5.2 陽明山站 2006 年每 30 秒估計天頂對流層濕延遲量比較圖...146	
圖 5.3 北港站(PKGM) 2006 年天頂對流層濕延遲量精密單點定位與水氣輻射儀差異量.....	147
圖 5.4 陽明山站(YMSM) 2006 年天頂對流層濕延遲量精密單點定位與水氣輻射儀差異量.....	147
圖 5.5 2009 年每日 e-GPS 站天頂對流層總延遲量估計之站數.....	148
圖 5.6 中央氣象局氣象站分佈圖，約 179 站.....	149
圖 5.7 中央氣象局氣象站分佈與檢核點(e-GPS 站)之位置分佈.....	150
圖 5.8 天頂對流層乾延遲量推估值與檢核點精度直方圖.....	151
圖 5.9 檢核點(e-GPS 站)位置.....	152
圖 5.10 天頂對流層總延遲量檢核精度直方圖.....	152
圖 5.11 檢核站上各種對流層延遲修正模式與 PPP 估計之 ZTD 比較圖.....	154
圖 5.12 檢核站上各種對流層延遲修正模式與 PPP 估計之 ZTD 比較圖.....	155
圖 5.13 檢核站上各種對流層延遲修正模式與 PPP 估計之 ZTD 比較圖.....	156
圖 5.14 GPS 站位置分佈圖.....	158
圖 5.15 辛樂克颱風路徑圖(摘自中央氣象局).....	160
圖 5.16 莫拉克颱風路徑圖(摘自中央氣象局).....	160
圖 5.17 本研究資料處理流程圖.....	161
圖 5.18(a) 淡水站在辛樂克颱風期間的 ZWD 與雨量時間序列圖...162	
圖 5.18(b) 田中站在辛樂克颱風期間的 ZWD 與雨量時間序列圖...162	
圖 5.18(c) 枋寮站在辛樂克颱風期間的 ZWD 與雨量時間序列圖...163	

圖 5.18(d)	東管處在辛樂克颱風期間的 ZWD 與雨量時間序列圖...	163
圖 5.19(a)	淡水站在莫拉克颱風期間的 ZWD 與雨量時間序列圖...	164
圖 5.19(b)	田中站在莫拉克颱風期間的 ZWD 與雨量時間序列圖...	165
圖 5.19(c)	枋寮站在莫拉克颱風期間的 ZWD 與雨量時間序列圖...	165
圖 5.19(d)	東管處在莫拉克颱風期間的 ZWD 與雨量時間序列圖...	166
圖 5.20(a)	貢寮站在 2008 梅雨期間的 ZWD 與雨量時間序列圖...	167
圖 5.20(b)	田中站在 2008 梅雨期間的 ZWD 與雨量時間序列圖...	167
圖 5.20(c)	瑪家站在 2008 梅雨期間的 ZWD 與雨量時間序列圖...	168
圖 5.20(d)	東管處在 2008 梅雨期間的 ZWD 與雨量時間序列圖...	168
圖 5.21(a)	貢寮站在 2009 梅雨期間的 ZWD 與雨量時間序列圖...	169
圖 5.21(b)	田中站在 2009 梅雨期間的 ZWD 與雨量時間序列圖...	170
圖 5.21(c)	瑪家站在 2009 梅雨期間的 ZWD 與雨量時間序列圖...	170
圖 5.21(d)	瑪家站在 2009 梅雨期間的 ZWD 與雨量時間序列圖...	171
圖 6.1	測繪科技成果發表暨研討會專題研討及系統展示現況.....	174
圖 6.2	教育訓練上課情形.....	176

表 目 錄

表 2.1 乾分量映射函數的常數值.....	36
表 2.2 濕分量映射函數的常數值.....	36
表 2.3 線上 PPP 服務之機構.....	39
表 3.1 三種 PPP 模型之比較.....	49
表 3.2 GPS 衛星天線相位中心偏差(m).....	67
表 3.3 IGS 產品之精度(摘自 IGS 網站).....	70
表 3.4 衛星狀況圖示說明.....	75
表 3.5 參數值意義說明.....	78
表 3.6 氣象資料格式說明.....	83
表 3.7 實驗日期及 GPS 觀測時間.....	85
表 3.8 e-GPS 站之已知 ITRF2005 坐標.....	86
表 3.9 靜態精密單點定位精度(單位：公尺).....	87
表 3.10 台灣 e-GPS 站觀測品質指標.....	104
表 3.11 動態精密單點定位精度(使用 IGS 最終產品).....	112
表 5.1 陽明山站與北港站天頂對流層濕延遲量與 WVR 之差異....	148
表 5.2 天頂對流層乾延遲量推估值與檢核點精度比較表.....	151
表 5.3 天頂對流層總延遲量檢核精度比較表.....	153
表 5.4 CKSV 站使用不同對流層改正模式進行單點定位成果比較...	157
表 5.5 YUSN 站使用不同對流層改正模式進行單點定位成果比較..	157
表 5.6 四個例子的資料時間.....	158
表 5.7 四個案例所採用基準站的空間資訊.....	159
表 6.1 測繪科技成果發表暨研討會說明.....	172
表 6.2 測繪科技成果發表暨研討會議程表.....	173
表 6.3 發展臺灣區域性對流層延遲估算模式先期研究作業研習班課程配當表.....	175
表 6.4 參與國內外學術會議及提送期刊論文情況.....	177

第一章 前言

我國自 81 年開始採用全球衛星系統(Global Positioning System, GPS)技術進行國家基本測量，於台灣本島及金門、馬祖外島設立 8 個永久性 GPS 衛星追蹤站，陸續完成一、二、三等衛星控制點的測量工作，據以定義新的台灣大地基準(Taiwan Geodetic Datum 1997，TWD97)，並且於 89 年正式公告 TWD97 作為國家測量基準。

GPS 為美國自 1970 年代末期開始發展的導航衛星定位系統，目前有 32 顆衛星運行於距離地球表面約 2 萬公里的軌道中。由於設計至今已有約 30 年的時間，其定位精度已漸漸無法滿足日益升高的使用需求，因此美國已經著手進行 GPS 系統之現代化，增加新的、改善品質的電碼觀測量，以及將原有的雙頻觀測系統提升為三頻觀測系統。

GPS 訊號通過對流層會有兩個主要延遲誤差影響，即乾燥大氣層延遲（以下簡稱乾延遲）與水汽影響延遲（以下簡稱濕延遲）。前者對於 GPS 訊號傳播路徑延遲影響非常大，在合理預估範圍內其值約為 2.3 公尺，其並與當地氣溫與大氣壓力之變化呈現緩慢且可預測的改變，但可透過乾延遲模式精準的估算；後者對於整體訊號傳播路徑延遲而言影響較小，其值在天頂方向約為 1 至 60 公分。儘管後者的效應約為前者的十分之一，但是由於大氣層中水蒸氣含量變化很大，導致濕延遲較難藉由地表的觀測量進行預估。對流層延遲主要係因訊號傳輸時，受到大氣層折射影響，使得傳輸速度低於光速，造成延遲現象。因此，對流層誤差對於衛星定位有著重大的影響，許多研究將此影響視為重要發展對象。對流層誤差模型主要包含兩部分，天頂對流層延遲模型與映射函數。天頂對流層延遲模型之代表為 Hopfield 模型、Modified Hopfield 模型、與 Saastamoinen 模型；在映射函數模型方面則有 Black and Eisner 與 Niell 映射函數。這些模型的發展主要

為提供 GNSS 定位中全球性模式的對流層延遲改正。

臺灣地區已建立高密度的即時動態電子基準站定位服務網路，足以提供即時的高精度測量需求。內政部國土測繪中心已於臺灣地區完成建置 78 個連續電子基準站(以下簡稱 e-GPS 站)，且其中約有 15 個站設置有地面氣象設備，並利用 Trimble 公司發展之 GPSNet 軟體作為計算中心的核心軟體，惟目前對流層改正模式均使用全球性改正模式來吸收對流層的延遲誤差，另 Trimble 公司曾針對日本發展局部區域性對流層改正模式，來改進當地的衛星測量誤差改正模式。

精密單點定位 (Precise Point Positioning, PPP) 是利用高精度的 GPS 衛星星曆和衛星時錶差，以及單部 GPS 接收儀的雙頻載波相位觀測值進行定位，在全球範圍內進行靜態或動態定位作業，再利用國際 GNSS 服務組織(International GNSS Service, IGS) 所提供的精密星曆，實現了全球都可以使用高精度定位結果。由於精密單點定位是基於非差分(non-differencing)模型，在多系統組合定位中沒有觀測值間的差分，因此在觀測量模式中保留了所有的訊息絕對量，這對於從事絕對定位、大氣、氣象和潮汐等相關領域的研究具有優勢，而對於台灣區域性模式研究而言，PPP 技術可以提供高密度、高時間解析度 e-GPS 觀測網的絕對對流層延遲量，這點相較於其他可以量測絕對對流層延遲的方法，例如探空氣球或水汽輻射計，也具有設備成本與觀測密度之優勢。

§ 1.1 工作項目

本計畫案利用 e-GPS 站，搭配地面氣象設備觀測資料，探討 e-GPS 站資料結合 PPP 技術應用於絕對對流層延遲估算及其可能之相關應用。本計畫將針對 PPP 發展進行相關的文獻回顧、開發絕對天頂對流層延遲計算軟體軟體、處理地面氣象站資料、計算 e-GPS 站之對流層絕對濕延遲估計、同時發展臺灣區域性對流層模式並分析區

域性模式與全球性模式差異，提出其可能之科學應用及參與國際 GNSS 學術活動、教育訓練及舉辦科技計畫成果發表會及推廣測繪科技等項目。

本案之執行項目列舉如下：

- 一、 蒐集國內外 PPP 發展及對流層誤差模式等文獻回顧。
- 二、 開發絕對天頂對流層延遲計算軟體
 - (1) 可獨立在 WINDOWS XP 或 VISTA 作業系統執行。
 - (2) PPP 動態定位解算數學模式。
 - (3) PPP 觀測資料輸入及輸出設定（需可輸入氣象資料）。
 - (4) PPP 動態定位系統參數設定。
 - (5) PPP 絕對天頂對流層延遲估計軟體。
- 三、 使用 PPP 技術結合 e-GPS 站觀測量與地面氣象資料計算分析各站絕對對流層延遲
 - (1) 計算至少 50 個 e-GPS 站之 GPS 資料及氣象資料(e-GPS 觀測資料檔及氣象資料檔由國土測繪中心提供)。
 - (2) 上開處理時間段至少需涵蓋 1 年且以日為處理單元，全年需處理至少 122 天，並以均勻分布為原則。
 - (3) 各 e-GPS 站絕對天頂對流層總延遲估計。
 - (4) 各 e-GPS 站絕對對流層乾延遲估計。
 - (5) 各 e-GPS 站絕對對流層濕延遲估計。
 - (6) e-GPS 站絕對對流層延遲監測技術的評估分析與可能科學應用。
- 四、 發展臺灣區域性對流層修正模式
 - (1) 發展可應用於 GPS 衛星定位測量解算之臺灣區域性對流層修正模式。
 - (2) 驗證發展臺灣區域性對流層模式與其他未納入模式計算之 e-GPS 站資料(至少會比對 14 個 e-GPS 站資料，所需資料由國土測繪中心提供)。

- (3) 研析臺灣區域性對流層模式與全球性模式差異(至少會比對 3 種模式)。
 - (4) 研析所發展臺灣區域性對流層模式加入國土測繪中心現行 e-GPS 系統作業可行性及辦理策略(使用軟體為 Trimble GPSnet)。
- 五、教育訓練：最晚須在期末報告確定版完成前辦竣，提供包含基本理論、實習等相關課程 9 小時，在國土測繪中心本部或由成大提供可容納 20 人次以上教室實施，參訓人員由國土測繪中心指定，日期、地點及課程配當表需經本中心同意後方得實施。廠商自行負擔講師鐘點費及交通住宿費用，並提供訓練教材講義及國土測繪中心參訓人員午餐餐盒。
- 六、辦理科技計畫成果發表會：舉行科技計畫成果發表會，提供 200 人次(含)以上場地及相關資料，內容應包含國內外最新測繪理論與技術發展現況，發表論文至少 6 篇，應廣邀國內外相關政府機關、研究機構、學校、學者專家及業界參與，成果發表會時間至少 1 天，最晚須在 99 年 5 月 31 日前辦竣，議程及正確日期需經國土測繪中心同意後方得實施。
- 七、提送國際期刊(SCI/EI)學術論文 1 篇(含)以上，繳交研討會或期刊論文文稿至少 1 篇(至少 8 頁)。

§ 1.2 工作期間及進度

工作項目	月次											
	98年07月	98年08月	98年09月	98年10月	98年11月	98年12月	99年01月	99年02月	99年03月	99年04月	99年05月	99年06月
蒐集國內外PPP發展及對流層誤差模式等文獻回顧						100%						
開發絕對天頂對流層延遲計算軟體								100%				
使用PPP技術結合e-GPS觀測量與地面氣象資料計算分析各站絕對對流層延遲											100%	
發展臺灣區域性對流層修正模式												100%
教育訓練									100%			
辦理科技計畫成果發表會												100%
期中報告							100%					
期末報告												100%

■：預定進度

■：已完成進度

第二章 國內外 PPP 發展及對流層誤差模式之回顧

當 GPS 訊號傳輸通過大氣層時，根據大氣層各層不同的媒介影響，會有不同的延遲情形發生，這些延遲對於 GPS 訊號傳輸有很大的影響。電離層為色散介質(Dispersive medium)。中性大氣層則為非色散介質(Nondispersive medium)。在色散介質中，通過之訊號由於不同頻率會受到不同的影響。換言之，將會隨著波長變化而改變，因此遲延量與訊號之頻率有關，於是利用頻率的線性組合可將在此層中所發生之遲延影響降至極低。與色散介質不同，不同頻率的訊號在非色散介質中所受影響相同，遲延量最主要是由於傳播路徑上溫度、壓力不同造成介質局部性折射率變化所產生；故不同於電離層，包含對流層、對流層頂、平流層與中氣層之中性大氣層與訊號頻率為相互獨立的關係。這部份的訊號延遲誤差主要來自於對流層。然而，對流層延遲可藉由 GPS 天線與衛星位置的相關應用，進一步偵測或消除誤差。

對流層天頂延遲量約為 2.5 公尺左右，此表示地面接收站與天頂的衛星將產生約 2.5 公尺的誤差。對流層延遲可分為兩個部分：乾延遲與溼延遲(Saastamoinen, 1973)。大氣層中乾燥的氣體產生乾延遲，水蒸氣產生溼延遲部分。乾延遲約影響對流層延遲 95%部分，天頂方向的乾延遲約 2.3 公尺左右(Businger *et al.*, 1996；Dodson *et al.*, 1996)。乾延遲主要與地表面壓力變化相關，不同時間的延遲變化較為緩慢平滑，同時乾延遲可由溫度與壓力模式化或改正應用，得到精密的結果。溼延遲部分則與水氣壓力有關聯，影響大小在數公分至數十公分左右。溼延遲與空間和時間有密切關聯，且無法由模式化求得較精密的成果(Bevis *et al.*, 1992)。經由量測對流層總延遲量與利用計算理論模型求得的乾延遲量，可推得對流層溼延遲的部分。

對流層延遲量並非直接量測所有可視衛星即可求得，需經過映射函數 (Mapping Function, MF) 的運算將衛星天頂延遲量投影至實際位置的延遲量。Lanyi(1984)、Herring(1992)、Ifadis(1986)以及 Niell(1996)等文獻中記載不同映射函數運用在高精度定位上，可將接收站的天頂訊號延遲轉換成傾斜(slant path)延遲量。

故研究大氣層中水汽含量是非常重要的，其原因有二。第一，大氣層中水氣的含量影響短期天氣變化。水汽含量由於時間與空間快速的變化，造成當地天氣的驟變。水汽為大氣層中能量轉換的基礎 (Rocken *et al.*, 1997)，此轉換經常造成強降雨等具有破壞性的自然環境變化。第二，長期氣候的變化反映出水氣的含量內容。水汽就像溫室氣體，可散發出地球表面長波長的輻射能。科學家可透過量測諸如水汽內容含量變化的過程並模式化不同時空下氣候的變遷。水汽的量測可由可降水量 (Precipitable Water Vapor, PWV) 表示。現今水汽之即時量測裝置與技術的發展仍相當稀少，目前大氣主要透過探空氣球 (Radiosonde) 與水汽輻射計 (Water Vapor Radiometer, WVR) 進行量測，但受到儀器昂貴且量測空間覆蓋範圍受限等限制 (Liou *et al.*, 2001)。

藉由 GPS 精密量測在不同時間與空間的水汽含量可提供較佳的天氣預測，相關 GPS 氣象學已漸漸應用在天氣預測與氣候變化研究。假如衛星與地面點天線位置已知時，GPS 可用來估計天頂對流層延遲與傾角。天頂溼延遲量部分可由完整天頂延遲量減掉乾延遲模型計算得到的乾延遲量而得，接著由傾角與映射函數將垂直延遲量投影至傾斜延遲量。藉由整合衛星與接收儀直線距離與折射的延遲量得到的路徑長可表示衛星接收儀的傾斜溼延遲量。

§ 2.1 現行水汽含量偵測技術與設備

大氣層之水汽成分大部分存在於對流層中，對流層範圍約從地表面起算至 50 公里的高度，如圖 2.1 所示。極地大約分佈於 9 公里內、赤道區域為 16 公里內，且水汽含量隨著高度增而減少，如圖 2.2 所示。事實上，超過 90% 的水汽分佈於對流層最低的 5 公里內，且超過 50% 分佈於 2 公里內，超過 5 公里以上僅有少於 5% 至 6%，平流層更不到 1% (Ramirez *et al.*, 2007)。

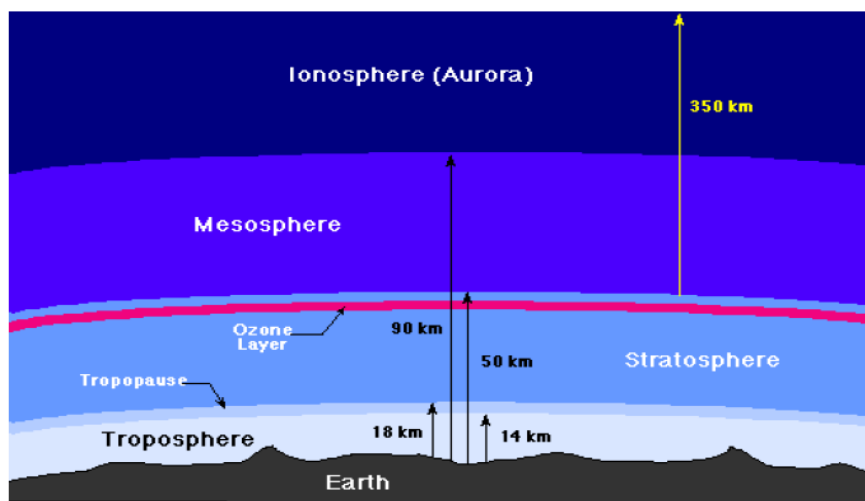


圖 2.1 大氣層之垂直分佈(摘自 Zhang, 1999)

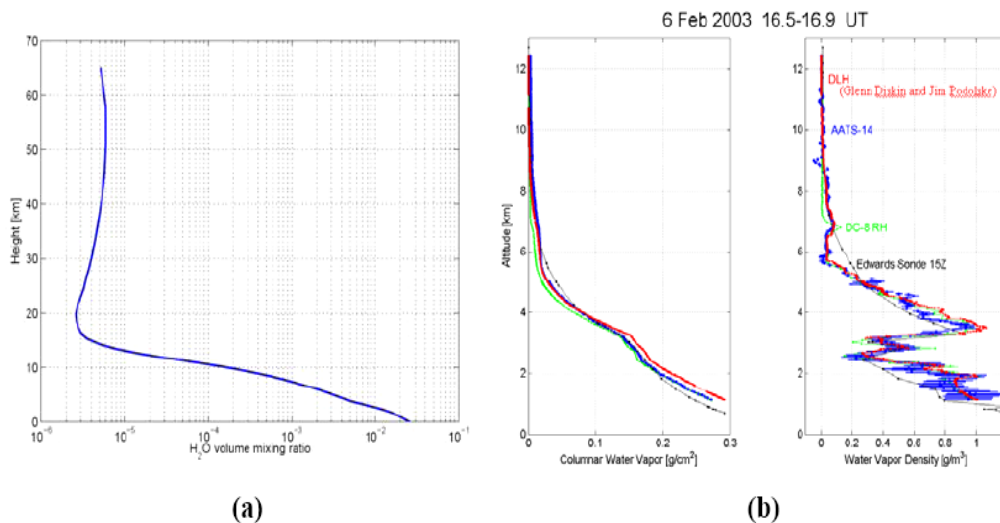


圖 2.2 水汽含量與高度之關係(摘自 Ramirez *et al.*, 2007)

大氣層中的水汽對於氣候循環系統也扮演重要的角色。雖然水汽含量相對於大氣層中的物質而言其體積不超過 4%，但重要性卻相當的大(Hidore, 1972)。圖 2.3 所示為大氣層中所含各式氣體之密度與高度之關係圖。

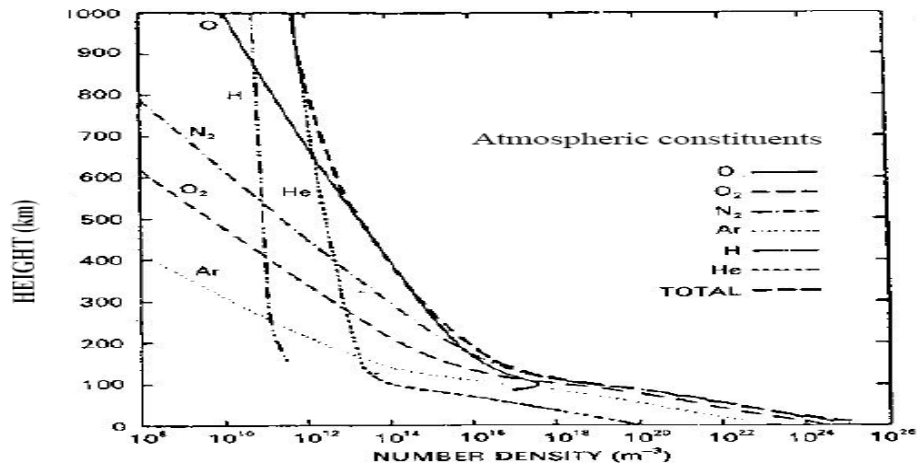


圖 2.3 大氣層中氣體之密度與高度之關係圖(摘自 Richmond, 1983)

水汽對於全球氣候變化的影響可分成兩個部分。第一，水汽對於地球水文循環扮演基本的角色，包含大氣層能量的轉換、形態上的變化與天氣變化等(Hidore, 1972; Seidel, 1995)，如圖 2.4 所示。第二，水汽於大氣層中可視為溫室氣體(Hieb, 2003)。

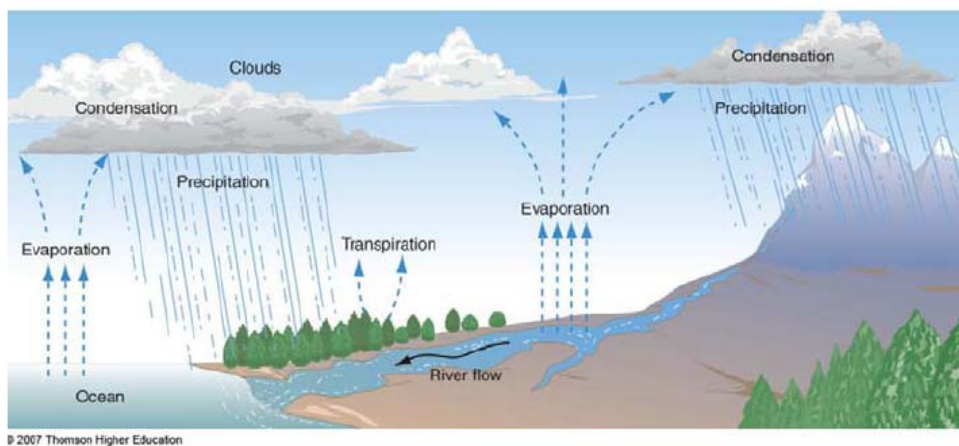


圖 2.4 大氣層中水氣循環之關係圖(摘自 Misra and Enge, 2001)

大氣科學家目前利用三種主要技術量測水氣含量：(i)地基 (ground-based) 量測法，探空氣球；(ii)地表遙感探測，利用地基向上掃描之水汽輻射計 (upward-looking water vapor radiometer)；(iii)空間遙感探測，利用衛星向下掃描之水汽輻射計 (satellite-based downward-looking radiometry) (Bevis *et al.*, 1992)。

地基 (ground-based) 量測法為利用探空氣球，如圖 2.5 所示。探空氣球為一利用高空氣球搭載之裝置，藉由無線電訊號向地面傳輸壓力、溫度、相對溼度、風力、風向等資料 (Brocard *et al.*, 2006)。因此進行短期 (小於 24 小時) 雨量預報時，探空氣球之低時間與空間解析度為主要之限制因子 (Rocken *et al.*, 1993)。



圖 2.5 探空氣球

地面遙感探測利用地基水汽輻射計 (WVR) 進行量測大氣層發射的微波能量，如圖 2.6 所示。WVR 是量測大氣中水氣分子亮溫 (熱發射的強度)，通常用接近 22.2 GHz 容易被吸收的頻段進行觀測；而且會使用兩個或兩個以上的波段來同時量測大氣中水氣和液態水含量，進而推估濕延遲量。一般對於使用 WVR 觀測取得濕延遲的公式如下：

$$\Delta L_V = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i \quad (2.1)$$

其中 α_i 為迴歸係數， x_i 是綜合 WVR 觀測亮溫及其它可能的氣象變數（如地表壓力及溫度...等等）。為了達到較高的精度，WVR 必須進行仔細的校正；最常見的方法例如 tipping-curve 的校正方法。關於 WVR 之詳細原理與數學模式請參考(王傳盛, 2009)。因為儀器成本較高，水汽輻射運作的儀器數目較少，故其雖然具備時間連續性佳之特性，然其空間解析度較低(Tao *et al.*, 2007)。



圖 2.6 水汽輻射計(WVR)

空間遙感探測，利用衛星向下掃描之水汽輻射計進行量測大氣層與地球表面發射出的微波能量。但它所偵測到之天頂的水氣含量會受地表亮度與溫度變化之影響，故它只適合應用在晴天無雲的環境下 (Li *et al.*, 2005)。

§ 2.2 GPS 氣象學

上述不論是地基量測法、地表或空間遙感探測法都有一定的限制，經常無法適時地提供大氣層水汽含量資訊以進行氣候研究 (Bevis *et al.*, 1992)。因此在 1995 年 5 月，美國氣象研究中心提出一可靠且低成本系統進行大氣層水汽含量的計畫 (Michelsen, 1998)。Bevis *et al.*, (1992) 提出利用 GPS 量測水汽含量，討論相關技術上挑戰。GPS 原本設計用來導航與時間傳遞，GPS 衛星訊號發射後，經過電離層與

中性大氣層，由地面 GPS 接收儀接收。在 GPS 定位或導航主要誤差來源之一為大氣折射造成的訊號延遲，因此 GPS 衛星與地面接收儀之間的訊號總延遲與大氣有著密切的關係。經過幾年的研究，已有大氣折射模型可模式化，可進而改善定位精度；過去幾年更進一步地改善估計技術，因此延遲量可更精確的計算出來，此一創新使得 GPS 利用在遙感探測上的可能性大大增加，稱之為 GPS 氣象學。目前已廣泛地應於氣象相關之研究 (Alan and Shardlow, 1995；Awange and Grafarend, 2005)。

GPS 大氣探測技術在水汽含量觀測上有許多優點，包含低成本、全球覆蓋、可靠且穩定的結果、量測精度高、任何天氣下可操作運行、無線電頻率可穿透雲層與灰塵 (Gutman *et al.*, 2004；Awange and Grafarend, 2005)。此新的技術能彌補現有技術的不足，例如探空氣球與 WVR。圖 2.7 為美國 Haystack 觀測台的 GPS、探空氣球、及 WVR 的天頂溼延遲量比較圖，時間為 1995 年 8 月 15 到 30 日，顯現相當好的吻合度 (Coster *et al.*, 1996)。

已有許多研究證明 GPS 大氣遙感探測技術可提升水汽含量觀測量之精度，且 GPS 可降水量 (PWV) 可應用於數值天氣預測 (Numerical Weather Prediction, NWP) 溼度資訊。今日，GPS 氣象學已轉變應用於全球監測網運作以提供大區域氣象研究與觀測之應用 (De Haan, 2006)。

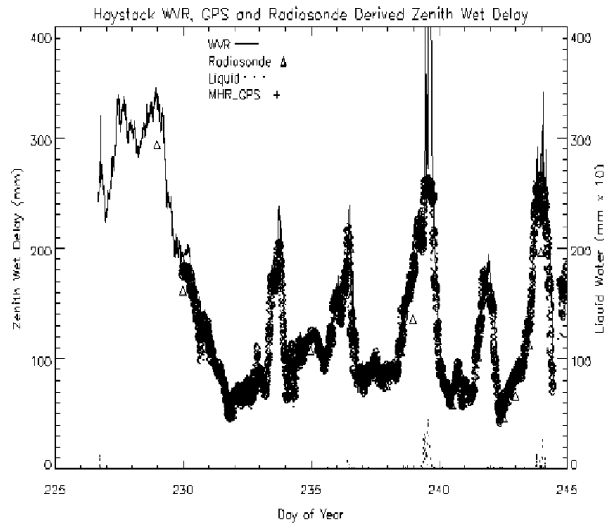


圖 2.7 GPS、探空氣球、WVR 的天頂溼延遲量比較圖(摘自 Coster *et al.*, 1996)

近年來，Liou *et al.*,(2000) 首先利用 DGPS 演算法探討颱風過境時，天頂對流層溼延遲與可降水汽分別在颱風過境前、中、後期的變化情形；此研究指出，當颱風過境前與經過台灣本島時，對流層溼延遲與可降水汽會呈現較高的狀態，颱風過境後，對流層溼延遲與可降水汽會呈現較低的狀態，該研究亦證實利用 GPS 所觀測到對流層溼延遲量和可降水汽與水汽輻射計 (WVR) 呈現一致的情形。同時汪俊寰與史天元 (2000) 亦利用 GPS 觀測量估算大氣溼延遲量；因此，GPS 被公認為是一個非常有用的工具來研究氣象領域的相關議題。藉此架構吾人可固定取得高採樣率之 PWV 已進行如天氣預報、對流層模型研究、極端天氣現象與氣候監測與預測之相關應用。

§ 2.3 對流層對 GPS 觀測量之影響

§2.3.1 對流層的特性

如圖 2.1 所示，對流層位置處於大氣之最低層，距地球表面厚約 10 至 20 公里，地球表面上之大氣，若根據其垂直方向之平均溫度分

布特性，可分為四層，即對流層 (Troposphere)、平流層 (Stratosphere)、中氣層 (Mesosphere) 及增溫層 (Thermosphere)，對流層平均溫度分布特性為每上升 1 公里，其平均溫度約下降 6.5 度。反之，平流層的平均分布特性通常隨著高度的上升，僅增加些許的溫度，通常可視為一個常數。對流層與平流層之交界處，稱之為對流層頂 (Tropopause)，此頂距海平面之高度為對流層之厚度。其高度隨天氣與緯度而變化。北極上空之對流層頂高約八公里，由此向低緯度逐漸升高，而赤道上空之對流層頂高約十六公里，惟向高緯度緩慢下降 (S and TR, 2004)。因氣溫隨高度降低，故熱帶地區對流層頂之溫度，平均約為攝氏零下 70 至 85 度，而中高緯度地方，其溫度在攝氏零下 45 至 65 度，大氣中之水氣多集中於對流層之低層。

由於對流層上方重量的影響，對流層相較於其他分層較為稠密，對流層包含了 75% 以上的大氣重量，其中，氮氣佔了 78%，氧氣佔了 21%，其餘的部份是由其他氣體所組成。對流層與平流層在頻率低於 30GHz 的情況下，皆為非射散性的媒介，因為對流層與平流層是無帶電的中性層。由於大氣中的無帶電中性層有 80% 發生在對流層，因此無帶電中性層通常指的是對流層 (Brunner *et al.*, 1993)。

§2.3.2 對流層延遲的特性

當 GPS 訊號從衛星穿越大氣層到達地表的接收儀時，通常會受到兩種大氣層明顯的影響，如圖 2.8 所示。第一、訊號在對流層中有彎曲的情形發生，並非以常態的直線傳遞 (G)，是以曲線路進傳遞 (S)，這種路線的不同所造成的差異即俗稱的幾何延遲 (geometrical delay)。第二、由於對流層折射率大於真空折射率，電磁波經過大氣層較真空慢，所以傳遞時間延遲而造成傳遞路徑被拉長距離，此為傳遞時間延遲 (optical delay)。以上兩種延遲皆與媒介的折射係數 n 有關，可以利用下述的積分函數得知 (Yuan *et al.*, 1993)：

$$\Delta L = \int_L n(s) \cdot ds - G \quad (2.1)$$

$n(s)$ 是在曲線路徑 L 位置函數的折射係數， G 是穿越大氣層的幾何直線路徑長度，折射係數也可以利用折射率 N (refractivity) 來表示：

$$N(s) = [n(s) - 1] \cdot 10^6 \quad (2.2)$$

因此公式 (2.1) 可以根據 (2.2) 而改寫成如下式 (Yuan *et al.*, 1993)：

$$\Delta L = 10^{-6} \int_L N(s) \cdot ds - (S - G) \quad (2.3)$$

S 為曲線的路徑長度。此公式的第一部份與光學延遲有關，第二部分與幾何延遲有關。

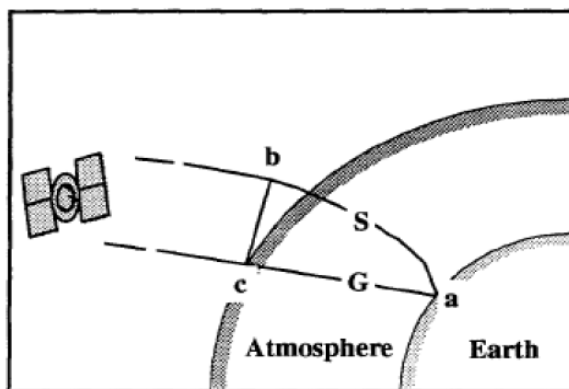


圖 2.8 GPS 訊號傳播之路徑(摘自 Dodson *et al.*, 1996)

為了要模式化傳遞延遲，需要發展一個模型來決定積分函數。大氣層通常可以分成兩部份，一部分是電離層，而另一部份為對流層，可以根據它們的特性去模式化折射率的積分函數。電離層是一個色散性的媒介，GPS 訊號傳播速率及路徑延遲是與電離層相關的，故電離

層延遲通常可以透過雙頻觀測組合來移除；而對流層是中性的的大氣層，屬於非色散性的媒介，因此 GPS 訊號頻率與對流層並無相關性，所以對流層延遲量無法透過雙頻觀測量的線性組合去移除，所以通常我們去量測或估算它。中性大氣層的折射率是利用壓力、溫度和水氣含量所組成的函數，此表示式如下 (Leick, 2004)：

$$N(T, P_d, P_{wv}) = k_1 \cdot \frac{P_d}{T} \cdot Z_d^{-1} + k_2 \cdot \frac{P_{wv}}{T} \cdot Z_{wv}^{-1} + k_3 \cdot \frac{P_{wv}}{T^2} \cdot Z_{wv}^{-1} \quad (2.4)$$

T 為絕對溫度，單位為 °K； P_d 為乾空氣壓力，單位為毫巴； P_{wv} 為水氣壓力，單位為毫巴； k_1 、 k_2 和 k_3 為常數： $k_1=77.60\text{K/mbar}$ ， $k_2=69.5\text{K/mbar}$ ， $k_3=370100\text{K}^2/\text{mbar}$ ， Z_d 和 Z_{wv} 分別為乾空氣壓縮因子和濕空氣（水氣）壓縮因子。式 (2.4) 的前半部是描述乾空氣所帶來的影響，後半部是溼空氣（水氣）所帶來的影響。因此大量的乾空氣成分可以精確地利用地表壓力 $P(P_d+P_{wv})$ 計算得到，剩餘的濕空氣部份必須經過額外處理 (Leick, 2004)，因此式 (2.4) 可以改寫成如下：

$$N(T, P_d, P_{wv}) = k_1 \cdot R_d \cdot \rho + [k_2' \cdot \frac{P_{wv}}{T} + k_3 \cdot \frac{P_{wv}}{T^2}] \cdot Z_{wv}^{-1} \quad (2.5)$$

其中 R_d 為乾空氣常數， ρ 為總密度， p_d 和 p_{wv} 為通用的乾空氣常數與濕空氣常數， M_d 和 M_{wv} 為理想狀態的乾空氣量和溼空氣重量。在式 (2.5) 中，折射率被分成乾分量折射率 N_d 和溼分量折射率 N_{wv} ：

$$N_d(T, P) = k_1 \cdot R_d \cdot \rho = k_1' \cdot \frac{P}{T} \quad (2.6)$$

$$N_{wv}(T, P_{wv}) = [k_2' \cdot \frac{P_{wv}}{T} + k_3 \cdot \frac{P_{wv}}{T^2}] \cdot Z_{wv}^{-1} \quad (2.7)$$

兩種分量延遲率總和可以寫成 $N = N_d + N_{wv}$ ，乾分量延遲率 N_d 與總密度 ρ 或者壓力 P 有關。圖 2.9 為 Brunner *et al.*, (1993) 利用無線電探空儀取得 N_d 和 N_{wv} 高度剖面圖，陰影的部份為濕分量的變化。從圖 2.9 可以得知:(1) N_d 的變化情形在對流層裡是相當的小，因為乾空氣的組成比例接近為一常數；(2)對 N_d 而言，有效的高度約為 40 公里以下，在更高的高度就可以忽略了；(3)對 N_{wv} 而言，有效的高度在對流層以下，在這個區域中，乾空氣與濕空氣的混合造成複雜的天氣因子。因此，剖面圖顯示 N_{wv} 會隨著高度、時間和位置的不同而有明顯的變化，且難以預測。

利用式 (2.6) 和 (2.7) 可以求得天頂方向的乾分量延遲 (ZHD 或 ZDD) 和溼分量延遲 (ZWD):

$$ZHD = ZDD = 10^{-6} \int N_d(s) \cdot ds \quad (2.8)$$

$$ZWD = 10^{-6} \int N_{wv}(s) \cdot ds \quad (2.9)$$

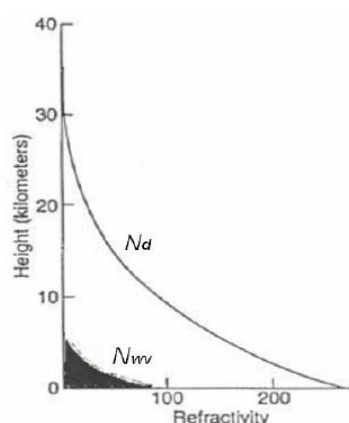


圖 2.9 反射係數與高度之關係(摘自 Brunner *et al.*, 1993)

因此天頂方向總延遲可由式 (2.8) 和 (2.9) 之和求得。溼分量折射率 N_{wv} 的積分函數是相當複雜的，由於水氣在時間和空間上的變化相當快速，因此溼空氣壓力是難以捉摸的。圖 2.10 所示為對流層延

遲量隨著衛星仰角不同的變化情形，陰影的部份為濕分量延遲隨著衛星仰角不同的變化情形。

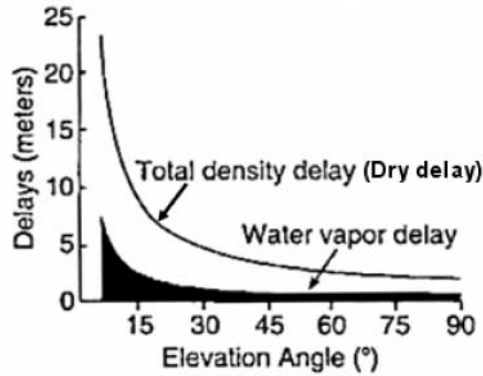


圖 2.10 對流層延遲與衛星仰角之關係(摘自 Brunner *et al.*, 1993)

§2.3.3 模式化天頂方向延遲量

雖然乾分量折射率 N_d 遵守理想氣體定律，要利用式 (2.8) 求得乾分量延遲時，仍然需要一些條件的假設，例如溫度和重力的影響 (Leick, 2004)。至於溼分量延遲的模型假設是非常困難的，因為水氣常會隨著時間與空間的變化有所改變，但是早期的學者仍有發表一些溼分量延遲模型 (Leick, 2004)。不過因為濕延遲量與地表氣象參數的相關性較小，因此所獲得的結果也不是太理想 (Dodson *et al.*, 1996; Leick, 2004)。

至今科學家已發展出多個對流層延遲誤差的改正模式，現有的全球性(global)對流層模型中較著名的有 Hopfield 模式、Modified Hopfield 模式以及 Saastamoinen 模式，分別簡單介紹如下。

(1) Hopfield 模式

Hopfield (1972) 所提出的天頂方向對流層延遲量模型表示式如下：

$$d_d^{Trop} = 77.6 \times 10^{-6} \frac{P_s H_d^e}{T_s 5} + 10^{-6} N_{ws} \frac{H_w^e}{5} \quad (2.10)$$

$$N_d = N_{ds} \frac{(H_d^e - H)^4}{(H_d^e)^4} \quad ; \quad N_{ws} = 3.73 + 10^5 \frac{e_s}{T_s^2}$$

其中 $H_d^e = 40136 + 148.72(T - 273.16)$ ， H_w^e 為一個四次方的函數， N_{ds} 在表面的乾折射率， H 為海平面的高度，單位為公里。Hopfield 並使用了 Smith 和 Weintraub 所提出的折射常數，其中 P_s 為表面壓力； T_s 為表面溫度。

(2) Modified Hopfiled 模式

如圖 2.11，Modified Hopfiled 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)：

$$D^{trop} = 10^{-6} \int_{Path} N_d \left[\frac{r_d - r}{r_d - R_E} \right]^4 ds + 10^{-6} \int_{Path} N_{wv} \left[\frac{r_w - r}{r_w - R_E} \right]^4 ds \quad (2.11)$$

N_d 、 N_{wv} 分別為乾、溼部分的折射率，可表示如下：

$$N_d = c_1 \frac{e}{T} \quad (2.12)$$

$$N_{wv} = c_2 \frac{e}{T} + c_3 \frac{e}{T^2} \quad (2.13)$$

其中

e : 水汽分壓(mb)

T : 絕對溫度

c_1 、 c_2 、 c_3 : 已知經驗係數 (empirical coefficient)

再將對流層延遲量表示為：

$$D_i^{trop} = 10^{-12} N_i \left[\sum_{k=1}^9 \frac{\alpha_{k,i}}{k} r_i^k \right] \quad (2.14)$$

其中

i : 分別表示乾 ($i=d$) 或濕 ($i=mv$) 部分的分量

ε : 衛星仰角 ($=90^\circ$ - 天頂距)

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

其他參數的定義為：

$$\alpha_{1,i} = 1$$

$$\alpha_{2,i} = 4a_i$$

$$\alpha_{3,i} = 6a_i^2 + 4b_i$$

$$\alpha_{4,i} = 4a_i(a_i^2 + 3b_i)$$

$$\alpha_{5,i} = a_i^4 + 12a_i^2b_i + 6b_i^2$$

$$\alpha_{6,i} = 4a_ib_i(a_i^2 + 3b_i)$$

$$\alpha_{7,i} = b_i^2(6a_i^2 + 4b_i)$$

$$\alpha_{8,i} = 4a_ib_i^3$$

$$\alpha_{9,i} = b_i^4$$

其中

$$a_i = -\frac{\sin \varepsilon}{h_i}$$

$$b_i = -\frac{\cos^2 \varepsilon}{2h_i R_E}$$

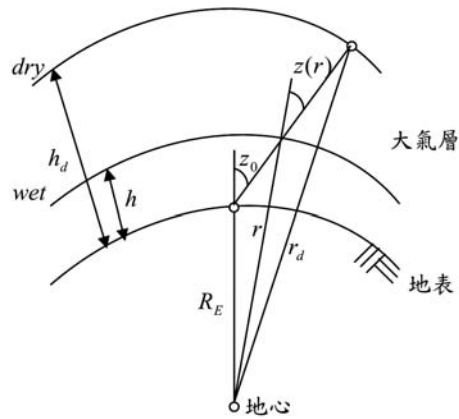


圖 2.11 對流層幾何路徑延遲(摘自 Hofmann-Wellenhof, 2001)

(3) Saastamoinen 模式

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(Saastamoinen 1973)：

$$D^{trop} = \frac{0.002277}{\cos z} \left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) \cdot e - B \tan^2 z \right] + \delta R \quad (2.15)$$

其中

p ：地表壓力

T ：地表絕對溫度

e ：水汽分壓

z ：天頂距

B 、 δR ：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。而對於乾延遲部份而言，只需要將精確的大氣壓力代入 Saastamoinen 模式即可得到對流層乾延遲量，其精度可達公厘(mm)等級(Janes and Langley, 1991)。

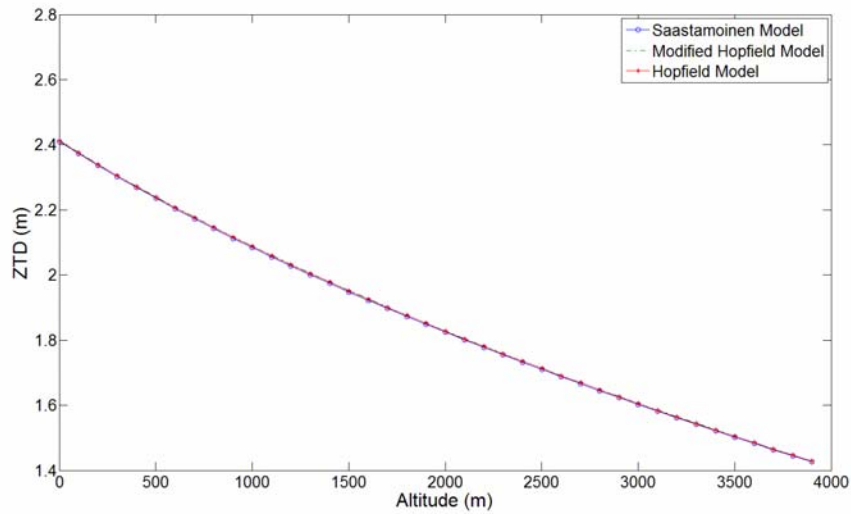


圖2.12 三模型對流層總延遲量比較圖

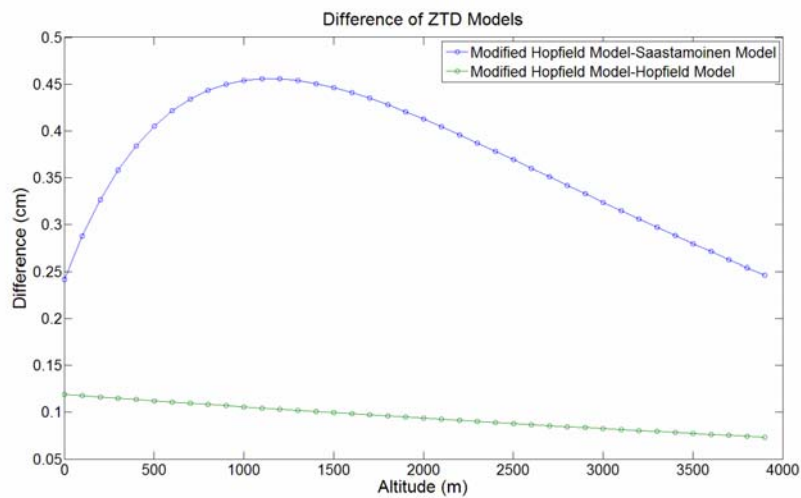


圖2.13 Modified Hopfield Model、Saastamoinen Model、和Hopfield Model的差異圖

圖2.12為三個全球模型在分別針對高度所作的天頂方向對流層總延遲量示意圖；圖2.13 為 Modified Hopfield 模型與 Saastamoinen 模型和 Hopfield 模型的 ZTD 差值。由圖可知，彼此的差值最大不到 0.5 公分，Modified Hopfield 模型與 Saastamoinen 模型最大的差值發生在高度約 1000 公尺左右，隨著高度的增加，差值也趨近減

小；Modified Hopfield 模型與 Hopfield 模型則呈現規則的線性遞減，最大差值約發生在接近海平面高度，約 0.12 至 0.13 公分差異。

§2.3.4 映射函數

對流層與平流層在頻率低於 30GHz 的情況下，皆為非色散性的媒介，因為對流層與平流層是無帶電的中性層。由於大氣中的無帶電中性層有 80% 發生在對流層，因此無帶電中性層通常指的是對流層 (Brunner *et al.*, 1993)。上述所提及的模型都是處於天頂方向討論，事實上，我們所觀測到的衛星分別處於不同的角度，對流層延遲亦會隨著衛星仰角而變化，如圖 2.12 所示。吾人可以利用映射函數把天頂方向的對流層總延遲量 (ZTD) 映射到不同衛星仰角的傾斜向 (slant path) 對流層延遲。有了適當的映射函數，即可以方便地模式化或估算測站天頂方向的對流層延遲而不用去分別估算不同仰角的對流層延遲 (Brunner *et al.*, 1993)。

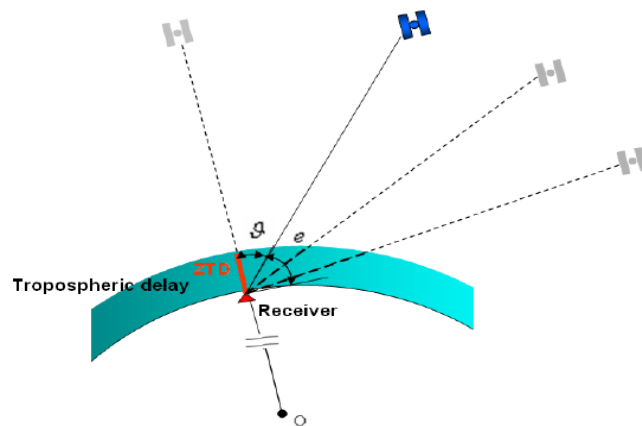


圖 2.14 GPS 訊號穿越對流層之路徑(摘自 Misra and Enge, 2001)

Black and Eisner (1984) 所建立的映射函數可以表示為衛星仰角及地表溫度的函數；而對於 7 度到 90 度仰角高度的衛星而言，由於溫度的影響可被忽略，因此其映射函數可簡化表示為 (Black and Eisner, 1984)：

$$MF(\varepsilon) = 1.001 / \sqrt{(0.001)^2 + 0.002 + \sin^2 \varepsilon} \quad (2.16)$$

Niell (1996) 建立的映射函數則不需依賴地表溫度等氣象參數，其乾延遲部分的映射函數是依據緯度、橢球高、一年中所在天數 (Day of Year, DOY) 計算而得；而濕分量映射函數只需要測站的緯度即可計算而得；此映射函數在北緯 $43^\circ \sim 75^\circ$ 擁有較佳的精度，且衛星仰角可低至約 3° (Shrestha, 2003)。映射函數表示式如下：

$$m_{hydro}(\varepsilon) = \frac{\frac{1}{1 + \frac{a_{hydro}}{1 + \frac{b_{hydro}}{1 + c_{hydro}}}}} \frac{1}{\sin(\varepsilon) + \frac{a_{hydro}}{\sin(\varepsilon) + \frac{b_{hydro}}{\sin(\varepsilon) + c_{hydro}}}} + \left[\frac{1}{\sin(\varepsilon)} - \frac{\frac{1}{1 + \frac{a_{ht}}{1 + \frac{b_{ht}}{1 + c_{ht}}}}} \frac{1}{\sin(\varepsilon) + \frac{a_{ht}}{\sin(\varepsilon) + \frac{b_{ht}}{\sin(\varepsilon) + c_{ht}}}} \right] \times \frac{H}{1000} \quad (2.17)$$

$$m_{wet}(\varepsilon) = \frac{\frac{1}{1 + \frac{a_{wet}}{1 + \frac{b_{wet}}{1 + c_{wet}}}}} \frac{1}{\sin(\varepsilon) + \frac{a_{wet}}{\sin(\varepsilon) + \frac{b_{wet}}{\sin(\varepsilon) + c_{wet}}}} \quad (2.18)$$

其中 ε 為衛星仰角； $a_{ht} = 2.53 \times 10^{-5}$ 公里， $b_{ht} = 5.49 \times 10^{-3}$ 公里， $c_{ht} = 1.14 \times 10^{-3}$ 公里， H 為高程；而 a_{hydro} 、 b_{hydro} 、 c_{hydro} 、 a_{wet} 、 b_{wet} 和 c_{wet} 在各緯度的平均係數如下表：

表 2.1: 乾分量映射函數的常數值(Shrestha, 2003)

乾分量 係數	緯度 (Latitude) 單位:度 (degree)				
	15	30	45	60	75
a_{hydro}	1.2769934e-3	1.2683230e-3	1.2465397e-3	1.2196049e-3	1.2045996e-3
b_{hydro}	2.9153695e-3	2.9152299e-3	2.9288445e-3	2.9022565e-3	2.9024912e-3
c_{hydro}	62.610505e-3	62.837393e-3	63.721774e-3	63.824265e-3	64.258455e-3

表 2.2: 濕分量映射函數的常數值(Shrestha, 2003)

濕分量 係數	緯度 (Latitude) 單位:度 (degree)				
	15	30	45	60	75
a_{wet}	5.8021897e-4	5.6794847e-4	5.8118019e-4	5.9727542e-4	6.1641693e-4
b_{wet}	1.4275268e-3	1.5138625e-3	1.457252e-3	1.5007428e-3	1.7599082e-3
c_{wet}	4.3472961e-2	4.6729510e-2	4.3908931e-2	4.4526982e-2	5.4736038e-2

由於 Niell 映射函數不需依賴地表氣象參數、適用於低仰角的狀況、並且精度高，因此近年來廣泛為各種 GPS 計算軟體所採用，例如 Bernese v5.0、GPSNet 等，是目前公認最佳的映射函數。在實際應用時，Niell 映射函數可搭配任一種天頂方向對流層延遲模型，常見的為 Saastamoinen 模式或是 Modified Hopfield 模式，由這些模式先獲得天頂延遲後再產生不同仰角的傾斜向延遲(Dach *et al.*, 2008)。

§ 2.4 精密單點定位技術之發展現況

傳統的 GPS 的電碼單點定位 (Single Point Positioning, SPP) 精度僅能達到公尺等級，很難滿足高精度定位的要求。因此利用載波相位觀測量進行差分的作法應運而生，藉由差分 (differencing) 的方式可以消除大部分的接收儀時錶差、衛星時錶差、對流層延遲等影響，並可以達到公分級的高精度。因此載波相位差分定位的方法在高精度靜態測量領域早已獲得肯定。不過，它需要建立已知基準站 (主站)，且某種程度受到基準站與未知站(移動站)之間的作業距離影響，也影響了 GPS 相對定位的作業效率與精度。

精密單點定位 (PPP) 是利用高精度的 GPS 衛星星曆和衛星時錶差，以及單台接收儀的雙頻載波相位觀測值進行定位，此一觀念最初是由美國噴射推進實驗室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 的 Zumberg 等人 (1997) 所提出，並在他們所開發的數據處理軟體上予以實現。而 PPP 定位方法僅利用單台接收儀即可在全球範圍內進行靜態或動態定位作業，再利用國際 GNSS 服務組織(International GNSS Service, IGS) 與 JPL 等機構所提供的後處理(post-processing)或即時(realtime)的精密星曆與衛星時錶資訊，實現了全球都可以使用高精度定位結果。

IGS 之連續觀測網如圖 2.13 所示。因此，精密單點定位在現在高精度的測量工程和動態高精度的導航定位都具有無可限量的應用前景。隨著 Galileo 與北斗 (Compass) 等 GPS 之外的全球導航定位系統相繼投入，可以預見未來精密單點定位在衛星導航定位領域上，將會產生重要的衝擊。

GPS 精密單點定位技術相較於傳統差分定位技術有其特殊之處。最重要的是，相對定位技術受限於已知基準站的坐標系統，因此

通常需要與 IGS 國際追蹤站進行較長時間的直接聯測才能妥當獲取高精度的 ITRF(International Terrestrial Reference System) 地心坐標，並且需使用高精度靜態數據處理軟體。而採用精密單點定位，則只需要單台接收儀就可以直接獲得高精度的 ITRF 定位成果 (Kouba and Héroux, 2001)。

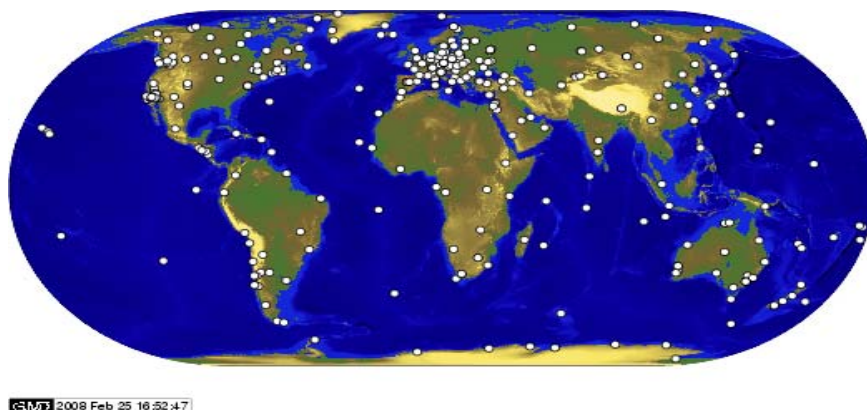


圖 2.15 IGS 觀測網

(摘自 <http://igsb.jpl.nasa.gov/network/netindex.html>)

IGS 有許多不同的數據處理中心，每天處理全球幾十個甚至幾百個永久 GPS 追蹤站的觀測數據，計算並發佈高精度的衛星軌道和衛星時錶產品 (Parkinson and Spilker, 1996)。即用戶可以直接利用 IGS 的產品，採用精密單點定位技術就可以實現在 ITRF 框架下的高精度。因此採用精密單點定位可以降低用戶購買接收儀的成本，因為精密單點定位技術只需要單台接收儀就可以實現高精度的靜態或動態定位。且在未來一旦歐盟 Galileo、將進行與 GPS 系統訊號相容化的俄國 GLONASS、快速發展的中國 Compass 等系統加入之後，太空中也就多了可供精密單點定位運用的衛星，將可提升精密單點定位的精度和可靠性。此外，由於精密單點定位是基於非差分 (non-differencing) 的模型，所以在多系統組合定位中，模型中保留了所有資訊的絕對量，這對於從事大氣、氣象和潮汐等相關領域的研究具有明顯的優勢。

目前國外導航定位領域相關之產學界對於 PPP 精密單點定位技術的發展與相關應用之推廣。美國導航學會所主辦之年會亦曾於 2003 及 2004 年連續二年提供精密單點定位之議程；足見對於該技術發展之重視。加拿大 NovAtel 公司曾針對精密單點定位技術進行五次空載系統之動態定位所做之測試；結果顯示其 3 維定位之均方根誤差(與導航級 INS/GPS 定位系統搭配載波相位差分定位所產生的 5 公分級精度的動態軌跡相較)可達 5 公分。在靜態定位測試方面亦利用 IGS 之追蹤站資料進行 24 小時觀測資料之計算；與已知檢核坐標相較之下其 3 維精度可達 2 至 5 公厘。

目前可提供 PPP 功能的單機版商用軟體包括 Bernese GPS software 與 Waypoint 之 Grafnav 軟體。同時加拿大 University of Calgary 亦自行發展 P3 軟體，其最新版本包含具備 GPS/GLONASS PPP 之功能與具備下載即時精密星曆之即時版 PPP，唯上述軟體要價至少 1 萬美金以上。除了這些付費軟體之外，目前有許多機構提供線上免費 PPP 計算之功能，使用者只需上傳相關檔案即可，這些免費的 PPP 計算服務整理如表 2.3。

表 2.3 線上 PPP 服務之機構

	服務平台名稱	機構	國別	網址
1	CSRS-PPP	Natural Resources Canada	加拿大	http://ess.nrcan.gc.ca/2002_2006/gnd/csrs_e.php
2	GAPS	U. of New Brunswick	加拿大	http://gaps.gge.unb.ca/ppp/indexv2.php
3	APPS	JPL	美國	http://apps.gdgps.net/
4	MagicGNSS	GMV	西班牙	http://magicgnss.gmv.com/

Cai *et al.*, (2007) 利用無差分精密單點定位演算法 (PPP) 分析結合 GPS 和 GLONASS 的靜態定位精度，該研究指出，增加 GLONASS 衛星可以增加衛星幾何分布，加快解算收斂時間，卻無法提升位置坐標、接收機時錶差和對流層延遲量的精度，作者研判在 2007 年 4 月平均僅能接收 2-3 顆 GLONASS 衛星情況下，所造成的結果；未來如果俄羅斯與歐盟可增加衛星數目，對精密單點定位演算法的使用者將可縮短解算收斂時間，使用者便可以減少觀測時間。

在國內 PPP 技術之相關發展方面，國土測繪中心與國立成功大學測量及空間資訊學系共同研發一套可供處理動態與靜態 GPS 觀測量之 PPP 軟體 (楊名、江凱偉，2009)。使用 IGS 最終產品進行動態精密單點定位時，平面方向定位精度可以達到 3~5 公分左右；高程方向定位精度則在 10 公分左右。

Tao *et al.* (2007) 利用無差分精密單點定位 (PPP) 演算法估算對流層總延遲量 IGS 的 11 個觀測站，並與 IGS 官方所得到的結果做比較，實驗指出 PPP 所得的結果與 IGS 官方所得到的對流層總延遲僅有 1-2 公分的差異；在可降水汽 (PWV) 方面，Tao *et al.*(2007) 利用所得到的總延遲量減去 IGS 官方所提供的乾延遲量改正而得到溼延遲量，進而利用轉換係數得到可降水汽，PPP-PWV 與 IGS-PWV 僅有 3 mm 以內的差異，由此實驗數據可見，精密單點定位演算法可適用於估算天頂對流層延遲量。Tao *et al.* (2007) 亦指出，精密單點定位演算法結合 GPS 網可以提供為一個有效率且經濟的工具，可用之估算天頂對流層延遲量與可降水汽，並應用在相關的領域上。

§ 2.5 GNSS 發展現況之回顧

GPS 系統現代化之具體實現則於 2005 年展開，該年 9 月發射的最新 GPS Block IIR-M 衛星已經開始傳送 L2C 觀測量。此觀測量

為調制在 L2 頻道的最新電碼觀測量，除了可以幫助地面接收儀對於 L2 載波觀測量的連續接收、減少由訊號失鎖所產生的週波脫落之外，更提供了訊號強度較 L1 C/A 電碼觀測量更強、品質更好的 L2 電碼觀測量以消滅電離層效應，提昇定位精度。GPS Block IIR-M 系列之衛星是 Block IIR 的第二部份；總共包含了 8 顆衛星 (Misra and Enge, 2001)。目前已有 8 顆 Block IIR-M 衛星正在運作中 (PRN 17、PRN 31、PRN12、PRN15、PRN29、PRN7、PRN01 與 PRN29)，如圖 2.16 所示 2010 年 6 月 30 日之星群。最近一次發射時間 2010 年 5 月 28 日，此次發射了具備播送 L5 訊號之 Block IIF 系列衛星。

然而 2009 年 3 月發射的 PRN1(IIR-20M) 據指出目前有訊號失真的現象。該衛星於 2009 年 3 月 24 日發射進入軌道，例行的早期軌道校驗程序發現 GPS IIR-20(M) 衛星的信號與其他 GPS IIR-M 衛星信號的運行不一致。因為該衛星尚處於早期的軌道校驗階段，而且並未被納入到 GPS 運營星座中，因此世界範圍的 GPS 用戶沒有受到影響。由美國空軍和承包商專家成立的專門反應小組正全力對故障原因進行調查。廣泛的在軌信號性能測試和地面試驗表明，GPS IIR-20(M) 所出現的情況與用於 L5 示範訊號埠有關。此示範訊號埠現在已經開啟並按計劃運行，成功地開始使用 L5 國際通信聯盟頻率，以確保該頻率分配可用於支持未來的 L5 用戶。

GPS CONSTELLATION STATUS FOR 30 JUN 2010

PLANE	SLOT	SVN	PRN	BLOCK-TYPE	CLOCK
A	1	39	09	IIA	CS
A	2	52	31	IIR-M	RB
A	3	38	08	IIA	CS
A	4	48	07	IIR-M	RB
A	6	27	27	IIA	RB
B	1	56	16	IIR	RB
B	2	62	25	IIF	CS
B	3	44	28	IIR	RB
B	4	58	12	IIR-M	RB
B	6	49	01	IIR-M	RB
B	9	30	30	IIA	CS
C	1	57	29	IIR-M	RB
C	2	33	03	IIA	CS
C	3	59	19	IIR	RB
C	4	53	17	IIR-M	RB
C	6	36	06	IIA	RB
D	1	61	02	IIR	RB
D	2	46	11	IIR	RB
D	3	45	21	IIR	RB
D	4	34	04	IIA	RB
D	5	24	24	IIA	CS
E	1	51	20	IIR	RB
E	2	47	22	IIR	RB
E	3	40	10	IIA	CS
E	4	54	18	IIR	RB
E	5	23	32	IIA	RB
E	6	50	05	IIR-M	RB
F	1	41	14	IIR	RB
F	2	55	15	IIR-M	RB
F	3	43	13	IIR	RB
F	4	60	23	IIR	RB
F	5	26	26	IIA	RB

圖 2.16 2010 年 6 月 30 日之 GPS 星群
(摘自 <http://www.navcen.uscg.gov/navinfo/Gps/>)

美國空軍小組已經識別出 GPS IIR-20 (M)導航信息的幾個參數，這些參數經過調校後可修正誤差，並使 GPS IIR-20 (M)衛星與 GPS 性能標準保持一致。

第二步的重大改變是發展 GPS Block IIF 衛星，此系列目前規劃總共包含至少 12 顆衛星。目前美國波音公司將原訂於 2008 年 8 月由 Delta IV 火箭發射之計畫因故推遲至今年，GPS IIF 之第一顆衛星已於 2010 年 5 月 28 日發射。目前預計於 2012 年陸續完成發射完 12 顆衛星。GPS Block IIF 衛星將傳送第三個頻率 L5(1176.45MHz) 的觀測量，屆時 GPS 將正式由雙頻觀測躍升為三頻觀測系統 (Misra and Enge, 2001)。此一改變將會大幅改變現有相對定位基線計算的資料處理方式，改變確定載波觀測量週波未定值之計算方法，藉由三頻觀測量之線性組合大幅提升目前雙頻基線計算的求解效率 (楊名、江凱偉，2009)

由俄羅斯發展的 GLONASS 導航衛星系統曾於 1995 年完成部署，隨後由於衛星生命期只有三年與俄羅斯政府財力不足的問題，衛星數目由 1995 年的 26 顆直線下降至 2001 年的 7 顆。但是自 2001 年起俄羅斯政府決定繼續維持 GLONASS 之運作並提出類似 GPS 現代化之計畫。

該計畫第一步為在 2003 年後所發射的 GLONASS-M 衛星中將第二個民用訊號調制在 L2 頻率中以增加定位精度；接下來則是在 2008 年後所發射的 GLONASS-K 衛星中將第三個民用訊號調制在 L3 頻率以進一步提升新一代 GLONASS 的性能。該計畫預計在 2010 年將衛星數量提昇 24 顆以提供全球覆蓋的高精度導航服務。除了致力於 GLONASS 的性能提升之外，俄羅斯當局並與美國與歐盟針對未來整合涵蓋 GPSIII, Galileo 及 GLONASS 的未來 GNSS 達成相關技術合作與交流的協議。

如同現代化的 GPS 一樣，未來的 GLONASS 可以提供三頻民用訊號以供高精度導航、定位及時間等相關應用領域之用。如同 GPS 一樣，GLONASS 為一包含軍用及民用等雙重用途之系統。圖 2.15 顯示為 2010 年 6 月 30 日的 GLONASS 星群。表中顯示目前有 23 顆 GLONASS 衛星，皆為現代化具備雙頻民用訊號的 M 系列衛星現代化的衛星，目前可使用的衛星有 21 顆，其餘 2 顆為備用衛星。而最近的 GLONASS 衛星三星發射的時間為 2009 年 12 月 14 日 (衛星編號分別為 730、733 及 734)。未來 K 系列衛星之 L1CR 及 L5R 播送碼分多址(CDMA) 的訊號。如此未來包含 GPS、GLONASS、Galileo 與 Compass 皆會播送碼分多址 (CDMA) 的訊號，這有助於硬體製造商設計價格更為低廉但精度更高之多系統接收儀，同時軟體設計者亦能利用共頻的多系統訊號設計更為有效的聯合資料處理演算法。

Orb. pl.	Orb. slot	RF chnl	# GC	Launched	Operation begins	Operation ends	Life-time (months)	Satellite health status		Comments
								In almanac	In ephemeris (UTC)	
I	1	01	730	14.12.09	30.01.10		6.6	+	+ 10:59 04.07.10	In operation
	2	-4	728	25.12.08	20.01.09		18.3	+	+ 10:59 04.07.10	In operation
	3	05	727	25.12.08	17.01.09		18.3	+	+ 10:59 04.07.10	In operation
	4	06	733	14.12.09	24.01.10		6.6	+	+ 11:45 04.07.10	In operation
	5	01	734	14.12.09	10.01.10		6.6	+	+ 12:00 04.07.10	In operation
	7	05	712	26.12.04	07.10.05		66.3	+	+ 12:01 04.07.10	In operation
	8	06	729	25.12.08	12.02.09		18.3	+	+ 10:59 04.07.10	In operation
II	9	-2	722	25.12.07	25.01.08		30.3	+	+ 10:59 04.07.10	In operation (L1 only)
	10	-7	717	25.12.06	03.04.07		42.3	+	+ 10:59 04.07.10	In operation
	11	00	723	25.12.07	22.01.08		30.3	+	+ 10:59 04.07.10	In operation
	13	-2	721	25.12.07	08.02.08		30.3	+	+ 12:00 04.07.10	In operation
	14	-7	715	25.12.06	03.04.07		42.3	+	+ 12:00 04.07.10	In operation
	15	00	716	25.12.06	12.10.07		42.3	+	+ 12:00 04.07.10	In operation
III	17	04	718	26.10.07	04.12.07		32.3	+	+ 12:01 04.07.10	In operation
	18	-3	724	25.09.08	26.10.08		21.3	+	+ 10:59 04.07.10	In operation
	19	03	720	26.10.07	25.11.07		32.3	+	+ 10:59 04.07.10	In operation
	20	02	719	26.10.07	27.11.07		32.3	+	+ 10:59 04.07.10	In operation
	21	04	725	25.09.08	05.11.08		21.3	+	+ 10:59 04.07.10	In operation
	22	-3	731	02.03.10	28.03.10		4.1	+	+ 11:15 04.07.10	In operation
			726	25.09.08	13.11.08	31.08.09	21.3			Spare
	23	03	732	02.03.10	28.03.10		4.1	+	+ 12:00 04.07.10	In operation
			714	25.12.05	31.08.06	19.03.10	54.3			Spare
24	02	735	02.03.10	28.03.10		4.1	+	+ 12:00 04.07.10	In operation	

圖 2.17 2010 年 6 月 30 日之 GLONASS 星群

(摘自 <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/>)

Galileo 的原始計畫可分為三期：第一期 (2001 迄今) 主要為研發階段；除了完成相關系統的設計外，最重要的是衛星驗證(In-Orbit Validation, IOV)。而 IOV 的主要步驟原為於 2005 年底發射 30 顆衛星中的 4 顆以驗證相關系統；然而發展期間不可抗力之經費及技術發展問題等致使第一期的計畫有所延誤。如前所述，第一顆 Galileo 衛星 (GIOVE-A) 延遲至 2005 年 12 月 28 日成功發射升空。第二期主要為完成衛星剩餘 26 顆衛星的發射與地面相關硬體設施的建設。第三期為完成整個系統設置並開始提供商業運轉。但因第一期計畫的延誤導致整個計畫達到全面商業運轉的時程會延至 2013 ~2015 年。第二顆測試衛星 (GIOVE-B) 於 2006 年完成組裝並於 2008 年 4 月 27 日完成發射。

中國政府已決定投注大量資源發展類似 GPS 或 Galileo 自主的全球導航衛星系統，稱為北斗二號 (Compass Navigation Satellite System, CNSS)。與北斗一號以 3 顆衛星提供區域的導航服務之功能相較之下，未來的北斗二號衛星之數量預計將達到 35 顆，這些衛星群將由 5 顆靜止衛星、30 顆的中軌道衛星與傾斜軌道衛星所組成。中國官方目前規劃於 2010 年完成發射 10 顆衛星之計畫，同時完整的 30⁺ 星群預計將於 2015 年建置完成。

未來的 Compass 將提供五種免費的公開服務(Open Service)與 5 種授權服務(Authorized Service)。該系統之第一顆 MEO 衛星 (Compass-M1)已於 2007 年 4 月 17 日發射升空。而該系統第一顆靜止衛星已於 2009 年 4 月 14 日發射，且於 2010 年 1 月 17 日發射第三顆衛星。

第三章 開發絕對天頂對流層延遲計算軟體

本計畫將利用 e-GPS 站，搭配地面氣象設備觀測資料，開發利用 e-GPS 站觀測資料結合 PPP 技術發展絕對對流層延遲之估算軟體，故本章節擬針對相關數學模型、資料處理流程與程式介面提供詳細說明。

§ 3.1 PPP 精密單點定位數學模型

經過近年的發展與整理，常用的 PPP 數學模型可列舉如下：

1. 傳統模型；使用雙頻載波相位與虛擬距離觀測量所組成之無電離層模型 (Zumberg *et al.*, 1997)，其公式簡化如下：

$$P_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} p_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} p_2 = \rho + cdl + d_{trop} + \varepsilon(p_{IF}) \quad (3.1)$$
$$\Phi_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_2 = \rho + cdl + d_{trop} + B_{IF} + \varepsilon(\Phi_{IF})$$

其中 P_{IF} 為虛擬距離 P_1 與 P_2 之無電離層線性組合； Φ_{IF} 為載波相位 Φ_1 與 Φ_2 無電離層線性組合； f_1^2 為載波頻率； $B_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_1 N_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_2 N_2$ 為無電離層組合之週波未定值； $\varepsilon(P_{IF})$ 與 $\varepsilon(\Phi_{IF})$ 分別為虛擬距離及載波相位觀測量之觀測量雜訊及未被模型化的誤差； $dl = dt - dT$ ， dt 為衛星時錶差而 dT 為接收儀時錶差。

U of C 模型；加拿大卡加利大學空間資訊工程系所發展之模型 (Shen and Gao, 2002)。該模型與傳統模型不太一樣；除了採用無電離層相位組合外亦採用 L1 與 L2 二個頻率的電碼與相位的平均形式組合，如此的組合亦有降低電離層效應之功效。相關的公式列舉如下：

$$\begin{aligned}
P_{IFL1} &= \frac{1}{2}(p_1 + \Phi_1) = \rho + cdl + d_{trop} + \frac{1}{2}\lambda_1 N_1 + \varepsilon(p_{IFL1}) \\
P_{IFL2} &= \frac{1}{2}(p_2 + \Phi_2) = \rho + cdl + d_{trop} + \frac{1}{2}\lambda_2 N_2 + \varepsilon(p_{IFL2}) \\
\Phi_{IF} &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}\Phi_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}\Phi_2 = \rho + cdl + d_{trop} + B_{IF} + \varepsilon(\Phi_{IF})
\end{aligned} \tag{3.2}$$

其中 P_{IFL1} 與 P_{IFL2} 分別為 L1 與 L2 二個頻率上虛擬距離與載波相位組合之觀測量； Φ_{IF} 為載波相位 Φ_1 與 Φ_2 無電離層線性組合； $\varepsilon(P_{IFL1})$ 、 $\varepsilon(P_{IFL2})$ 與 $\varepsilon(\Phi_{IF})$ 分別為三種觀測量之觀測量雜訊及未被模型化的誤差。

2. 無週波未定值模型；與上述二種模型不同，此種模型採用無電離層虛擬距離組合觀測量與時刻差分的載波相位觀測量(對前後時刻的無電離層載波相位線性組合求差)。相關公式列舉如下：

$$\begin{aligned}
P_{IF} &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} p_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} p_2 = \rho + cdl + d_{trop} + \varepsilon(p_{IF}) \\
\Phi_{IF} &= \Phi_{IF}(i) - \Phi_{IF}(i-1) \\
&= \rho(i) - \rho(i-1) + c(dl(i) - dl(i-1)) + d_{trop}(i) - d_{trop}(i-1) + \varepsilon(\Delta\Phi_{IF}) \\
&= \Delta\rho + c\Delta dl + \Delta d_{trop} + \varepsilon(\Delta\Phi_{IF})
\end{aligned} \tag{3.3}$$

式 (3.3) 為無電離層線性組合之時刻差分； $\Delta\rho$ 、 $c\Delta dl$ 與 Δd_{trop} 分別為二個相鄰時刻之幾何距離差、接收儀時錶差與對流層延遲之差。觀測量之觀測量雜訊及未被模型化的誤差。 ε 為組合觀測量之觀測量雜訊及未被模型化的誤差。

到目前為止，傳統模型 (式(3.1)) 為三種模型中應用最廣泛的一種，然其在實際應用中也有不足之處。首先就由無電離層相位組合觀測值中的組合週波未定值只能以實數參數進行估計。故無法利用週波未定值的整數特性。未知參數的估值只能隨著觀測量的累積與幾何的變化逐步地區於收斂。其次，組合觀測值的雜訊被放大了。式 (3.1) 中

的觀測雜訊項皆為原始電碼和載波相位觀測量雜訊的 3 倍。雜訊越大，則收斂的位置誤差也越大，故計算過程中趨於收斂所需的時間也越長。

U of C 模型中的電碼和載波相位的這種組合不但可以消除一階電離層的影響，它還有效地降低組合觀測量中的雜訊。與原始的電碼觀測雜訊相比，組合觀測值的雜訊只有前者的一半，這點是相當重要的。如果觀測量雜訊與未被模型化的殘差之和越小，則未知參數的估計收斂越快，估值也越精確。此模型不同於傳統模型，其最大特點就是可以分別估計 L1 與 L2 之整數週波未定值，進行週波未定值的虛擬固定 (Ambiguity Pseudo Fixing) (Shen and Gao, 2002)，從而可以加速解算過程的收斂。

無週波未定值模型採用前後觀測時刻之相位差來消除初始相位週波未定值，如此可以有效地降低對電腦資源的需求。相位差觀測量只能求解位置差，而無法得到使用者的絕對位置解。可由電碼確定位置再由相位觀測量確定位置差，將每個時刻的位置和位置差組合起來即可獲得接收儀的動態軌跡。時刻相位差是針對同一顆衛星的二個相位觀測量來求差的，若前後時刻追蹤的衛星有改變，則這些衛星的相位觀測值實際上沒被利用，從而造成觀測資料的使用率相對較低。此外，相位差觀測值雖消除了週波未定值參數，但卻增加觀測值間的數學相關性。實際應用的過程中，為了數據處理的方便，這種相關性一般是被忽略的。綜上所述，此三種模型最主要的區別為週波未定值之處理策略，表 3.1 比較這三種模型之週波未定值處理策略、優點及缺點。

表3.1 三種 PPP 模型之比較

比較項目/模型	傳統模型	UofC 模型	無週波未定值模型
週波未定值之處理策略	迭代計算週波未定值之實數解	估計 L1 與 L2 之整數週波未定值，進行週波未定值的虛擬固定	無週波未定值求解
優點	數學模式簡單	雜訊變小與收斂速度快	處理速度快與無週波未定值求解問題
缺點	雜訊放大 3 倍與速度較慢	較耗電腦記憶體資源	相關性與無法直接求得絕對坐標

本計畫開發的精密單點定位對流層延遲量估算軟體中，可利用傳統模型與 UofC 模型進行解算。

§ 3.2 PPP 精密單點定位之參數估計策略

在無差分精密單點定位中，被估計之參數可分為二類；一為時不變參數，如坐標及整數週波未定值；另一為隨機參數，如對流層延遲及時錶差。所使用的最佳化推估工具除了最小二乘法之外亦引入卡曼濾波器之方法。在處理 GPS 數據時，除須考慮參數模型外亦需顧及其隨機模型。

在無差分精密單點定位之數據處理過程中，主要考慮對流層延遲及時錶差之隨機模型。由於大氣層中水汽分佈隨時間不規則地變化，故其影響具備較大之隨機性。意即透過模型改正後仍有無法消除之殘差。這些殘差並非單純的白雜訊；事實上這些殘差可被認定為一系列時間相關的隨機過程的疊加，故對流層延遲之隨機模型可使用一階高斯馬可夫模型或是隨機遊走 (Random Walk) 模型。

在差分相對定位中，一般可使用二次差分之方式消除時錶差之影響，故可以省略時錶差之隨機模型。然而在精密單點定位中，時錶差是當作未知參數處理，此時需顧及其隨機模型。可以採用多項式表示時錶差變化及其漂移植，多項式的階數取決於時錶的穩定度。因時錶差變化較大故須使用高階多項式，如此整個模型較為複雜。故亦可考慮使用白雜訊過程來描述時錶差之隨機過程，此法較為簡單，且其等同於二次差分定位中消除時錶差之方式。

§ 3.2.1 遞迴式最小二乘法

在測量、通訊與控制等領域中，為了決定某些參數，常常需要進行一系列的觀測。由於條件的限制，往往只能對未知量的某些函數進行觀測，且觀測一定含有雜訊。估計理論實際上就是根據一定的準則，利用這些受到雜訊污染的觀測值，對參數進行最佳化估計。參數最佳化估計可區分為參數估計和狀態估計。參數和狀態的基本區別在於前者隨時間保持不變或只發生緩慢變化，而後者是隨時間變化之時間變量，及隨機過程。故一般認定參數估計是靜態估計而狀態估計為動態估計。此二者之關係緊密，透過把靜態估計的方法與動態隨機過程之內不規律結合起來就可以得到動態估計方法。

關於隨機觀測量的處理方法可以追溯到高斯 (C. F. Gauss)。他在西元 1800 年左右提出了最小二乘法，並用於天體軌道之計算。到了上世紀 40 年代，維納 (N. Wiener) 對於狀態估計問題做了大量的研究工作，他為瞭解決防空系統的問題推導出連續時間的平穩隨機過程。這些理論在控制與通訊等領域得到了廣泛的應用。但其理論不足之處在於求解複雜與無法即時處理。無法藉由觀測時間的增加而適應新的情況，不適用於向量和非穩態狀態之濾波。隨著空間定位技術的發展，這些推估工具就略顯不足。

到了上世紀 60 代，卡曼 (R. E. Kalman) 首先採用狀態空間的概念，從而改變了對濾波問題的一般描述。它不是直接給出信號過程的二階特性或頻譜密度函數，而是把訊號過程視為在白色雜訊作用下一個線性系統之輸出，而此種輸入輸出之關係可用一個狀態方程式來描述。如此所研究的訊號可以是平穩的靜態隨機過程亦包含非穩態的向量隨機過程。從而克服了經典濾波的缺點。其次，卡曼將機率論與數理統計領域的新成果結合，提出了一種嶄新的線性遞迴式濾波方法。藉由此法，不需要儲存過去的觀測數據，當新的數據被觀測後，只要根據新的數據和前一時刻的狀態估值，借助於適當的狀態轉移矩陣，如此即可估計新的狀態。隨著觀測時間的增加，它可以適應新的情況並大量減少對計算機的儲存量與計算量，如此增加即時應用之潛力。

在精密單點定位之計算過程中會使用到遞迴式最小二乘法與卡曼濾波器等最佳化推估工具。最小二乘估計是測量數據處理基本的數學工具。最小二乘估計可以不考慮觀測值的任何統計特性，僅根據觀測值及其觀測數學模型即可確定參數：

$$f(x) = Ax = l + v \quad (3.4)$$

其中 x 為被估計參數， $f(x)$ 觀測模型， A 為係數矩陣， l 為觀測值， v 為觀測誤差。根據誤差平方和 $v^T v$ 最小準則估計出參數：

$$x = (A^T A)^{-1} l \quad (3.5)$$

若觀測值的變方-協變方矩陣 Q 已知，則可得參數的加權最小二乘估計解：

$$x = (A^T P A)^{-1} A^T P l \quad (3.6)$$

其中 $P = Q^{-1}$ 。

如果還已知參數的先驗變方-協變方矩陣 Q_x ，則可得參數的最小二乘估計：

$$x = (A^T P A + P_x)^{-1} A^T P l \quad (3.7)$$

$$P_x = Q_x^{-1} \quad (3.8)$$

對於 GPS 即時動態定位情況，還需考慮其計算所佔用的時間。因此，為簡化計算，可採用最小二乘估計遞迴演算法：

$$P_{k+1} = P_k - P_k A_{k+1}^T (A_{k+1} P_k A_{k+1}^T + r_{k+1})^{-1} A_{k+1} P_k \quad (3.9)$$

$$\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k + P_{k+1} A_{k+1}^T r_{k+1}^{-1} (l_{k+1} - A_{k+1} \hat{X}_k) \quad (3.10)$$

相應的初值為

$$P_0 = (A_0^T r_0^{-1} A_0)^{-1} \quad (3.11)$$

$$\hat{X}_0 = P_0 A_0^T r_0^{-1} l_0 \quad (3.12)$$

式中 A_{k+1} 為第 $k+1$ 次觀測的係數矩陣

l_{k+1} 為第 $k+1$ 次觀測的觀測值

r_{k+1} 為第 $k+1$ 次觀測誤差變方矩陣

\hat{X}_{k+1} 為 $k+1$ 次觀測後的估值

P_{k+1} 為其相應的變方矩陣

可以看出，新的估計是由前 k 次觀測估計 \hat{X}_k 和根據新的觀測數據 l_{k+1} 對 \hat{X}_k 進行修正而得到 $k+1$ 次觀測後估計 \hat{X}_{k+1} ，這樣計算新的估計就不必儲存過去的測量數據，降低了對計算機資源的要求，而且大大提高了處理速度。若令

$$K_{k+1} = P_k A_{k+1}^T (A_{k+1} P_k A_{k+1}^T + r_{k+1})^{-1} \quad (3.13)$$

則

$$\hat{X}_{K+1} = \hat{X}_K - K_{K+1}(l_{K+1} - A_{K+1}\hat{X}_K) \quad (3.14)$$

$$P_{K+1} = [I - K_{K+1}A_{K+1}]P_K \quad (3.15)$$

以上即是遞迴最小二乘估計的計算公式。但一般最小二乘演算法沒有考慮參數的狀態方程及狀態參數的先驗資訊。若把狀態方程及狀態參數的先驗資訊轉化為相應的觀測方程，又存在狀態參數的每次實現都要作為未知參數，從而需要大量的甚至無法滿足的計算機內存。因此，需要考慮更有效的卡曼濾波演算法。

§ 3.2.2 卡曼濾波器

物體的運動可以用兩種模型來表示，一種為動力 (Dynamic) 模型，它根據作用於物體上的作用力由牛頓第二運動定律來表示。另一種稱為動態 (Kinematic) (狀態) 模型，它基於物體的運動狀態參數的變化來表達。利用最小二乘方法處理 GPS 數據的特點是模型簡單，無需瞭解 GPS 接收儀位置及各種誤差因數的狀態特徵。在 GPS 觀測中，不同時刻的觀測存在一定的相關關係，如未發生週波脫落情況下，整數週波未定值保持不變；對流層影響按一定的規律緩慢變化等等。最小二乘方法難以充分利用這些規律和相互關係。卡曼濾波是 1960 年由卡曼提出的一種線性最小方變方估計。它引入了狀態空間估值。卡曼濾波具有如下特點：

- (1) 演算法是遞迴的，使用狀態空間法在時域內設計濾波器，所以卡曼濾波適用於對多維隨機過程估計。
- (2) 採用動態方程即狀態方程描述被估計量的動態變化規律，被估計量既可以是平穩的，也可以是非平穩的。

卡曼濾波器不但廣泛用於 GPS 動態定位，而且也可在靜態定位中應用。在靜態情況下，它相當於遞迴式平差。卡曼濾波器還常用於週波脫落檢測以及週波未定值分解。

假設線性離散系統的狀態方程和觀測方程為：

$$X_{K+1} = \Phi_{K+1,K} X_K + \Gamma_K w_K \quad (3.16)$$

$$z_{K+1} = H_{K+1} X_{K+1} + v_{K+1} \quad (3.17)$$

式中 X_K 為 n 維狀態向量。

$\Phi_{K+1,K}$ 為 $n \times n$ 維的一步狀態轉移矩陣，它是一個具有以下性質的非異矩陣：

$$(1) \Phi_{K,K} = I \quad (n \times n \text{ 單位矩陣})$$

$$(2) \Phi_{K+1,K} \Phi_{K,K+1}^{-1}$$

$$(3) \Phi_{K+1,K} \Phi_{K,K-1} = \Phi_{K+1,K-1}$$

Γ_K 為 $n \times p$ 維動態雜訊驅動矩陣

w_K 為 p 維系統動態雜訊向量， $\{w_K\}$ 為零均值白雜訊序列，即

$$E\{w_K\} = 0 \quad (3.18)$$

$$E\{w_K \bullet w_l^T\} = Q_K \delta_{kl} \quad (3.19)$$

其中 Q_K 為一已知的非負矩陣， δ_{kl} 為克羅尼克 δ 函數

z_{K+1} 為 m 維觀測向量

H_{K+1} 為 $m \times n$ 觀測矩陣

v_{K+1} 為 m 維觀測雜訊向量， $\{v_K\}$ 為與系統動態雜訊 $\{w_K\}$ 不相關的零期望值、白雜訊序列

$$E\{v_k\} = 0 \quad (3.20)$$

$$E\{v_k \bullet v_l^T\} = R_k \delta_{kl} \quad (3.21)$$

$$E\{w_k \bullet v_k^T\} = 0 \quad (3.22)$$

R_k 為一已知的非負矩陣

利用線性離散系統的狀態方程和觀測方程，即可進行卡曼遞迴估計，卡曼濾波的基本計算過程歸結為預測、濾波增益和濾波計算三步。

(1) 預測的計算

首先根據前一次濾波值 $\hat{X}(k-1/k-1)$ (或初值) 計算預測值：

$$\hat{X}(k/k-1) = \Phi(k, k-1)\hat{X}(k-1/k-1) \quad (3.23)$$

根據前一次得到的濾波誤差變方矩陣 $P(k-1/k-1)$ (或初值) 及系統雜訊的變方矩陣 Q 計算預測誤差變方矩陣：

$$P(k/k-1) = \Phi(k, k-1)P(k-1/k-1)\Phi^T(k, k-1) + \Gamma(k-1)Q(k-1)\Gamma^T(k-1) \quad (3.24)$$

(2) 計算卡曼濾波增益矩陣

其濾波增益矩陣為：

$$K(k) = P(k-1/k-1)H^T(k)[H(k)P(k/k-1)H^T(k) + R(k)]^{-1} \quad (3.25)$$

根據新的觀測值 $z(k)$ 得到

$$v(k) = z(k) - H(k)\hat{X}(k/k-1) \quad (3.26)$$

(3) 濾波估計值計算

計算濾波估計：

$$\hat{X}(k/k) = \hat{X}(k-1/k-1) + K(k)v(k) \quad (3.27)$$

計算濾波誤差變方矩陣：

$$P(k/k) = [I - K(k)H(k)]P(k/k-1) \quad (3.28)$$

將濾波估計存入計算機，等待下一時刻得到新的觀測值，重覆上述計算過程。可以看出，濾波過程是以不斷地“預測 - 修正”的遞迴方式進行計算，先進行預測值計算，再根據觀測值得到的新資訊和卡曼增益（加權項），對預測值進行修正。由濾波值可以得到預測值，又由預測值得到濾波值，其預測和濾波相互作用，並不要求儲存任何觀測數據，就可以進行即時估計。

從理論上來看，隨著觀測數據的增多通過卡曼濾波可以得到更為精確的狀態估計，但有時由濾波所得的狀態估值與實際狀態之間的誤差遠遠超過按公式計算的變方所確定的範圍（例如三倍中誤差）。按公式計算的變方可以逐漸趨於零，而實際估計誤差可能趨於無窮大。這樣就使濾波失去了應有的作用，出現了濾波發散現象。

濾波發散的原因主要有以下幾種：(1) 由於對物理系統瞭解不精確，因而用於推導濾波公式的數學模型與實際物理系統不相吻合，或者對物理模型是瞭解的但所取的數學模型過於複雜，在簡化數學模型時，例如將非線性系統線性化，由於處理不當帶來了明顯的系統誤差；(2) 對系統雜訊和觀測雜訊的統計特性缺乏瞭解，因而雜訊模型取得不適當；(3) 計算時計算位數的限制，造成每步遞推計算總存在捨入誤差，從而使所計算的估計誤差協變方矩陣失去正定性，導致

計算發散。當採用雙精度數進行標準卡曼濾波計算時不會引起任何數值計算問題。因而採用雙精度計算時主要考慮第 (1)、(2) 種原因引起的濾波發散。針對上述討論的引起濾波發散的原因，可以克服濾波發散現象的方法請參閱 97 年度全球導航衛星系統 (GNSS) 資料聯合處理技術期末報告 (楊名、江凱偉，2009)

§ 3.2.3 參數估計

處理 GPS 資料時，除了需要考慮參數的函數模型外，還需顧及其隨機模型。在無差分數據處理中主要考慮對流層和時錶差這兩種時變參數的隨機模型。故本節面對這兩種參數的隨機模型做一些討論。處理 GPS 資料時，需要考慮各種誤差因素的影響，如對流層由於大氣層中水汽分佈隨時間的不規則變化，使得其影響具有較大的隨機性。即使利用模型改正後，還存在一部分殘差無法消除。這些殘差可認為是一系列時間相關的隨機過程的疊加可以採用一階高斯馬可夫過程、隨機遊走過程等模擬。下面對這些方法做一些討論。

連續的一階高斯馬可夫過程類似的狀態方程為：

$$\frac{d\rho(t)}{dt} = -\frac{\rho(t)}{\tau_{GM}} + w(t) \quad (3.29)$$

其中

τ_{GM} 為相關時間， $w(t)$ 為變方 σ_w 的零均值白雜訊，即

$E\{w(t)\} = 0$, $E\{w(t)w(\tau)\} = \sigma_w^2 \delta(t-\tau)$ ， $E\{\bullet\}$ 表示其期望。

(3.70) 式的離散化解為：

$$\rho(t + \Delta t) = m\rho(t) + (1 - m^2)^{1/2} w_{GM}(t) \quad (3.30)$$

其中

$$m = \exp(-\Delta t / \tau_{GM}) \quad (3.31)$$

其自相關函數為：

$$R(\tau) = \sigma_{GM}^2 \exp(-\tau / \tau_{GM}) \quad (3.32)$$

σ_{GM} 為一階高斯馬可夫過程的穩態變方，其滿足差分方程：

$$\frac{d}{dt} \sigma_{GM}^2(t) = -(2/\tau_{GM}) \sigma_{GM}^2(t) + \sigma_w^2 \quad (3.33)$$

變方 σ_{GM} 與相關時間 τ_{GM} 存在關係：

$$\sigma_{GM}^2 = \tau_{GM} \sigma_w^2 / 2 \quad (3.34)$$

當 $\tau_{GM} \rightarrow \infty$ ，一階高斯馬可夫過程即變為隨機遊走過程：

$$\frac{dp(t)}{dt} = w(t) \quad (3.35)$$

其離散化方程：

$$p(t + \Delta t) = p(t) + \sqrt{\Delta t} w_{rw}(t) \quad (3.36)$$

隨機遊走過程的變方滿足方程：

$$\frac{d}{dt} \sigma_{rw}^2(t) = \sigma_w^2 \quad (3.37)$$

顯然，隨機遊走過程的變方不是保持為一常數，其隨時間而變化。這也說明隨機遊走過程是非平穩的。在隨機模型的實際應用中，觀測值按時刻分批次處理，在每一批，過程雜訊參數作為分段參數模

型化。在一批結束後，過程雜訊時間校正將雜訊加到協變方陣中，這樣，引起隨機參數隨時間變化。第 j 批的過程雜訊時間校正將隨機參數估值和協變方陣映設到第 $j+1$ 批：

$$P_{j+1} = MP_j + W_j \quad (3.38)$$

式中

P_j 為一隨機參數向量， M 為一對角過程雜訊映射矩陣， M 的對角線項元素為：

$$M_{ij} = \exp(-\Delta t / \tau_{ij}) \quad (3.39)$$

其中 $\Delta t = t_{j+1} - t_j$ ， t_{j+1} 和 t_j 分別為第 $j+1$ 批和第 j 批的開始時間， τ_{ij} 為第 j 批和 I 個隨機參數的時間參數，及相關時間。

w_j 為一隨機誤差，其均值为零，

$$E\{w_j w_k^T\} = Q \delta_{jk} \quad (3.40)$$

協變方矩陣 Q 對應的對角項的元素為：

$$q_{ij} = \exp(1 - m_{ij}^2) \sigma_{iss}^2 \quad (3.41)$$

這裡 σ_{iss}^2 為第 I 個隨機參數的穩態 σ 。隨機參數的離散時間變化變方為：

$$\begin{aligned} \sigma_{p_{i+1}}^2 &= m_i^2 \sigma_{p_i}^2 + q_i \\ &= m_i^2 \sigma_{p_i}^2 + (1 - m_i^2) \sigma_{ss}^2 \end{aligned} \quad (3.42)$$

對於隨機遊走過程，相關時間 $\tau \rightarrow \infty$ ， $m=1$ ， M 為單位矩陣，過程沒有穩態， σ_{ss} 無界， q_i 在極限意義上的定義為：

$$q_i = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\sigma_{ss}^2}{\tau} \quad (3.43)$$

實際應用說明，對於對流層隨機遊走模型， $\sqrt{q_1/\Delta t}$ 取 $2 \sim 4 \times 10^{-7} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1/2}$ 比較合適 (Maybeck, 1979)。

在 GPS 差分相對定位中，一般都採用二次差分的方法消除時錶誤差的影響，可以不考慮時錶誤差的隨機模型。而在衛星時錶誤差估計或精密單點定位中，時錶誤差是作為未知參數處理，這時必須顧及時錶誤差的隨機模型。可以採用多項式形式描述時錶誤差變化，多項式的係數為待確定的錶偏差、錶速及錶漂移等，多項式的階數取決於時錶的穩定程度，或採用白雜訊過程模擬時錶差變化過程。考慮到時錶差變化較大，需要利用高階多項式類比其變化，比較複雜。而採用白雜訊過程描述時錶差隨機過程，比較簡單且有效，其等同於差分相對定位中利用雙差消除時錶差方法。因此，本研究採用了白雜訊模擬時錶差變化的方法，即在每個時刻，時錶差值與其他時刻值不相關，時錶差參數與其他參數一起解算。當 $\tau_{GM} = 0$ 時，一階高斯馬可夫過程即變為白雜訊過程：

$$T(t) = w(t) \quad (3.44)$$

在實際應用中，其也可採用與隨機遊走過程類似的方法處理，但對於白雜訊過程， $\tau = 0$ ， $m = 0$ ，過程雜訊參數的先驗協變方在每一批結束時完全重置，及非對角線項元素置零，對角線項元素置為先驗變方 q 。在每一批過程是獨立的，與其他批過程不相關 (Maybeck, 1979)。

§ 3.3 PPP 精密單點定位方法

傳統 GPS 單點定位是透過虛擬距離與廣播星曆的衛星軌道參數和時錶差進行改正。由於虛擬距離的觀測雜訊達數 10 公分、廣播星

曆的軌道精度為數公尺、衛星時錶差的改正精度為數 10 奈秒，加上公尺級的電離層及對流層延遲之影響，這種單點定位技術之精度只可達 10 公尺等級。

而精密單點定位是先利用全球若干 IGS 追蹤站算出精密衛星軌道參數與時錶差，再利用所求得的衛星軌道參數與衛星時錶差對單台接收儀採集的虛擬距離與相位觀測量進行無差分的定位處理。如前所述，精密單點定位是利用無差分的觀測量進行定位，故其誤差無法透過差分的方式消除，只能利用模型或和位置參數一起估計的方式消除其影響。故週波脫落之偵測與修復之問題都較差分定位模式困難，故資料之預處理是相當重要的。

在精密單點定位之數據處理中，主要考慮三類之誤差來源：

1. 和衛星有關:衛星時錶差、軌道誤差、衛星天線相位中心偏差。
2. 和訊號傳播有關:對流層延遲、電離層延遲、相對論效應與多路徑效應。
3. 和接收儀、測站有關:接收儀時錶差、接收儀天線相位中心偏差、固體潮改正、海洋負載改正與地球自轉。

§ 3.3.1 和接收儀、測站有關的誤差來源

精密單點定位過程中所考慮與接收儀及測站有關之誤差來源如下：

1. 接收儀時錶差：由於接收儀內的晶體振盪器的漂移引起的接收儀時錶與 GPS 標準時之差值，接收儀一般使用高精度的石英鐘。對於無差分精密單點定位而言，因無法利用差分方式消除接收儀時錶的影響，故計算過程中必須考慮其對定位結果的影響。在無差分的數據處理中，必須顧及接收儀時錶差對衛星坐標計算與使

用者與衛星間之幾何距離計算之影響。對於前者可先用一般之電碼虛擬距離定位求出時錶差之概略值，接下來再透過數據處理過程與其他參數一併計算，以消除其對定位精度之影響 (Shen and Gao, 2002)。

2. 接收儀天線相位中心之偏差:在 GPS 測量中，觀測值皆是接收儀天線的相位中心為準的，理論上天線的相位中心與其幾何中心應保持一致。而實際上，天線的相位中心隨著衛星訊號輸入的強度與方向的不同而有變化，及觀測時相位中心的瞬時位置與理論上的相位中心有所不同，二者之差值可達數公釐至公分。在無差分精密單點定位之過程中，可利用事先率定的模型來消除其影響，詳細內容請見 (Shen and Gao, 2002)。
3. 固體潮改正：攝動天體(月球及太陽)對彈性地球的引力作用，使地球表面產生週期的漲落，稱為固體潮現象。它在地球地心與攝動天體之連線方向上拉長，與連線垂直方向趨於扁平。固體潮對測站之影響包含與緯度有關的長期偏移與主要由日週期和半日週期組成之週期項。若靜態觀測 24 小時，週期項大部分影響可以平滑消除。但長期向無法透過此方式消除，即使透過長時間觀測，其殘餘影響在徑向達 12 公分，在水準方向可達 5 公分。對於GPS短於 100 公里之基線而言，二測站之固體潮可視為一致；但對長基線而言，就必須考慮適合的改正模式。對無差分的精密單點定位而言，由於它是直接求解測站坐標，無法透過差分方式消除，故必須透過使用改正模式以消除固體潮之影響

一般來說，太陽-月球-地球系統可以被分成兩個雙體系統，來探討太陽相對於地球與月亮相對於地球的影響；以月亮相對於地球的影響舉例，圖 3.1 為地球與月球的示意圖，假設有一質量點 p 在地球上，則潮汐位能可以被表示如下：

$$W_p = \mu_m \left[\frac{1}{r'} - \frac{1}{r} - \frac{\rho}{r^2} \cos z \right] \quad (3.45)$$

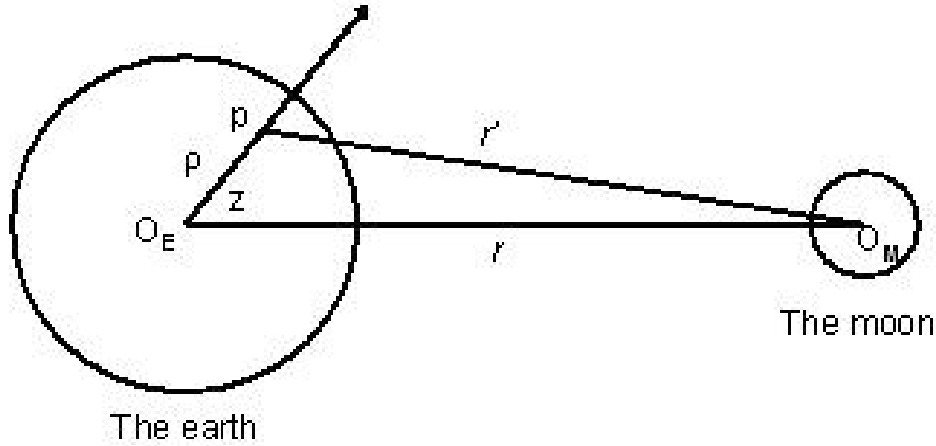


圖3.1 地球與月球的示意圖(Xu, 2003)

r 是地球與月球間的距離， ρ 是地球中心與質量點 p 的距離， μ_m 為月球的重力常數， z 為月球的方位角， r' 為質量點 p 與月球間的距離；可以被 Legendre 多項式表示成：

$$W_p = \mu_m \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\rho^n}{r^{n+1}} P_n(\cos z) \quad (3.46)$$

$P_n(\cos z)$ 是一般 n 階的 Legendre 多項式。已知球面三角方程式如下：

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cosh \quad (3.47)$$

把式 (3.47) 代入至式 (3.46)，則潮汐位能的 Laplace 方程式可以被表示成：

$$W_p = \mu_m \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\rho^n}{r^{n+1}} \left[P_n(\sin \varphi) P_n(\sin \delta) + 2 \sum_{k=1}^n \frac{(n-k)!}{(n+k)!} P_{nk}(\sin \varphi) P_{nk}(\sin \delta) \cos kh \right] \quad (3.48)$$

φ 為質量點 p 的緯度， δ 和 h 為月球的 declination angle 和 local hour angle， P_{nk} 式連結 degree n 和 order k 的 Legendre 多項式，Laplace 方程式可顯示潮汐位能幾何與週期的特性，細節請參考 (Parkinson and Spilker, 1996)。

4. 海洋負載改正：海洋負載產生的原因為潮汐的週期性漲落，海洋負載與固體潮的影響類似，主要由日週期和半日週期組成，但是它的影響比固體潮小一級。對單一時刻的觀測量而言，其影響為 5 公分。對 24 小時的觀測而言，其影響為公釐級。與固體潮一樣，對無差分的精密單點定位而言，由於它是直接求解測站坐標，無法透過差分方式消除，故必須透過使用改正模式以消海洋負載之影響，其改正公式列舉如下：

$$\Delta S_r = h' \frac{W_p}{g} = \sum_{n=0}^{\infty} h'_n \frac{W_p(n)}{g} \quad (3.49)$$

$$\Delta S_\varphi = l' \frac{\partial W_p}{g \partial \varphi} = \sum_{n=0}^{\infty} l'_n \frac{\partial W_p(n)}{g \partial \varphi} \quad (3.50)$$

$$\Delta S_\lambda = h' \frac{\partial W_p}{g \cos \varphi \partial \lambda} = \sum_{n=0}^{\infty} l'_n \frac{\partial W_p(n)}{g \cos \varphi \partial \lambda} \quad (3.51)$$

ΔS_r 、 ΔS_φ 和 ΔS_λ 為海洋負載效應的輻射、向北、向東的三個方向， h' 和 l' 為勒夫數 (Love numbers)， $W_p(n)$ 為 n 階的負荷位能； $g \approx \mu/R_E^2$ ， μ 是地球的重力常數， R_E 為地球半徑。負載勒夫數可以從理論模型得到，細節請參考 (Parkinson and Spilker, 1996)。

5. 地球自轉：由於地固坐標系統為非慣性坐標系，它隨地球自轉而變化。故訊號發射與接收時刻的地固坐標系統是不同的，故計算衛星到接收儀的幾何距離必須考慮地球自轉的效應。無差分的精密

單點定位而言，由於它是直接求解測站坐標，故必須透過使用改正模式。GPS 提供的星曆是 WGS-84 坐標系坐標，WGS-84 坐標系地固坐標系，而地球在不停自轉；GPS 信號自衛星到地面測站，需要一段傳播時間 τ ，如果以測站為標準，衛星坐標發生了 $(\Delta X_S, \Delta Y_S, \Delta Z_S)$ 的變化量，這必然引起衛星到測站的幾何距離 ρ 發生變化，假設變化量為 $\Delta\rho$ ，由微分公式可算出：

$$\Delta\rho = \frac{1}{\rho}[(X_S - X_R)\Delta X_S + (Y_S - Y_R)\Delta Y_S + (Z_S - Z_R)\Delta Z_S] \quad (3.52)$$

式中 (X_S, Y_S, Z_S) 為衛星的地心坐標， (X_R, Y_R, Z_R) 為地面測站的地心坐標。則 $(\Delta X_S, \Delta Y_S, \Delta Z_S)$ 為衛星坐標變化量，可依下式計算：

$$\begin{bmatrix} \Delta X_S \\ \Delta Y_S \\ \Delta Z_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega\tau & 0 \\ -\omega\tau & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

式中 ω 為地球自轉角速度，即得到地球自轉改正公式：

$$\Delta\rho_\omega = \frac{\omega}{C}[(X_S - X_R)\Delta Y_S - (Y_S - Y_R)\Delta X_S] \quad (3.54)$$

相關細節請參考 (Parkinson and Spilker, 1996)。

§ 3.3.2 和衛星有關的誤差來源

精密單點定位過程中所考慮與衛星有關之誤差來源如下：

1. 衛星時錶差：衛星時錶頻率漂移所引起的衛星時錶時間與 GPS 標準時間的差值稱為衛星時錶差。GPS 系統透過地面監測站對衛星監測，確定衛星時錶差，並用二項式模擬衛星時錶的變化，但

此法只能保證衛星時錶與 GPS 標準時同步時間在 20 奈秒之內。在無差分的數據處理中，必須顧及衛星時錶差對衛星坐標計算與使用者與衛星間之幾何距離計算之影響。由於不同衛星的時錶差不同，在無差分精密定位求解過程中無法如接收儀時錶差般當作未知數來處理，而必須事先估計其大小，然後代入觀測方程式以消除其影響。精密單點定位要求衛星時錶的改正精度要達奈秒級。故在精密單點定位中，確定衛星時錶差是一件相當重要的工作。目前 IGS 與其分析中心為了滿足精密單點定位及精密時間傳遞等需要，也提供 5 分鐘或 30 秒的後處理精密衛星時錶差，相關細節可參考 IGS 網站。

2. 軌道誤差：衛星星曆是 GPS 定位中的重要起算數據。衛星軌道誤差是指衛星星曆鐘表示的衛星軌道與真正軌道之不符值。軌道誤差取決於軌道計算之數學模型、所用的軟體、所採用追蹤網的規模、追蹤站的分佈與追蹤站數據觀測時間的長短。目前廣播星曆的精度大約 5~10 公尺，事後精密星曆的精度大約為 3~5 公分的精度。與衛星時錶差一樣，精密單點定位計算中，衛星軌道誤差會影響測站與衛星間之幾何距離，從而產生定位誤差。因此在精密單點定位中必須使用精密星曆，而無法使用廣播星曆。
3. 衛星天線相位中心改正：衛星軌道模型是針對於衛星質心而言的，IGS 提供的精密星曆與精密衛星時錶差是針對於衛星質心的，而廣播星曆和觀測量是針對於衛星天線相位中心的，精密單點定位需要預先知道衛星天線相位中心改正和改正向量在衛星為繞地球旋轉空間中的旋轉量。表 3.2 為衛星天線在不同型衛星中的天線相位偏差。相關細節請參考 (Xu, 2003)。

表3.2 GPS 衛星天線相位中心偏差 (m) (Xu, 2003)

Satellite Types	dX	dY	dZ
Block I	0.2100	0.0	0.8540
Block II/IIA	0.2794	0.0	1.0259
Block IIR	0.0000	0.0	1.2053

§ 3.3.3 和訊號傳播有關的誤差來源

1. 對流層延遲：如前所述，對流層延遲主要有兩個延遲誤差影響；這些誤差分別為乾燥大氣層延遲與水汽影響。前者對於對流層誤差影響非常大，在合理預估範圍內其值約為 2.3 公尺，其並與當地氣溫與大氣壓力之變化呈現緩慢且可預測的改變；後者對於整體而言影響較小，其值在天頂方向約為 1 至 60 公分。對流層誤差對於差分衛星定位有著重大的影響，許多研究將此影響視為重要發展對象。

對流層誤差模型主要包含兩部分，相關細節請參考第二章。在精密單點定位的解算過程中，對流層延遲的影響首先可透過模型改正，乾分量的部分之精度可達公分級，濕分量部分的殘餘影響較大。故必須將對流層延遲的影響當作參數估計。一般可透過一階高斯馬可夫模型與隨機遊走模型進行對流層殘餘影響之估計。這亦是本計畫發展估算絕對對流層濕延遲之核心。

2. 電離層延遲：從地面 70 公里向上直到大氣層頂部為電離層分佈範圍，在這一層中，由於太陽的作用，使大氣發生電離，因此導致電磁波在傳遞過程發生延遲。由於一階項的電離層延遲效影與電磁波頻率平方成反比，故可透過 GPS 雙頻觀測量以線性組合之方式消除電離層效應之影響。在前述 3 種常用精密單點定位的數學模型中皆利用此特性來消除電離層效應之影響，剩餘高階的影響約為 2~4 公分。

3. 多路徑效應：多路徑效應對於衛星定位為一主要誤差。衛星發射訊號，有的被天線直接接收，有的因地面物反射而被天線間接收，因而產生多路徑效應。由於多路徑效應不會因測站間的差分而消除，因此相對於其他衛星誤差來源較不易被預估。目前可以透過硬體與軟體方式減低多路徑效應之影響。精密單點定位的解算過程中，會將之與雜訊效應合併估算。

4. 相對論效應：相對論效應是由於衛星時錶和接收儀時錶所處的狀態(運動速度與重力位元)不同而引起的衛星時錶與接收儀時錶產生相對時錶差所引起的。GPS 時錶會走得比地面時錶快，每秒約差 0.45 毫秒，消除的方法使將GPS 鐘的標準頻率減少約 0.0045 MHz。但由於地球的運動和衛星軌道的變化，以及地球重力場的變化，相對論的影響並非常數，經上述改正仍有殘差，故在精密單點定位中必須引用相對論效應改正模型，由於 GPS 衛星軌道是一個橢圓軌道，而橢圓軌道各點的出的運行速度是不相同的，相對論效應的頻率補償就不是一個常數，頻率常數補償所導致的補償殘差稱為相對論效應誤差。它所引入的 GPS 信號延遲為：

$$\Delta t = -\frac{2e\sqrt{a\mu}}{C_0^2} \sin E \quad (3.55)$$

式中 e 為衛星橢圓軌道的偏心率； E 為 GPS 衛星的偏近地點角； a 為 GPS 衛星橢圓軌道的長半徑，現將 a 、 μ 和 C_0 代入上式可得：

$$\Delta t(ns) = -2289.7 * e * \sin E \quad (3.56)$$

當 $e=0.01$ ， $E=90^\circ$ 時，相對應效應誤差導致的時間延遲達到最大值，即為 22.897 ns，相當於 6.864 m 的誤差。相關細節請參考 (Xu, 2003)。

§ 3.3.4 精密單點定位演算法之架構

對精密單點定位之計算而言，目前 IGS 最終 (final) 及快速 (rapid) 之產品皆符合精度之需求，唯這些產品分別需要 13 天與 17 小時之處理流程。對於近即時的應用而言，IGS 超快速 (ultra-rapid) 產品中之平差後 (adjusted) 的產品符合精密單點定位計算之要求，這項產品需要 3 個小時之處理流程。最後一個產品為預估值，目前精度上不符合公分級之精密單點定位計算之要求，但其優點為即時可得。除了 IGS 之外，加拿大自然資源研究中心 (NRCan) 亦致力發展即時或近即時之產品。目前預測之結果仍不符精密單點定位之需求。

有鑑於觀測技術與預測演算法之進步，未來數年內 IGS 超快速產品不管平差後與預測之產品精度皆可符合目前後處理產品之精度。故未來若搭配無線上網之技術至 IGS 自動下載相關之產品，則所謂的公分級的單點即時動態定位 (Point-RTK) 是可預見的。這種精度也許尚未符合高等級控制測量之規範，但它可以滿足 70% ~ 80% 的測量應用。尤其是空載製圖系統及路基的移動製圖系統等國外空間資訊領域正在測試的新設備與演算法，精密動態單點定位之技術必然可以簡化人力與硬體之成本，且可以提供符合精度需求之點位坐標或是動態軌跡，表3.3顯示目前精密單點定位技術與 IGS 產品搭配下所能獲得之精度，圖 3.2 所示為精密單點定位演算法之資料處理流程。

表 3.3 IGS 產品之精度(摘自 IGS 網站)

IGS Product Table [GPS Broadcast values included for comparison] -- updated for 2009!					
GPS Satellite Ephemerides/ Satellite & Station Clocks		Accuracy	Latency	Updates	Sample Interval
Broadcast	orbits	~100 cm	real time	--	daily
	Sat. clocks	~5 ns RMS ~2.5 ns SDev			
Ultra-Rapid (predicted half)	orbits	~5 cm	real time	at 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Sat. clocks	~3 ns RMS ~1.5 ns SDev			
Ultra-Rapid (observed half)	orbits	~3 cm	3 - 9 hours	at 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Sat. clocks	~150 ps RMS ~50 ps SDev			
Rapid	orbits	~2.5 cm	17 - 41 hours	at 17 UTC daily	15 min
	Sat. & Stn. clocks	~75 ps RMS ~25 ps SDev			5 min
Final	orbits	~2.5 cm	12 - 18 days	every Thursday	15 min
	Sat. & Stn. clocks	~75 ps RMS ~20 ps SDev			Sat.: 30s Stn.: 5 min

精密單點定位有如下之關鍵之處：

1. 衛星軌道精度需達公分級，故須使用 IGS 提供精度達 3 ~ 5 公分之精密星曆。
2. 衛星時錶差的改正需達奈秒級，除 JPL 提供 30 秒間隔之時錶差外，IGS 及其他分析中心均提供五分鐘間隔的時時錶差。
3. 解算過程須考慮固體潮、海洋負載、衛星天線相位偏差等誤差的改正模型。
4. 在定位過程中採用無差分觀測量，同時虛擬距離觀測量在初始階段作為輔助觀測值參加解算。
5. 精密單點定位無法固定整數週波未定值，計算過程中需要一段收斂的過程。

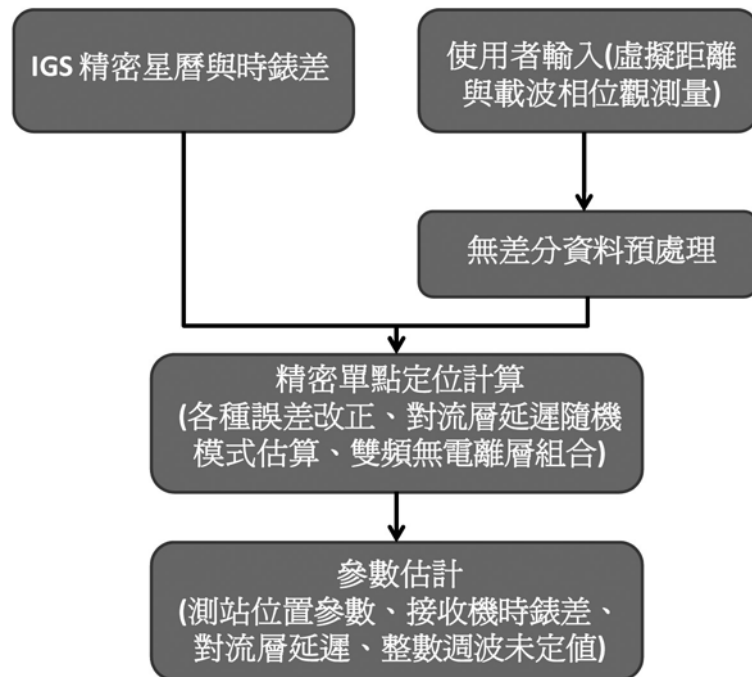


圖3.2 精密單點定位演算法之資料處理流程

§ 3.4 絕對天頂對流層延遲估計

Bevis *et al.* (1992) 提出 GPS 氣象學後，成為大地測量學界與氣象學界研究的重點之一。美國在 1993 年進行第一次的 GPS 絕對溼對流層延遲量與水汽輻射計計算結果比較，結果可達 10-20 mm 的精度，所衍生得到可降水量 (PWV) 可達到 1-2 mm 等級的精度。天頂對流層延遲通常可分為乾延遲和溼延遲，約 90% 的天頂對流層延遲為乾分量，利用適當的模型可以達到極高的乾分量精度，約僅有 1% 的誤差，但溼延遲則不易精確模式化 (Shrestha, 2003)。

透過差分 GPS (Differential GPS, DGPS) 演算法得到的對流層總延遲量，精度可以達到 1-2 公分等級 (Bevis *et al.*, 1992); Liou (2000) 進一步透過 GPS 所到的溼延遲量與水汽輻射計和無線電高空探測儀精度接近，差異約只在 0.4 公分以內。而 PPP 精密單點定位所測試的結果亦經文獻證實可得到近似的精度 (Tao, 2007)，加上利用

PPP 精密單點定位所得到的天頂對流層延遲量是絕對的延遲量，因此在 GPS 氣象領域裡是一個有潛力的應用技術，可輔助地面氣象觀測密度不足之問題。由於台灣本島的 e-GPS 站分佈情況已經可以提供一個高密度及高時間解析力的觀測網型，故本計畫使用自行開發的 PPP 精密單點定位軟體分析處理 e-GPS 站的觀測資料，計算絕對天頂對流層。而總延遲量減去由氣象參數推算所得之乾延遲量即可得到濕延遲量。

在觀測資料輸入方面，必須輸入觀測日期以供判斷是否與精密星曆時間是否相同，並輸入點位的初始坐標以供軟體內的卡曼濾波器收斂，並經過往返估算得到穩定解；亦可設定氣象資料，用以估算絕對天頂方向對流層延遲量；其次必須加入精密產品，例如：精密軌道誤差改正和精密衛星時錶改正，以消除軌道誤差和衛星時錶誤差，而不使用差分的方式移除其影響，這也是精密單點定位的優勢所在。由於此軟體是依據 GPS 時間來做時間序列的運算，UTC 時間是方便使用者可以得到當地的時間，故目標輸出的資訊將包含有 GPS 時間、UTC 時間、測站坐標、絕對天頂對流層延遲量等。

§ 3.5 精密單點定位絕對天頂對流層延遲估計軟體介面

本節著重於軟體開發之功能簡介及操作步驟流程說明，以下就各分項工作項目及介面進行介紹，此軟體並可獨立在 Windows XP 作業系統執行。如圖 3.3 所示，當開啟主程式之後，即進入主視窗系統畫面，內容包含選單系統、設定參數、處理模式、視窗縮放及求助等下拉式選單可供選擇。軟體主視窗系統畫面包含下列項目：

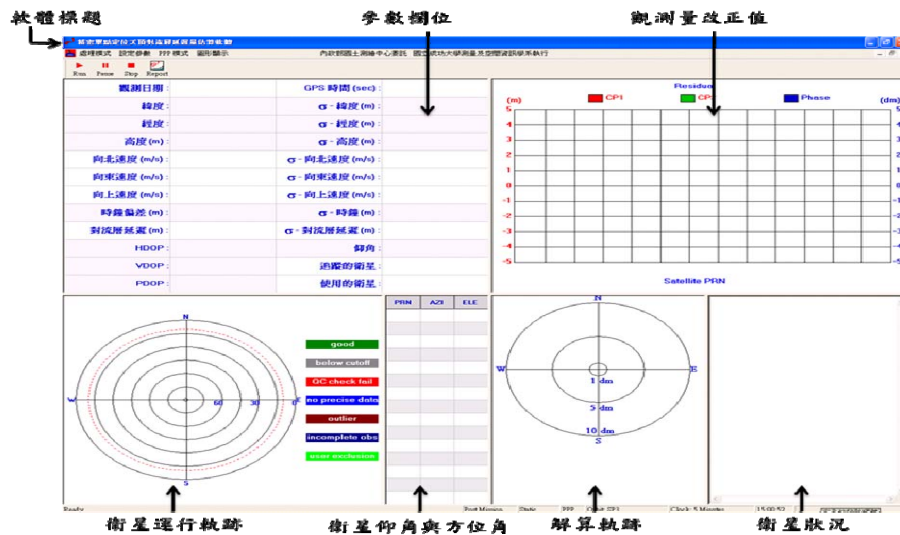


圖 3.3 精密單點定位天頂對流層延遲量軟體主視窗系統畫面

1. 軟體標題
2. 衛星在天空運行軌跡
3. 個別參數值視窗
4. 觀測改正量視窗
5. 解算軌跡
6. 衛星狀況視窗
7. 衛星仰角與方位角

§ 3.5.1 工具列說明與圖示介紹

如圖 3.4 所示，工具列項目包含有處理模式、設定參數、PPP 模式與圖形顯示，其圖示內容包執行、暫停、停止與輸出。以下逐一說明其用途：

1. 處理模式：選擇處理方式進行解算，由於本研究目前著重於後處理計算，因此項目只有一個選項可供選擇。
2. 設定參數：設定解算參數，包含基本參數設定、天線設定、坐標設定、氣象參數、衛星選擇等參數可供調整，將稍後詳細說明。

3. PPP 模式：選擇精密單點定位模式，本研究著重精密單點定位後處理模式，因此此部分只有一個選項可供選擇。
4. 圖形展示：藉由軟體所算得的解果，呈現位置誤差，對流層延遲量與衛星數目等參數。
5. 執行：軟體解算的執行鍵，當參數設定完成後，按下此鍵即可進行運算。
6. 暫停：軟體解算中，如欲暫停，可按此鍵。
7. 停止：軟體解算中，欲中途離開停止解算，可按此鍵。
8. 輸出：選擇輸出資訊，可選擇欲輸出的資訊，例如：位置坐標、時間等。

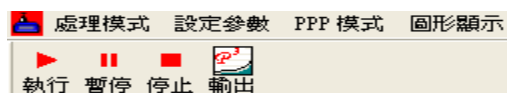


圖 3.4 精密單點定位天頂對流層延遲量軟體選單按鈕介紹

§ 3.5.2 觀測改正量圖示說明介紹

系統將已接收選取的衛星觀測量(選擇狀況良好的衛星)執行最小二乘平差法 (least square adjustment) 計算。解算範例如圖 3.5 所示，橫軸為衛星 PRN，縱軸為電碼與相位計算的改正量結果，藍色為載波相位資料，紅色為電碼資料。透過此關係圖，即可以瞭解衛星在某時刻的狀態情形，對定位結果是否有顯著影響。

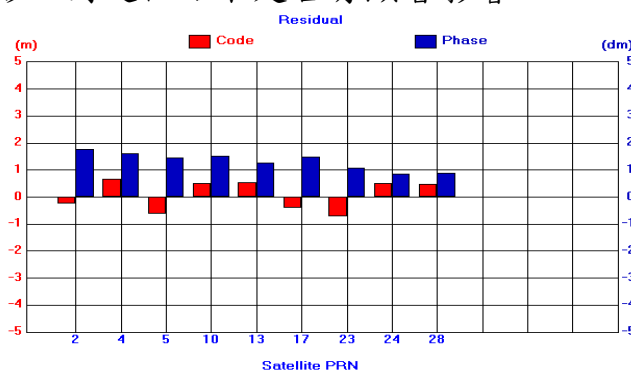


圖 3.5 衛星觀測量改正數介紹

§ 3.5.3 衛星運行軌跡圖示介紹

當資料進行解算時，可以透過圖 3.6，觀察衛星在天空運行中的軌跡，圖示上面的數字為 PRN 碼，軌跡中心為機收儀所給定的初始坐標，可由參數設定-->坐標設定所給定；紅色虛線為所設定的衛星仰角，此圖示設定為 10 度。右側圖示為衛星運行狀況，可分成七大類，可由表 3.4 得知各種顏色所代表的意義。

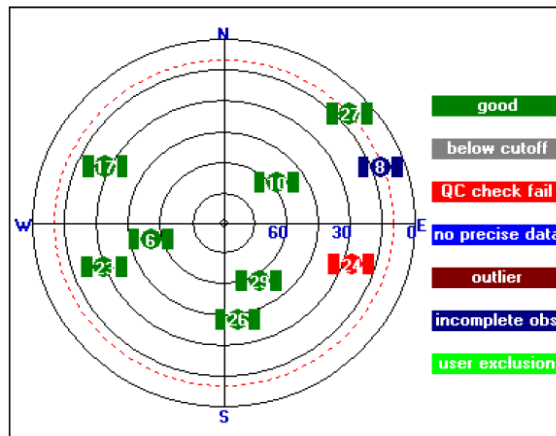


圖 3.6 衛星軌跡運行圖介紹

表 3.4 衛星狀況圖示說明

Status	意義說明
Good	衛星狀況良好，可被納入計算。
Below cutoff	衛星位在給定的衛星仰角之下。
QC check fail	衛星資料無法通過改正數檢定。
No precise data	精密資料在特定時間無法被取得。
Outlier	目前衛星觀測量不良。
Incomplete obs	一顆或多顆衛星在目前情況資料不足。
User exclusion	使用者所選定要排除的衛星。

§ 3.5.4 衛星仰角與方位角欄位說明

圖 3.7 為顯示衛星在天空運行中的仰角與方位角之欄位，PRN 為衛星編號碼、AZI 為衛星的方位角、ELE 為衛星的仰角。當資料在進

行解算時，衛星運行的路徑隨時在變動，仰角與方位角亦隨時變動，因此可藉由此欄位觀察衛星的方位角與仰角。

PRN	AZI	ELE
6	256.0	55.2
27	48.1	10.3
29	149.4	56.7
8	69.8	11.2
24	108.7	26.4
17	296.4	28.5
26	171.8	42.3
23	248.7	30.1
10	52.5	58.3

圖 3.7 資料解算時的衛星仰角與方位角

§ 3.5.5 資料解算軌跡

圖 3.8 所表達的是靜態軌跡圖，精密單點定位處理器會將每筆資料進行解算，並以紅點顯示每筆資料的結果。在靜態模式，紅點為軟體計算出來得到的坐標解，坐標中心為使用者所給定的初始坐標，如果紅點未出現在中心的位置，可能是初始坐標給定較不精確，但是亦不會影響到解算的工作；如果初始坐標與真實坐標相差太遠，則軟體內的卡曼濾波器可能將不會收斂，因此會造成無解的情形發生，一般而言，使用處理資料內的初始坐標設定即可。圖示中亦可顯示全部資料落離初始坐標範圍內的百分比，以圖 3.8 為例，有 69% 在 1dm 內，98% 在 5dm 內，100% 在 10dm 內。

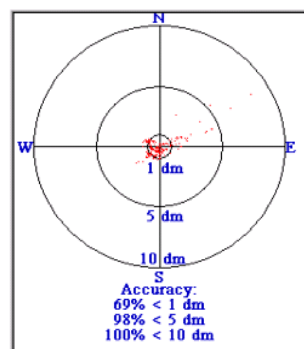


圖 3.8 資料解算時的靜態軌跡

§ 3.5.6 衛星選取視窗介紹

衛星選取結果界面的目的是顯示在進行解算時候，在每一筆觀測資料中，所接受的衛星編號、拒絕的衛星編號或顯示衛星的狀態，可能情形如表 3.4 所列，皆顯示於此視窗內，如圖 3.9 所示。

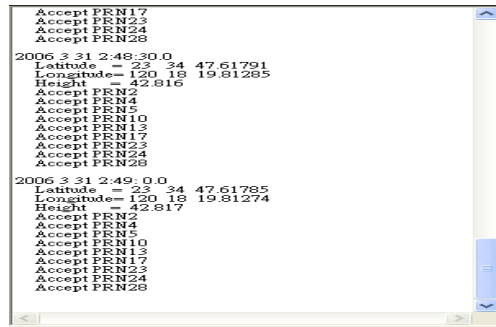


圖 3.9 衛星選取的結果

§ 3.5.7 參數值視窗

如圖 3.10 所示，參數值視窗所展現的是資料解算過程中，每一筆的資料各別參數值以及單位皆會顯示出來，而參數的意義列於表 3.5 解釋。

Date :		GPS Time (sec) :	
Latitude :		σ - Latitude (m) :	
Longitude :		σ - Longitude (m) :	
Height (m) :		σ - Height (m) :	
Vn (m/s) :		σ - Vn (m/s) :	
Ve (m/s) :		σ - Ve (m/s) :	
Vu (m/s) :		σ - Vu (m/s) :	
Clock Offset (m) :		σ - Clock (m) :	
Trop Delay (m) :		σ - Trop Delay (m) :	
HDOP :		Elevation cutoff :	
VDOP :		Satellites tracked :	
PDOP :		Satellites used :	

圖 3.10 精密單點定位處理器參數解算成果介面

表 3.5 參數值意義說明

參數值	意義描述
觀測日期	觀測資料的日期。
緯度	GPS 接收儀的緯度位置。
經度	GPS 接收儀的經度位置。
高度(m)	GPS 接收儀的高度位置。
向東速度(m/s)	GPS 接收儀在向東的速度。
向北速度(m/s)	GPS 接收儀在向北的速度。
向上速度(m/s)	GPS 接收儀在向上的速度。
時鐘偏差(m)	接收儀時鐘偏差。
對流層延遲(m)	估算對流層總延遲量。
HDOP	衛星在平面位置的幾何強度。
VDOP	衛星在垂直位置的幾何強度。
PDOP	衛星在三維空間的幾何強度。
GPS 時間(s)	計算中的 GPS 時間。
σ -緯度(m)	緯度的標準差。
σ -經度(m)	經度的標準差。
σ -高度(m)	高度的標準差。
σ -向東速度(m/s)	向東速度的標準差。
σ -向北速度(m/s)	向北速度的標準差。
σ -向上速度(m/s)	向上速度的標準差。
σ -時鐘	接收儀時鐘的標準差。
σ -對流層延遲	對流層延遲量的標準差。
仰角	衛星設定仰角。
追蹤的衛星	在接收儀上方所觀測到的衛星數目。
使用的衛星	被用來求解計算所使用的衛星數目。

§ 3.6 參數設定

設定參數項目主要有參數設定、天線設定、坐標設定、氣象參數、衛星選擇五大部分，由於設定參數為解算過程中最關鍵步驟，因此必須謹慎處理，以免造成往後成果的疏失及不便。

§ 3.6.1 常數設定

首先要介紹參數設定，如圖 3.11 所示，此設定項目包含觀測間隔以及 GPS UTC 時間偏差，亦可以設定衛星仰角，去除不良的衛星訊號，以免有嚴重的多路徑效應發生；可以設定觀測量標準差，藉由標準差的門檻，達到資料品質一致的標準；軟體解算時的資料檔案必須被儲存，以便後續再需要此筆資料時，即可以立即讀入，選取所需的資訊，不必再消耗時間重新執行一次。

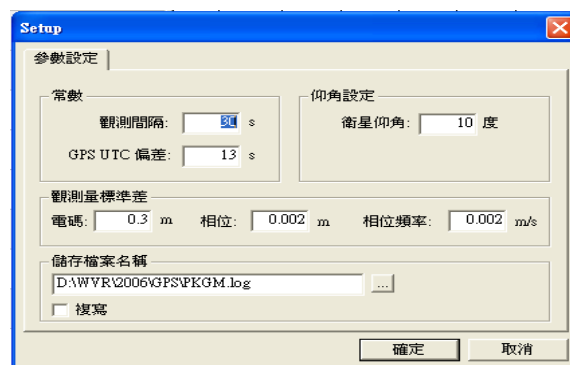


圖 3.11 參數設定欄位

§ 3.6.2 天線設定

如圖 3.12 所示，天線設定主要是給予天線相位中心垂直偏差的量，如果已知其偏差量，可以輸入至系統，以供解算結果更加精準；亦可以使用 IGS 所提供的 PCV 檔案，PCV 檔案包含廠牌與型號，只要選擇機收儀的廠牌與型號及可以自動改正其偏差量；否則，解算結果可能與預期的結果會有些許誤差。

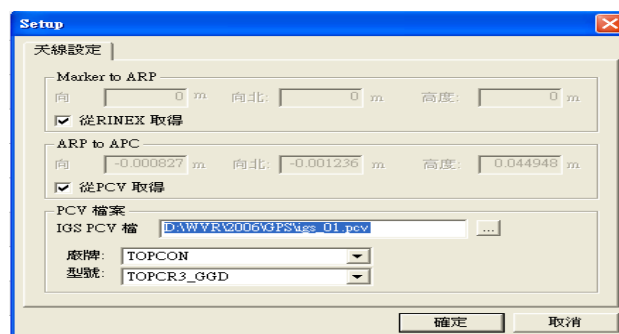


圖 3.12 天線設定介面

§ 3.6.3 初始坐標設定

如圖 3.13 所示，坐標設定方面，必須先設定坐標系統與坐標基準，避免後續處理會產生困擾；由於此軟體是透過卡曼濾波器預估收斂，因此必須給定初始坐標以供收斂，因此，如果初始坐標與真實坐標範圍相差太遠，可能造成無法收斂完成，會導致無解的狀況發生；因此，可以透過觀測檔 (.O 檔) 來給予初始坐標，避免發生不必要的錯誤。



圖 3.13 初始坐標設定介面

§ 3.6.4 氣象參數設定

由於要估算對流層延遲量，而對流層延遲量與氣象參數息息相關，因此建立氣象參數設定欄位，以供後續發展所使用，在此可輸入壓力、溫度與濕度。

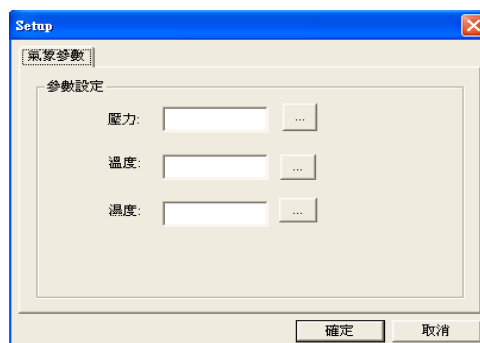


圖 3.14 氣象參數設定介面

§ 3.6.5 衛星選擇設定

如圖 3.15 所示，如果已知衛星在當天執行任務時，部分衛星狀況不良或是衛星本身參數不良，可以透過衛星選擇部份對衛星做刪除的動作，即在解算的過程中，放棄使用狀況不良的衛星，以提升解算的可靠度與精度。

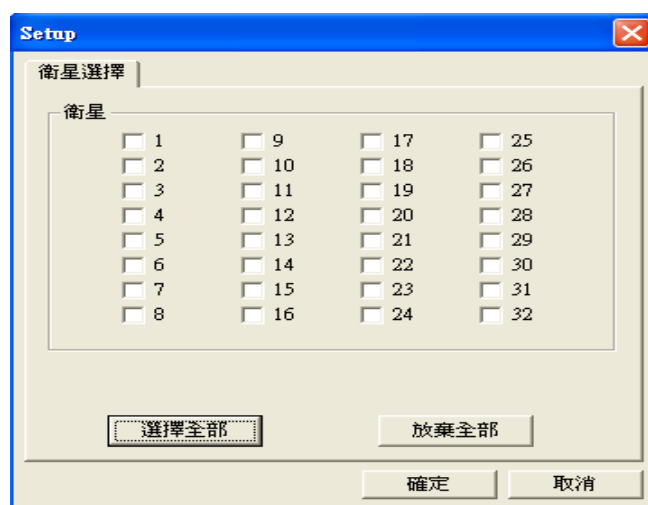


圖 3.15 衛星選擇設定介面

§ 3.6.6 PPP 模式設定

如圖 3.16 所示，PPP 設定方面主要是輸入觀測檔案、精密星曆和精密時鐘，並且選擇適合的模型與模式，吾人選擇精密軌道為 SP3，時鐘選擇可以選 SP3 內的時鐘設定，亦可選擇 5 minutes 的檔案 (CLK)，觀測檔案為 .O 檔。模型部份有傳統模型與 UofC 模型，UofC 模型是由加拿大卡加利大學所創立的，UofC 模型可以改善傳統模型的部分缺點，例如:收斂時間過長、雜訊放大等。此設定欄位亦可選擇靜態模式或動態模式，依照資料本身的特性選取適當的模式即可。

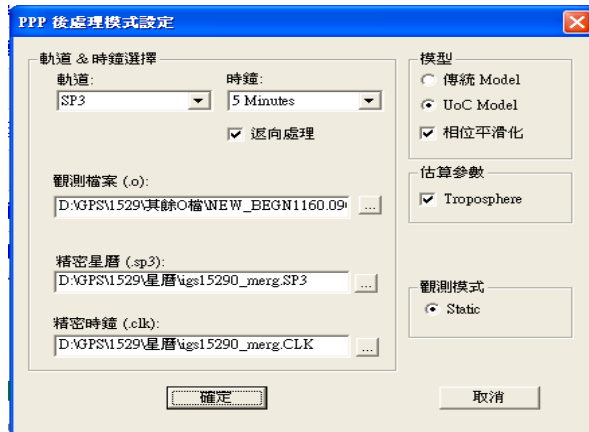


圖 3.16 PPP 模式設定介面

當所有一切設定完成後，即可按下執行鍵，本軟體就可以算出定位解、天頂對流層總延遲量與天頂對流層溼延遲量。

§ 3.6.7 輸出設定

計算完成後，可以輸出欲得到的資訊，目前有五項輸出資料可供選擇: GPS Time、XYZ 坐標、UTC Time、天頂對流層總延遲量與天頂對流層溼延遲量，如圖 3.17 所示。

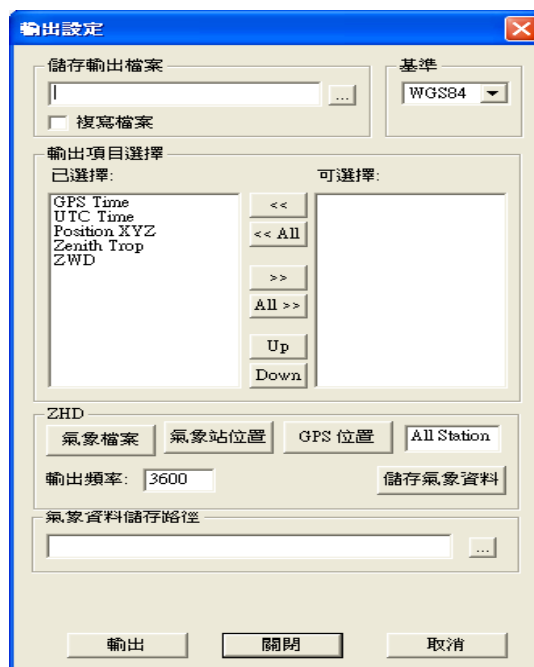


圖 3.17 PPP 資料輸出選擇介面

本軟體所使用的氣象檔案格式如圖 3.18，共分為 10 各欄位，其參數如表 3.6 所示：



圖 3.18 氣象資料格式範例

表 3.6 氣象資料格式說明

第一列	氣象站名稱
第二列	日期-年
第三列	日期-月
第四列	日期-日
第五列	日期-時
第六列	日期-分
第七列	日期-秒
第八列	大氣壓力值
第九列	溫度
第十列	溼度

本軟體最終輸出結果如圖 3.19 所示，其欄位有 GPS Time、UTC Time、XYZ、ZTD (總延遲量)、ZWD (溼延遲量)。

P3 REPORT FILE

Source LOG file: FUSI.log

System Mode: Post Mission
 Station Mode: Static
 Processing Mode: PPP
 Satellite Orbit: SP3
 Satellite Clock: 5 Minutes
 Backward Processing: No

GPS Time	UTC Time	X(m)	Y(m)	Z(m)	ZTD(m)	ZWD(m)
990.0	2009-11-01 00:16:30.0	-3014038.538	4946939.135	2661323.030	2.346	0.015
1020.0	2009-11-01 00:17:00.0	-3014042.215	4946942.184	2661324.954	2.344	0.013
1050.0	2009-11-01 00:17:30.0	-3014041.869	4946941.277	2661323.308	2.345	0.014
1080.0	2009-11-01 00:18:00.0	-3014041.662	4946940.396	2661322.377	2.345	0.014
1110.0	2009-11-01 00:18:30.0	-3014041.123	4946938.061	2661321.677	2.347	0.016
1140.0	2009-11-01 00:19:00.0	-3014041.249	4946938.559	2661321.922	2.347	0.016
1170.0	2009-11-01 00:19:30.0	-3014040.874	4946940.239	2661322.144	2.346	0.015
1200.0	2009-11-01 00:20:00.0	-3014040.797	4946940.859	2661322.157	2.345	0.014
1230.0	2009-11-01 00:20:30.0	-3014040.897	4946941.285	2661322.200	2.344	0.013
1260.0	2009-11-01 00:21:00.0	-3014041.122	4946941.358	2661322.252	2.343	0.012
1320.0	2009-11-01 00:22:00.0	-3014041.182	4946941.353	2661322.267	2.343	0.012
1350.0	2009-11-01 00:22:30.0	-3014041.237	4946941.348	2661322.307	2.343	0.012
1380.0	2009-11-01 00:23:00.0	-3014041.300	4946941.387	2661322.387	2.343	0.012
1410.0	2009-11-01 00:23:30.0	-3014041.376	4946941.517	2661322.475	2.343	0.012
1440.0	2009-11-01 00:24:00.0	-3014041.588	4946941.661	2661322.636	2.343	0.012

圖 3.19 輸出成果的展示

§ 3.7 動態精密單點定位精度及效益分析

本計畫進行二項實驗分析：第一項為靜態精密單點定位靜態測試；第二項為精密單點定位方法與差分相對定位方法進行動態觀測量成果之比較。本研究外業施測地點為台南市安平潮位站，利用與潮位站相距約 2 至 3 公尺之 GPS 浮標當作定位測試點(移動站)，進行不同方法之動態定位比較。本研究選定 GPS 參考主站為台南地政事務所樓頂之二等衛星控制點 (S810)，如圖 3.18 所示，距離 GPS 移動站約為 1.5 公里，符合差分動態定位之距離限制。而外業施測所使用之 GPS 天線盤、接收儀型號皆與 GPS 移動站相同，接收頻率皆設定為 1Hz。

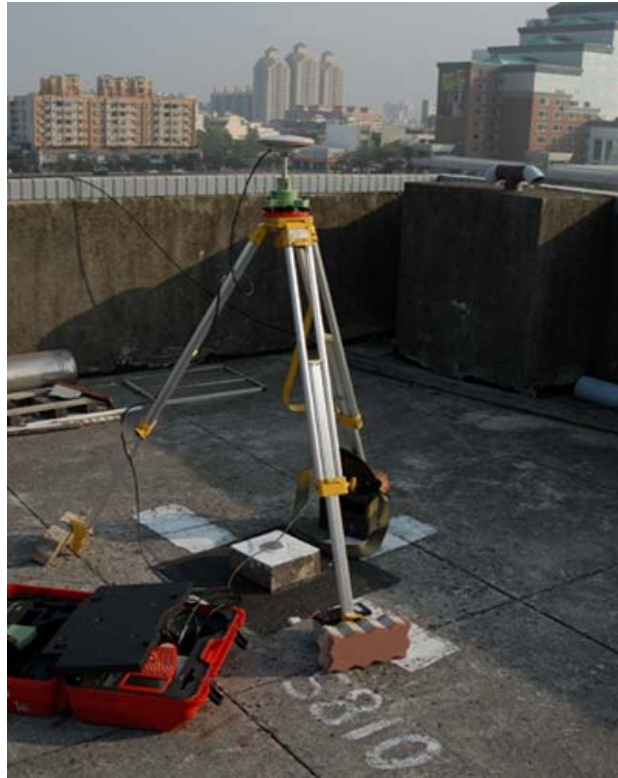


圖 3.20 本研究架設參考主站之二等衛星控制點(S810)

本實驗共進行了 6 次外業實驗，實驗日期分別為 2009 年 1 月 9 日、2009 年 2 月 5 日、2009 年 2 月 23 日、2009 年 5 月 13 日、2009 年 5 月 14 日以及 2009 年 5 月 15 日，表 3.7 為外業 GPS 觀測時間。

表 3.7 實驗日期及 GPS 觀測時間

2009 年	GPS 移動站觀測時間	經過時間	參考主站觀測時間	經過時間
1 月 9 日	09:27:24 ~ 17:38:35	08:11:11	08:34:50 ~ 17:03:08	08:28:18
2 月 5 日	08:48:47 ~ 17:07:27	08:18:40	08:35:05 ~ 16:47:35	08:12:30
2 月 23 日	08:52:45 ~ 15:01:04	06:08:19	08:14:04 ~ 15:13:39	06:59:35
5 月 13 日	08:47:56 ~ 17:38:30	08:50:34	08:17:24 ~ 16:20:40	08:03:16
5 月 14 日	08:48:54 ~ 17:33:26	08:44:32	08:21:24 ~ 16:56:31	08:35:07
5 月 15 日	08:40:24 ~ 15:04:47	06:24:23	08:16:24 ~ 16:52:37	08:36:13

如圖 3.21 所示，為了得到 S810 點位之坐標，邱士銘 (2008) 利用台灣 e-GPS 站之金門站 (KMNM) 當作固定站，網型解算出外垵站 (WIAN)、七美站 (CIME)、北港站 (PKGM)、旗山站 (CISH)、高雄港站 (KASH) 之坐標，並且利用七美站 (CIME) 與高雄港站 (KASH) 來解算出 S810 在 ITRF2005 參考系統下的坐標，如表 3.8 所示。

表 3.8 e-GPS 站之已知 ITRF2005 坐標

	緯度	經度	橢球高(m)
CIME	23° 12' 16.702246"	119° 25' 47.927226"	54.8731
CISH	22° 53' 22.535680"	120° 28' 52.435806"	90.8799
KASH	22° 36' 52.186762"	120° 17' 18.069263"	25.6421
PKGM	23° 34' 47.615025"	120° 18' 19.810233"	42.7740
WIAN	23° 34' 03.126585"	119° 28' 50.886968"	45.0170
S810	22° 59' 26.766685"	120° 10' 57.108706"	41.3517

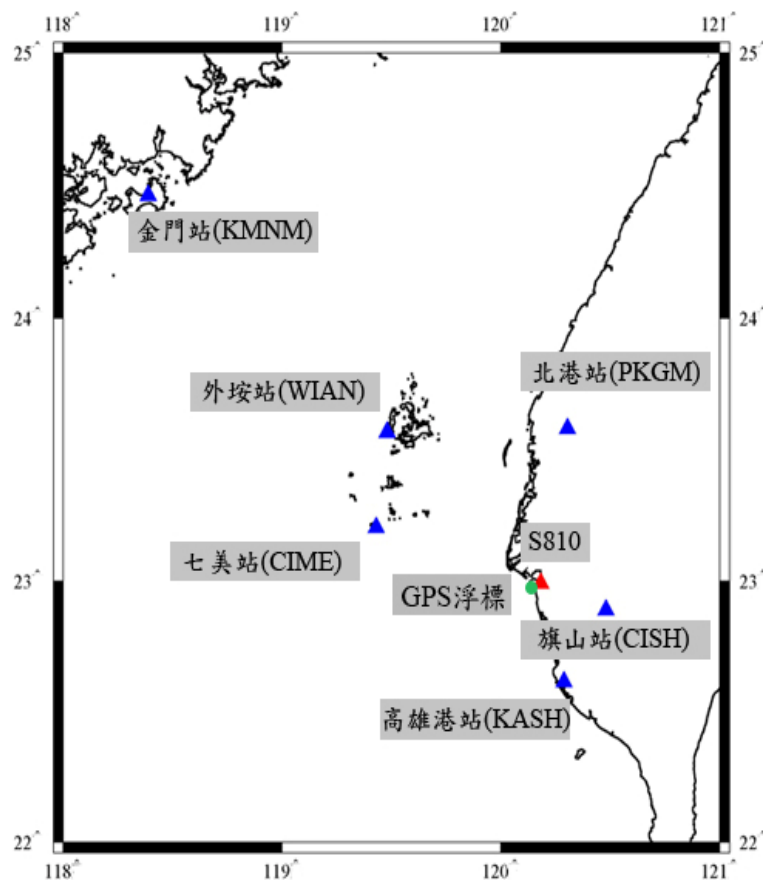


圖 3.21 e-GPS 站及 S810 位置示意圖 (藍色三角形為 e-GPS 站，紅色三角形為 S810 二等衛星控制點，綠色圓形為 GPS 移動站)

§ 3.7.1 靜態精密單點定位靜態測試

本計畫取得了 2009 年 1 月 9 日、2009 年 2 月 5 日以及 2009 年 2 月 23 日之台灣 e-GPS 站觀測檔 (接收頻率為 1 Hz)，故先針對各個 e-GPS 站 24 小時資料進行精密單點定位解算，衛星仰角設為 15 度，精密星曆及精密衛星時鐘改正資料皆採用 IGS 發布之最終產品(final product)，每日計算坐標值與已知坐標之比較如表 3.9 所示。圖 3.22(a)~圖 3.26(f) 為各 e-GPS 站的靜態定位誤差圖與衛星 PDOP 值。

表 3.9 靜態精密單點定位精度(單位：公分)

1 月 9 日	E	N	U	2D RMS	3D RMS
CIME	-0.957	0.404	0.048	1.039	1.040
CISH	-4.013	0.285	-0.101	4.023	4.025
KASH	-3.956	-1.501	0.140	4.231	4.233
PKGM	0.950	1.616	-2.022	1.875	2.757
WIAN	1.706	0.740	-2.078	1.860	2.789
1 月 9 日	E	N	U	2D RMS	3D RMS
CIME	2.371	0.593	1.022	2.894	3.069
CISH	-3.661	-0.336	0.687	3.652	3.716
KASH	-3.586	-1.973	0.728	4.111	4.175
PKGM	1.583	1.159	-2.478	2.110	3.255
WIAN	2.620	0.403	-0.393	2.477	2.508
1 月 9 日	E	N	U	2D RMS	3D RMS
CIME	2.371	0.593	2.527	2.444	3.516
CISH	-3.661	-0.336	1.658	3.676	4.033
KASH	-3.586	-1.973	2.090	4.093	4.596
PKGM	1.583	1.159	-1.455	1.962	2.443
WIAN	2.620	0.403	1.290	2.651	2.948

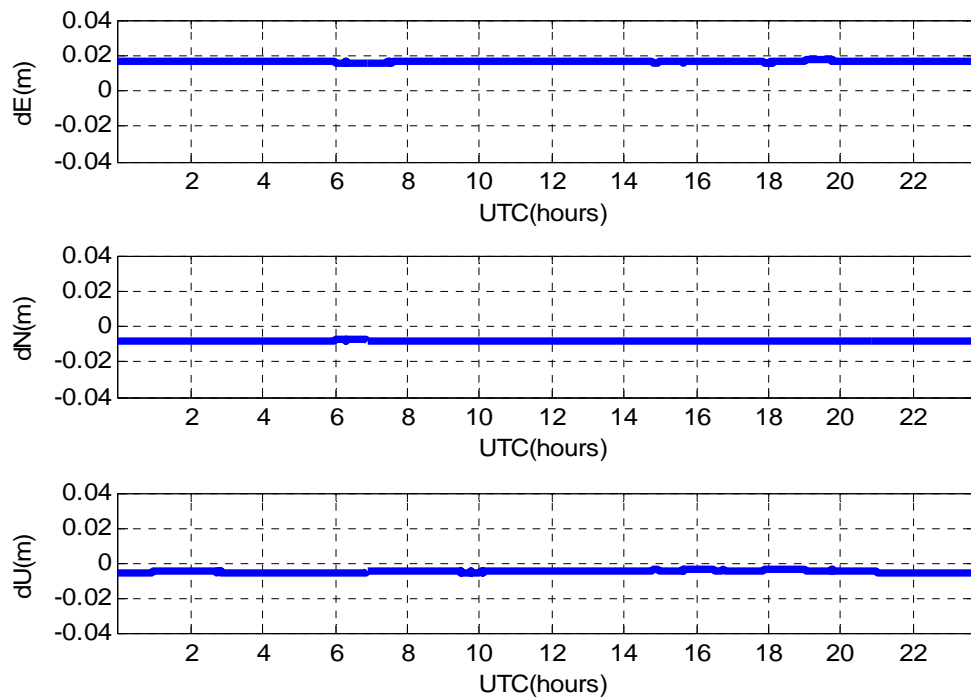


圖 3.22(a) 2009 年 1 月 9 日 CIME(七美站)PPP 靜態定位誤差

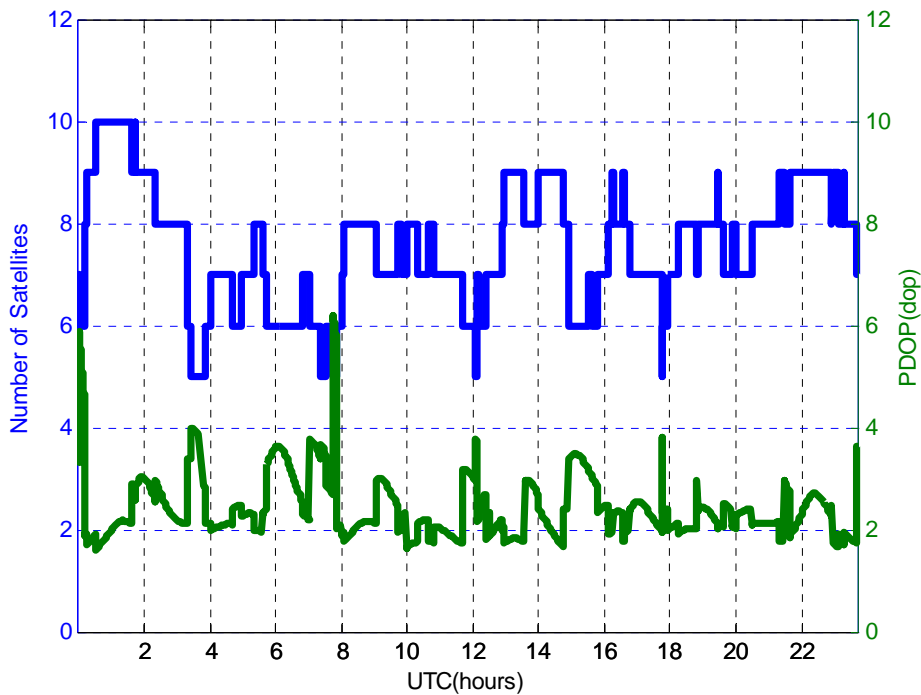
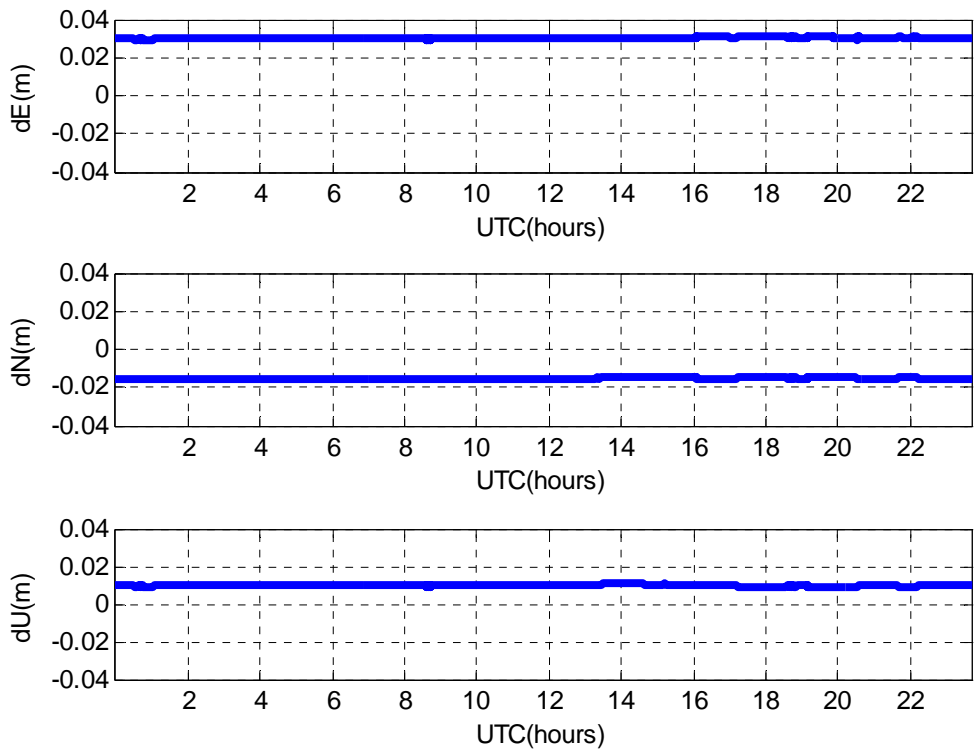


圖 3.22(b) 2009 年 1 月 9 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化



圖

3.22(c) 2009年2月5日 CIME(七美站)PPP 靜態定位誤差

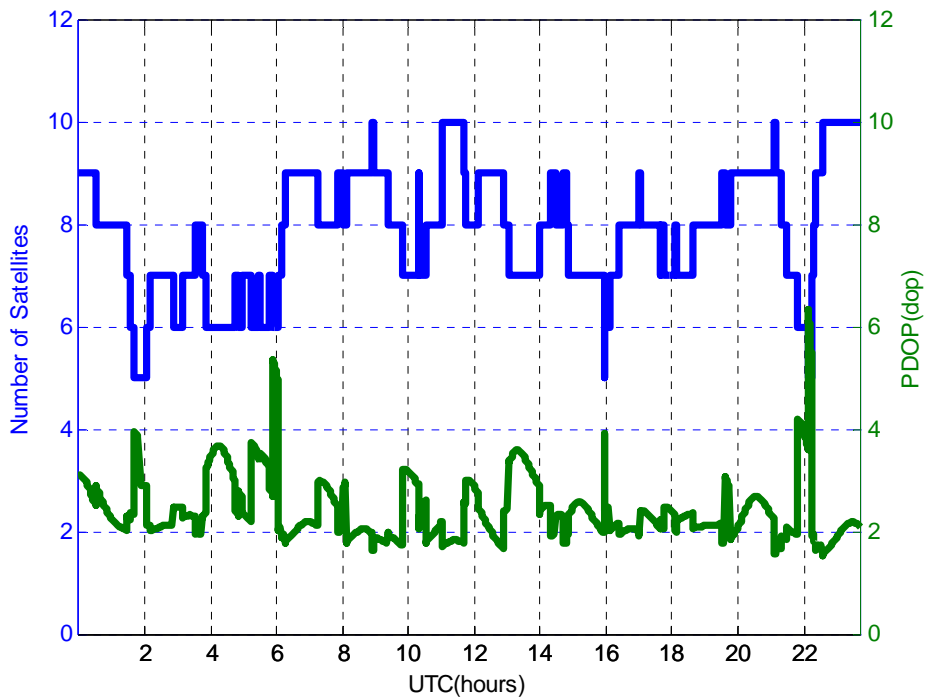


圖 3.22(d) 2009年2月5日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

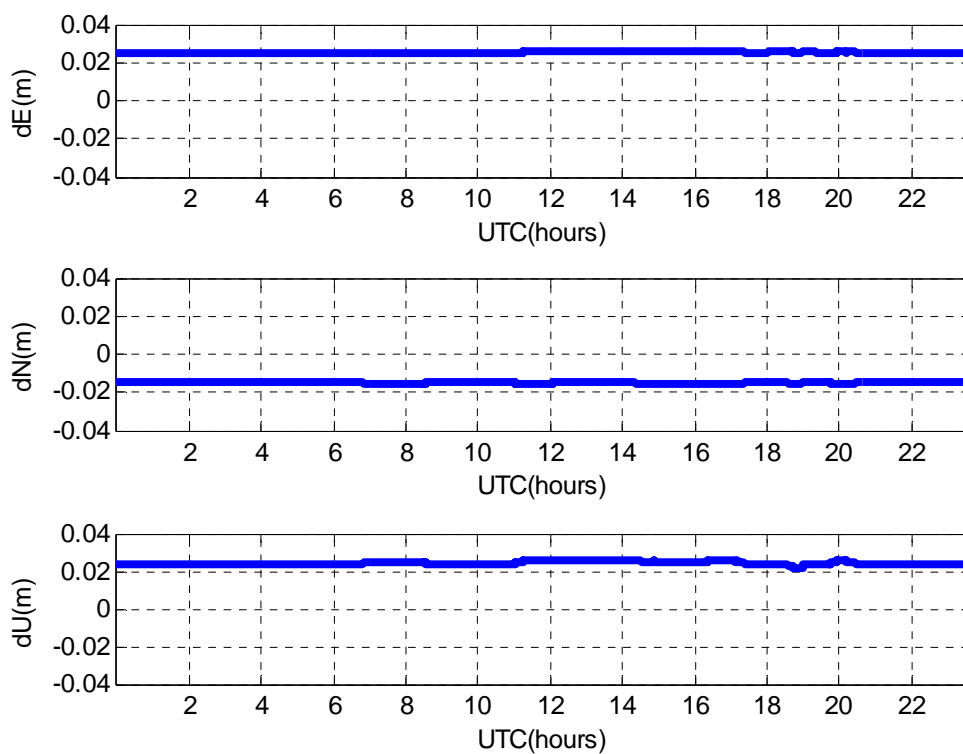


圖 3.22(e) 2009 年 2 月 23 日 CIME(七美站)PPP 靜態定位誤差

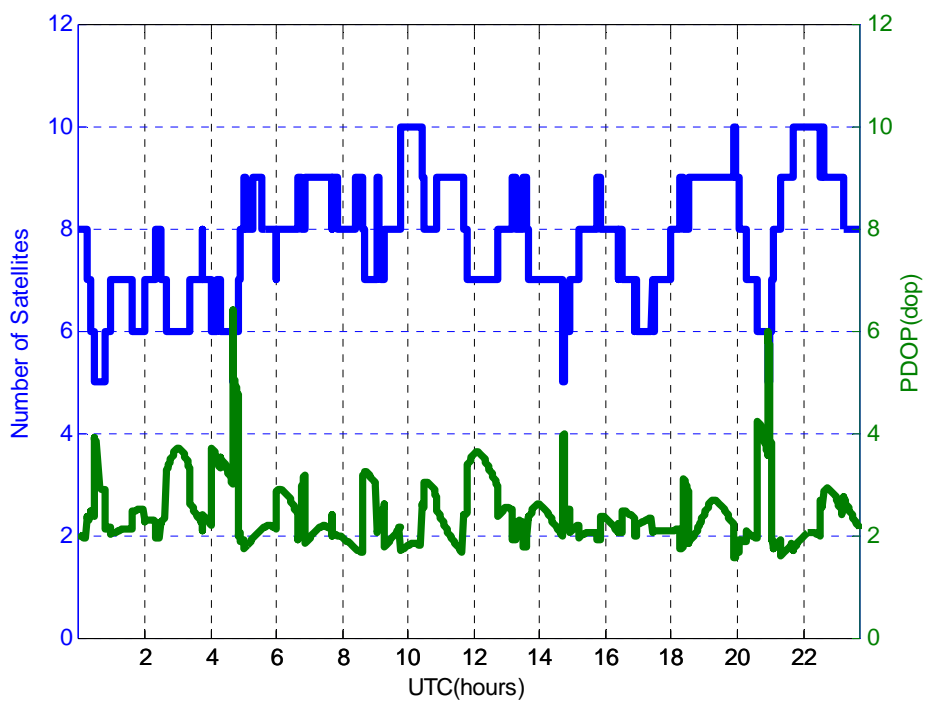


圖 3.22(f) 2009 年 2 月 23 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

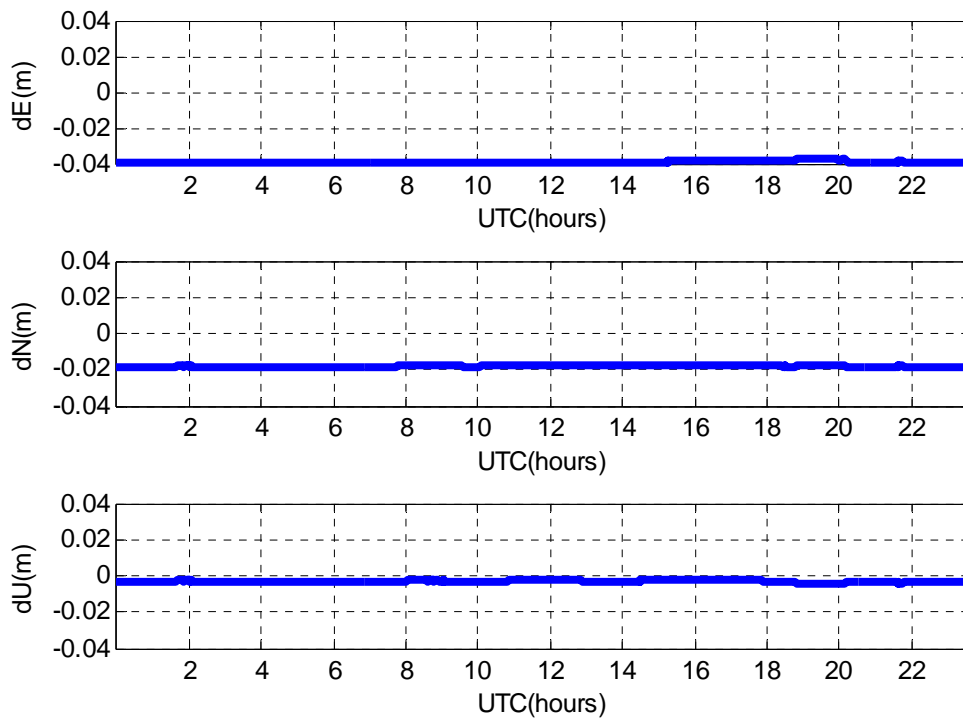


圖 3.23(a) 2009 年 1 月 9 日 CISH(旗山站)PPP 靜態定位誤差

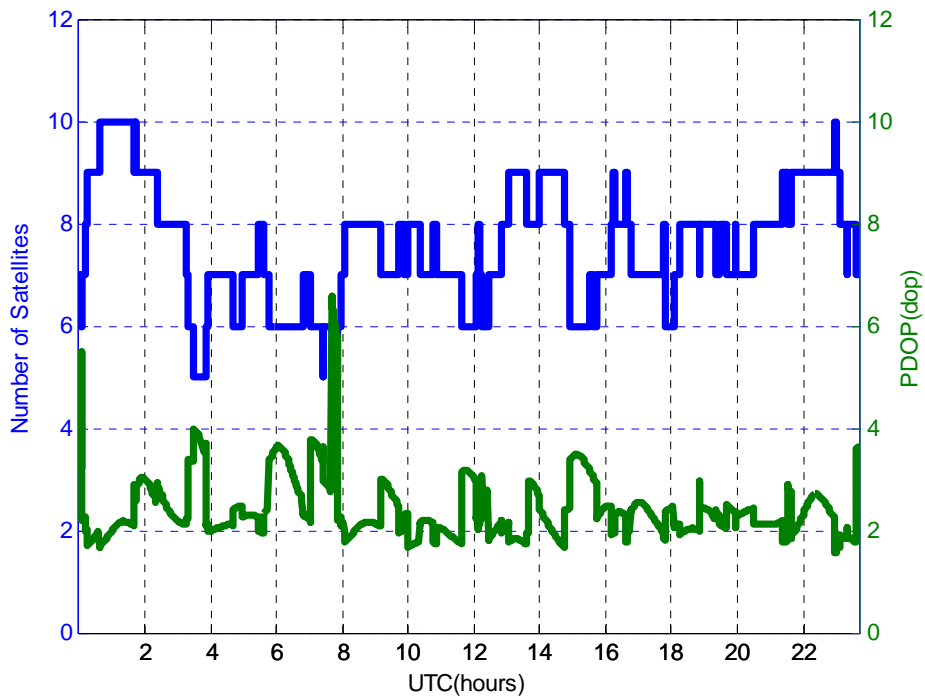


圖 3.23(b) 2009 年 1 月 9 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

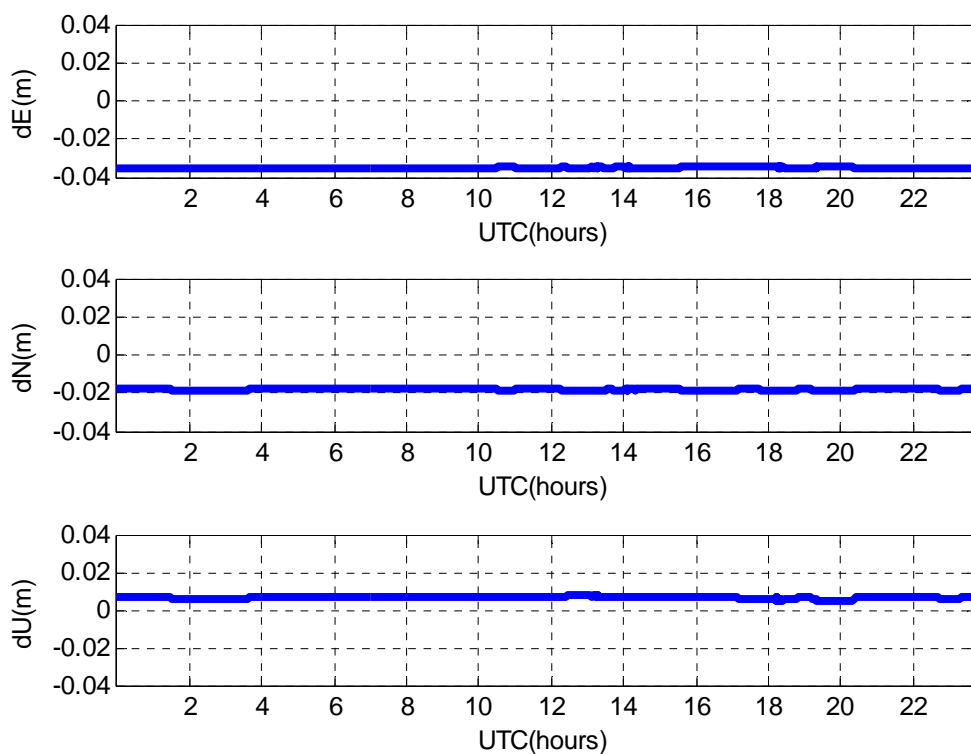


圖 3.23(c) 2009 年 2 月 5 日 CISH(旗山站)PPP 靜態定位誤差

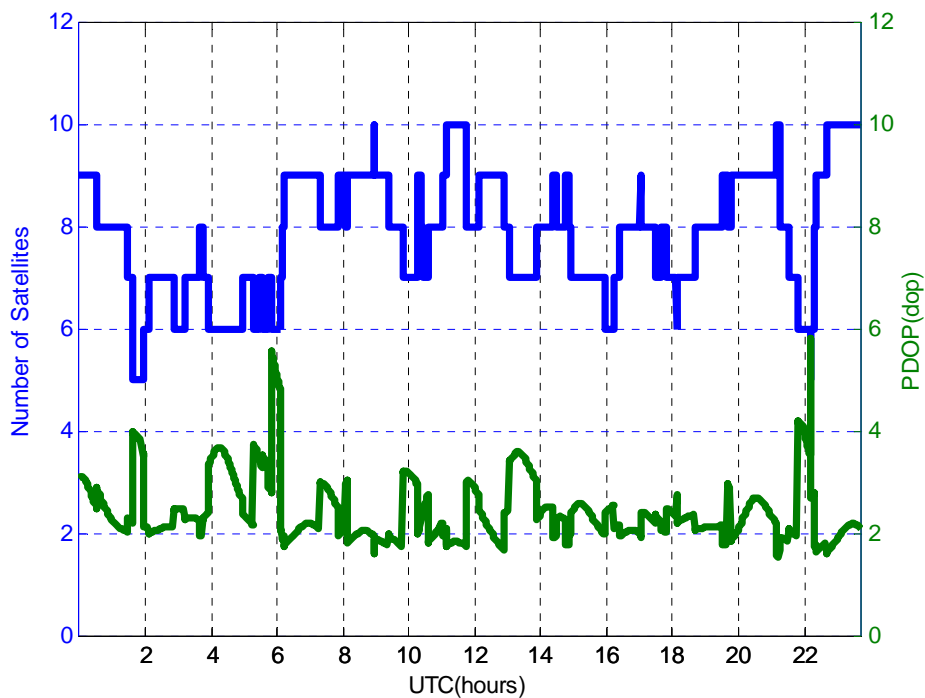


圖 3.23(d) 2009 年 2 月 5 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

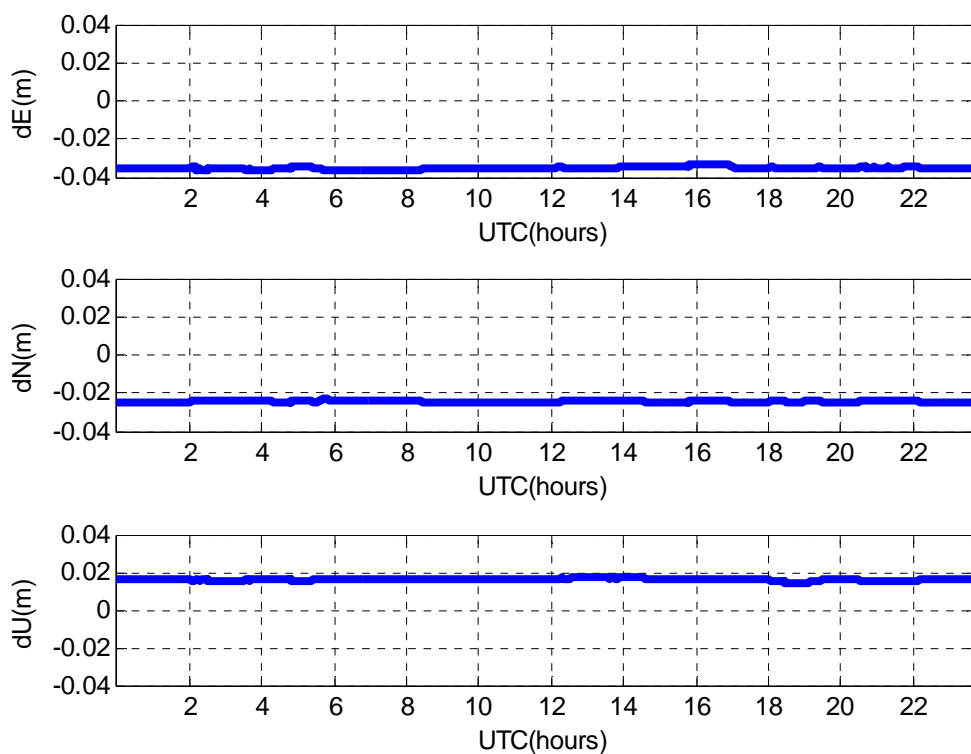


圖 3.23(e) 2009 年 2 月 23 日 CISH(旗山站)PPP 靜態定位誤差

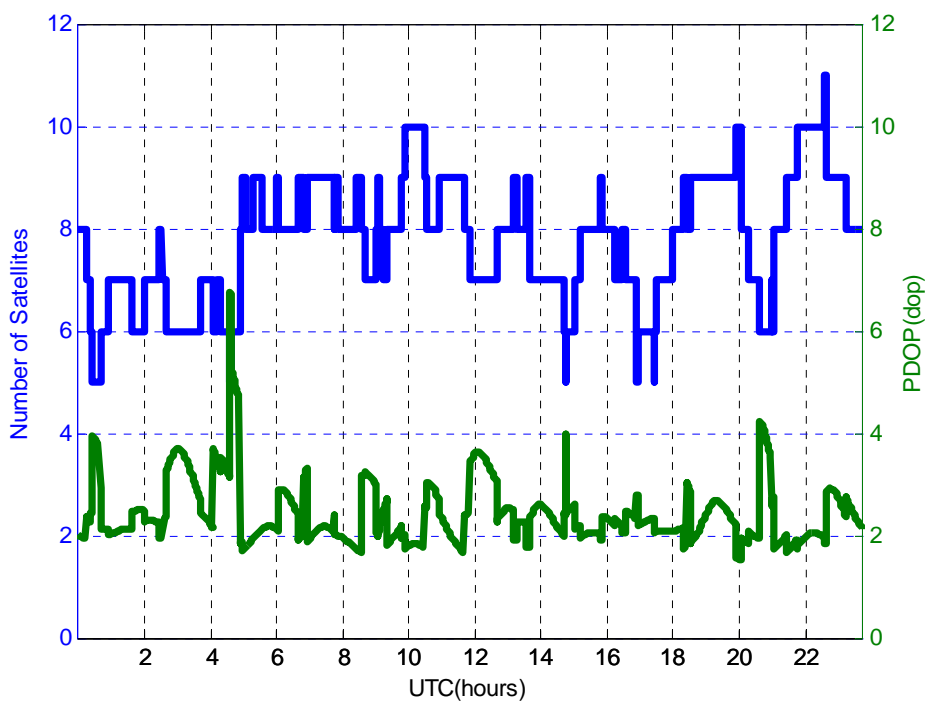


圖 3.23(f) 2009 年 2 月 23 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

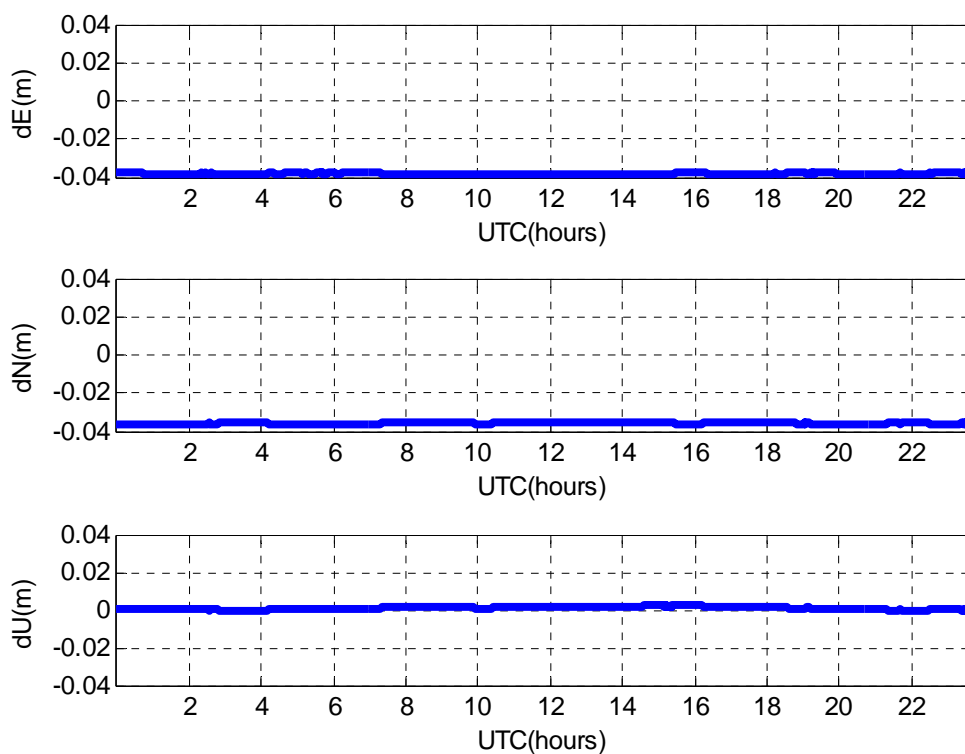


圖 3.24(a) 2009 年 1 月 9 日 KASH(高雄港站)PPP 靜態定位誤差

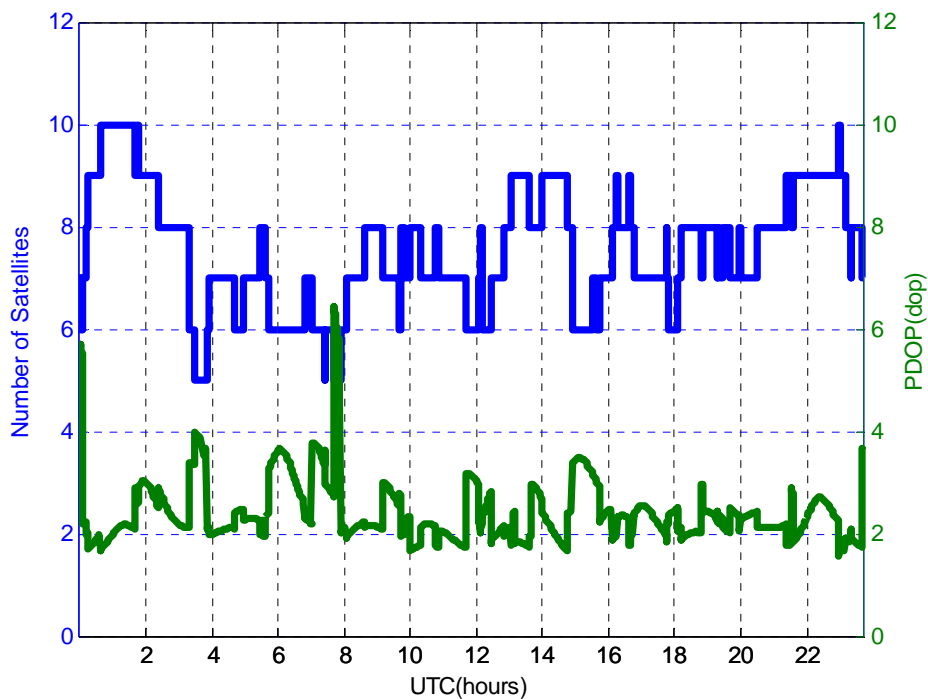


圖 3.24(b) 2009 年 1 月 9 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

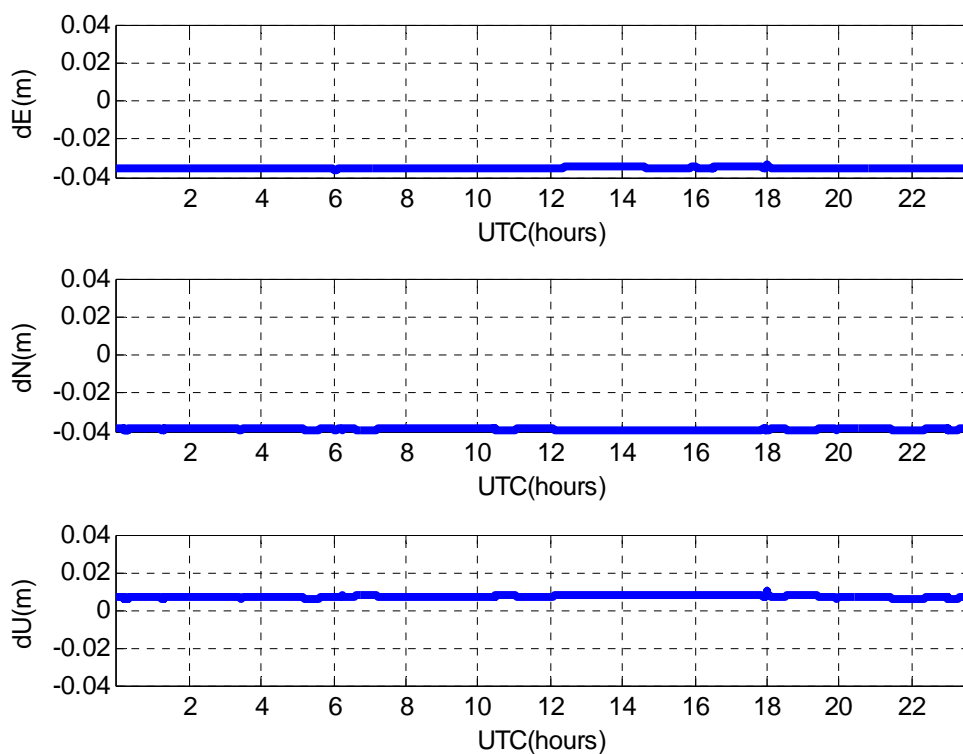


圖 3.24(c) 2009 年 2 月 5 日 KASH(高雄港站)PPP 靜態定位誤差

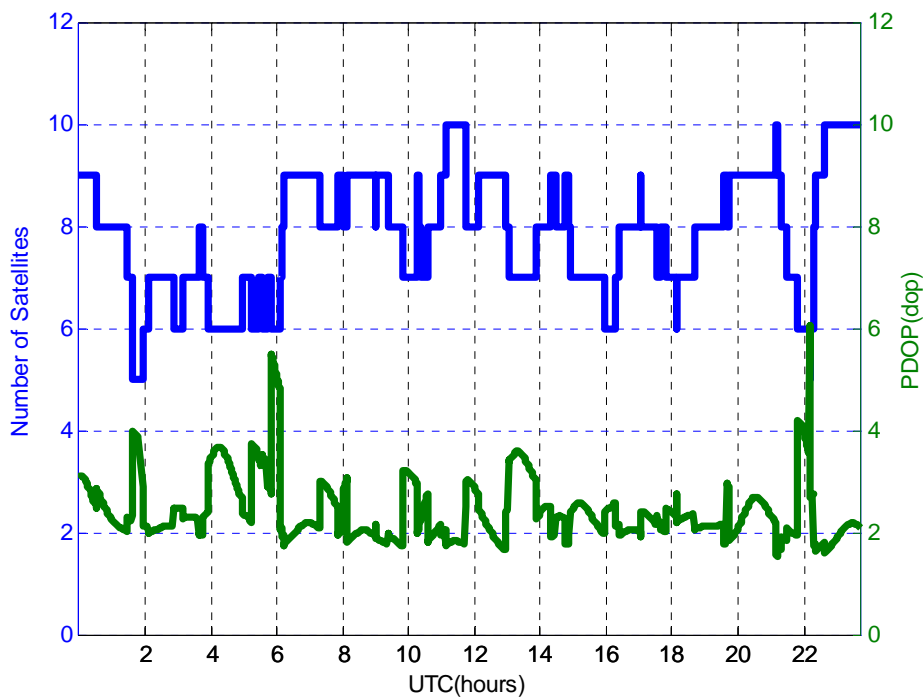


圖 3.24(d) 2009 年 2 月 5 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

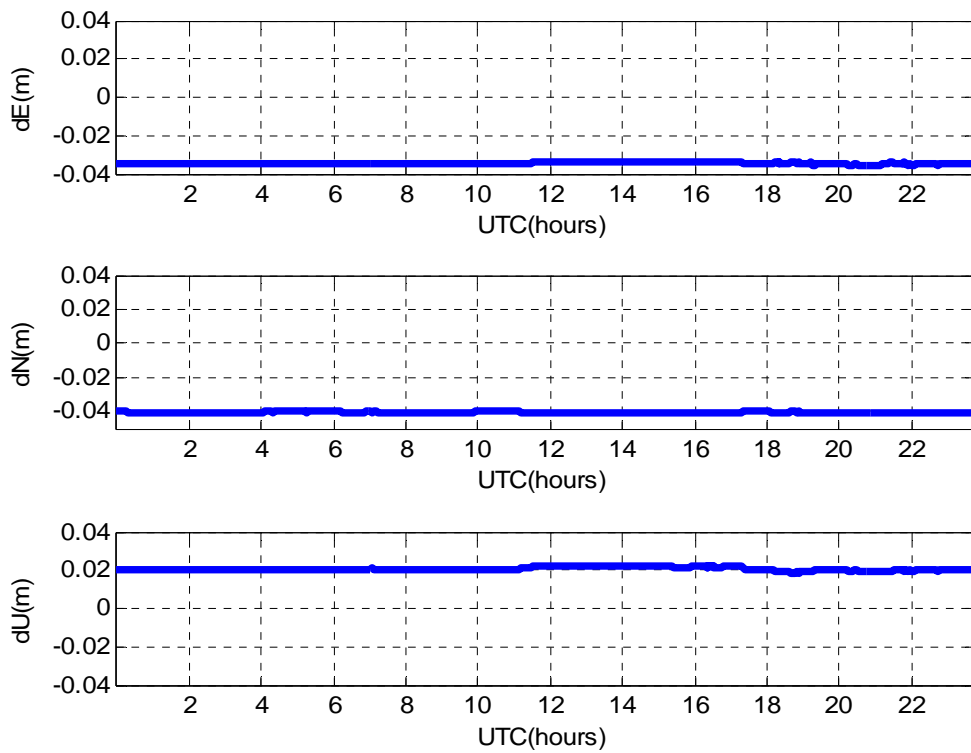


圖 3.24(e) 2009 年 2 月 23 日 KASH(高雄港站)PPP 靜態定位誤差

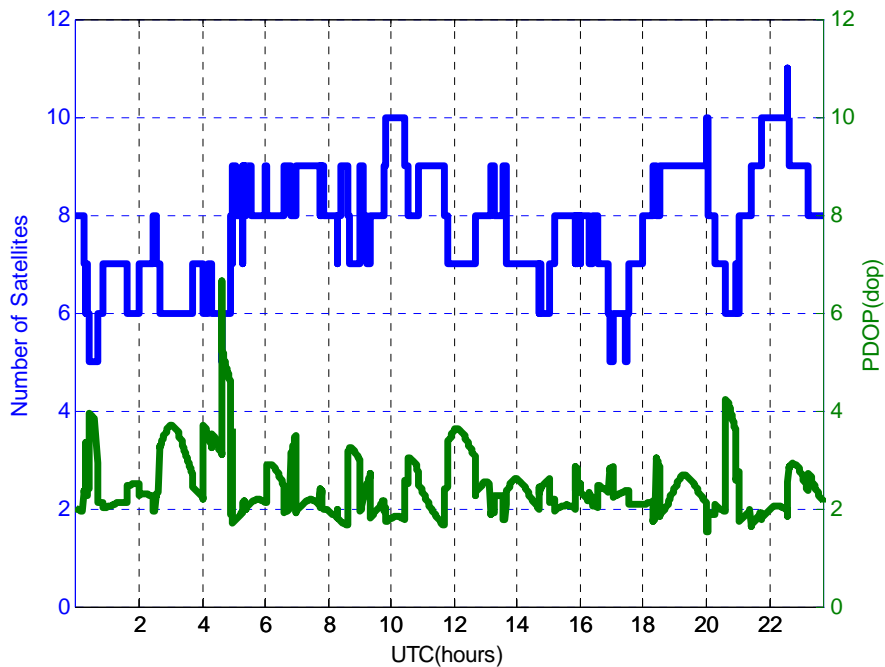


圖 3.24(f) 2009 年 2 月 23 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

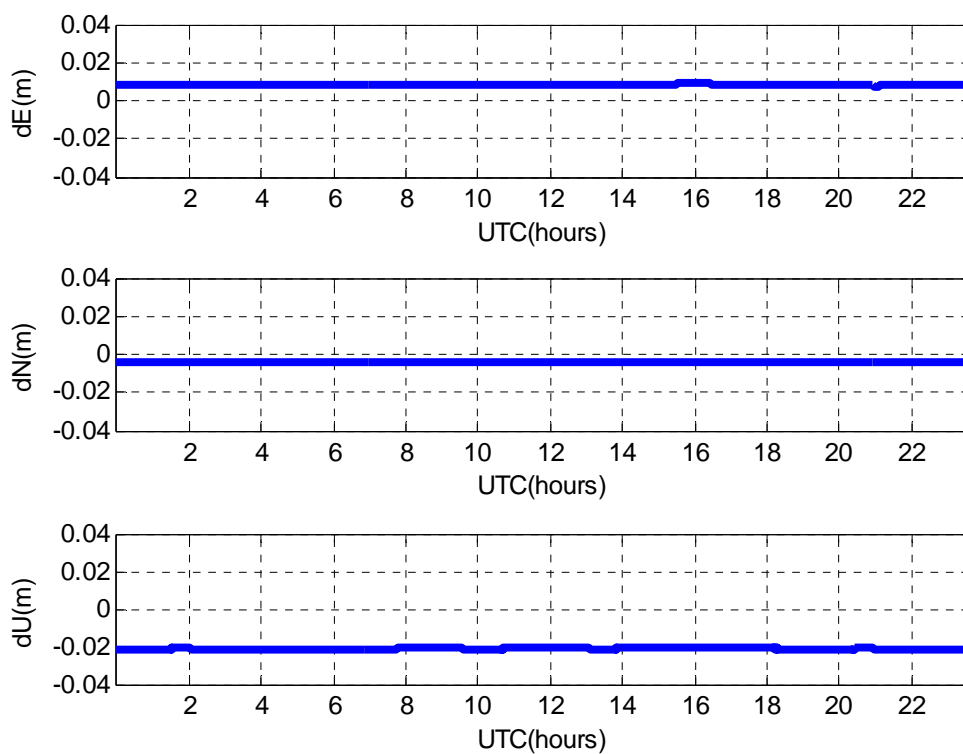


圖 3.25(a) 2009 年 1 月 9 日 PKGM(北港站)PPP 靜態定位誤差

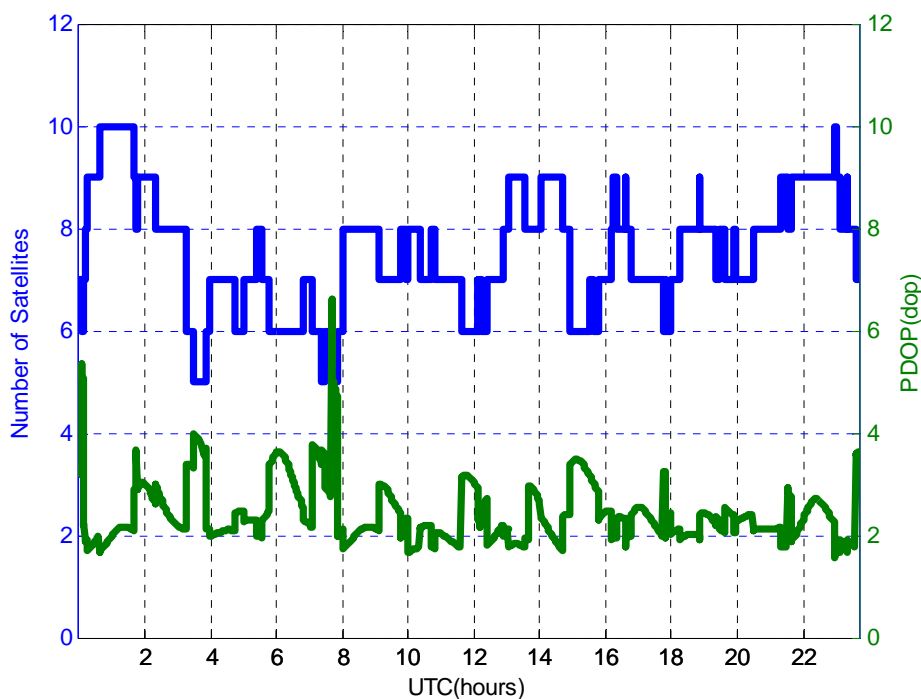


圖 3.25(b) 2009 年 1 月 9 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

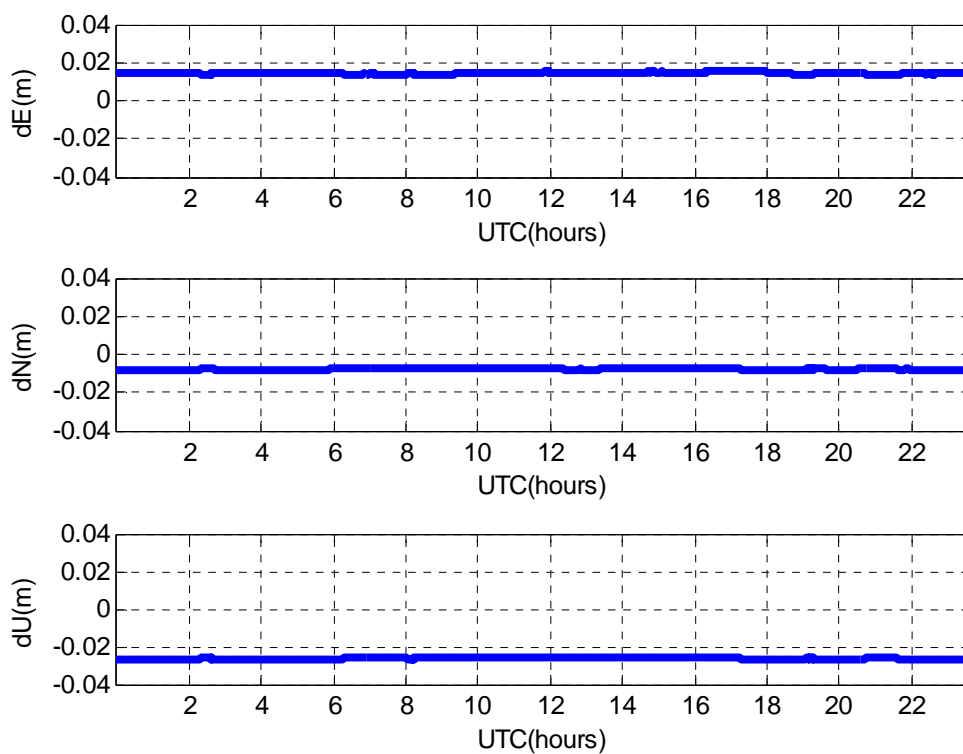


圖 3.25(c) 2009 年 2 月 5 日 PKGM(北港站)PPP 靜態定位誤差

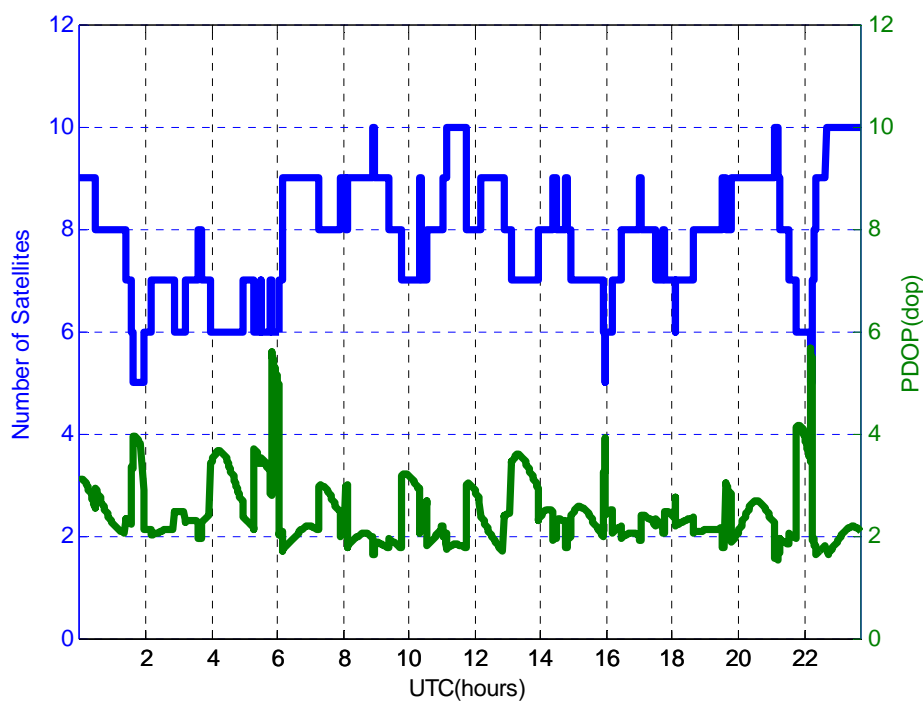


圖 3.25(d) 2009 年 2 月 5 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

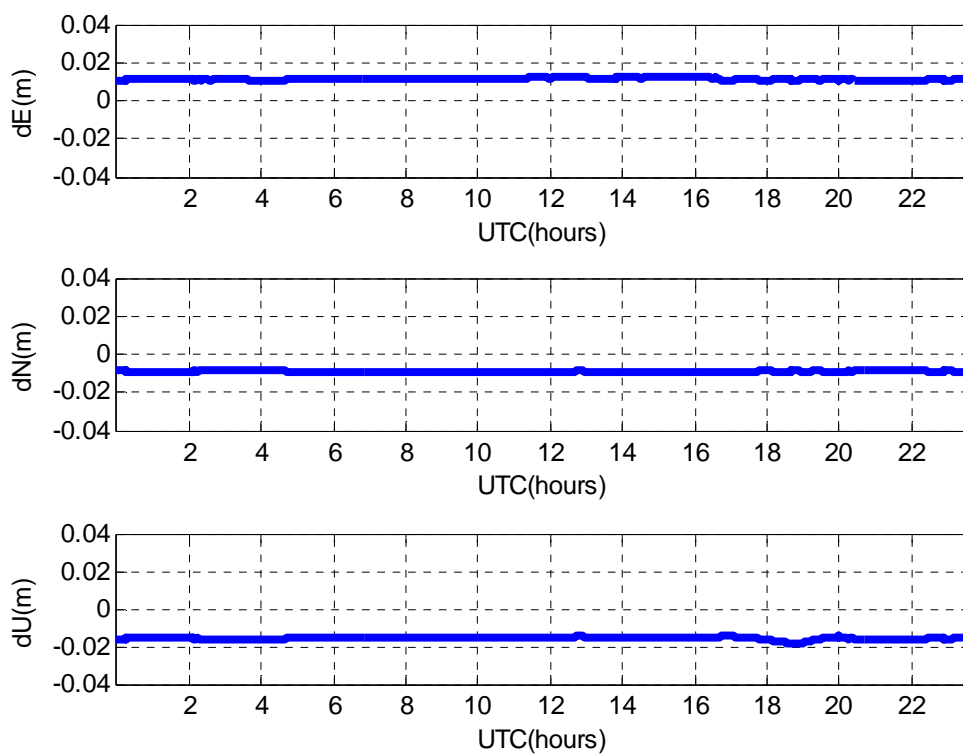


圖 3.25(e) 2009 年 2 月 23 日 PKGM(北港站)PPP 靜態定位誤差

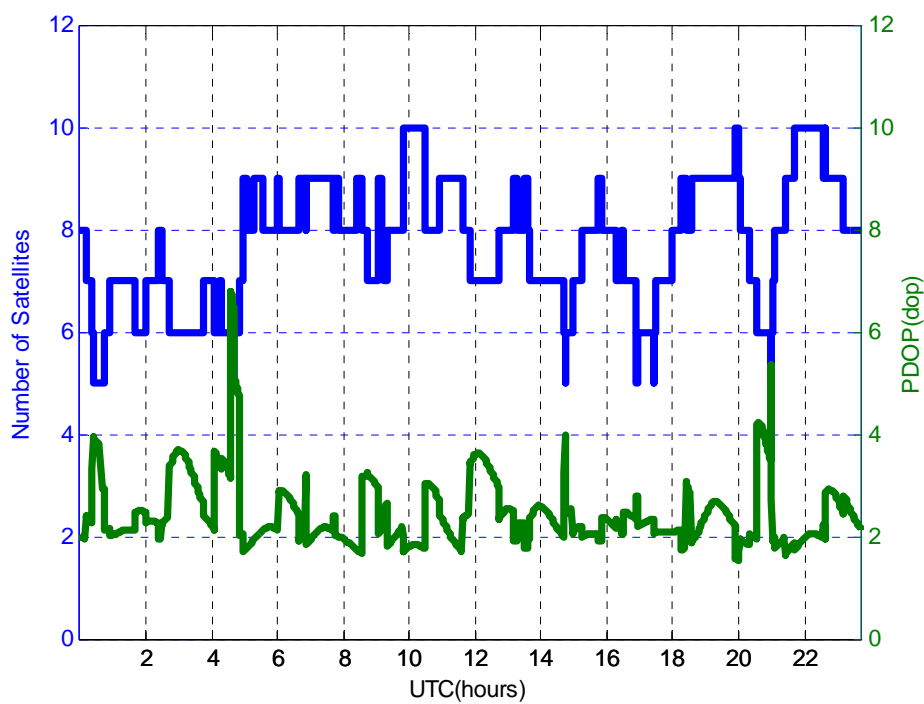


圖 3.25(f) 2009 年 2 月 23 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

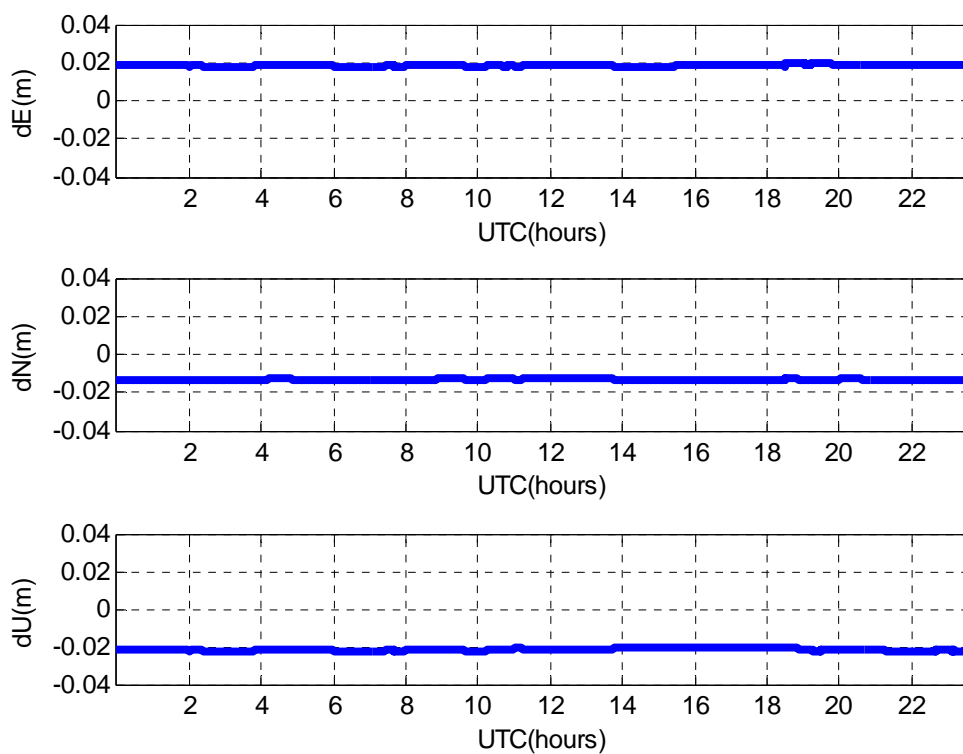


圖 3.26(a) 2009 年 1 月 9 日 WIAN(外垵站)PPP 靜態定位誤差

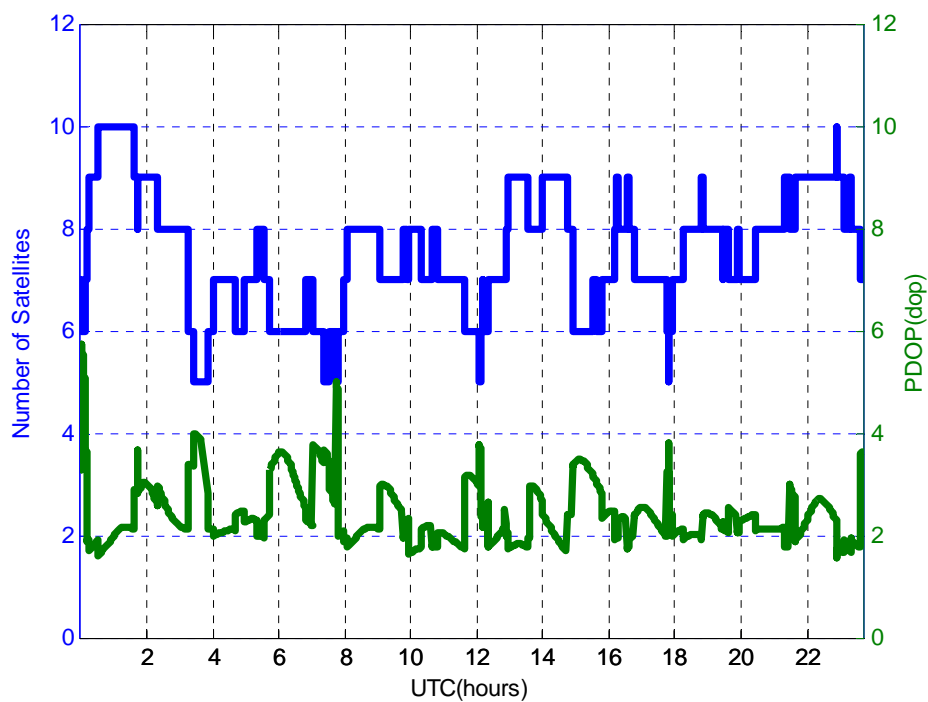


圖 3.26(b) 2009 年 1 月 9 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

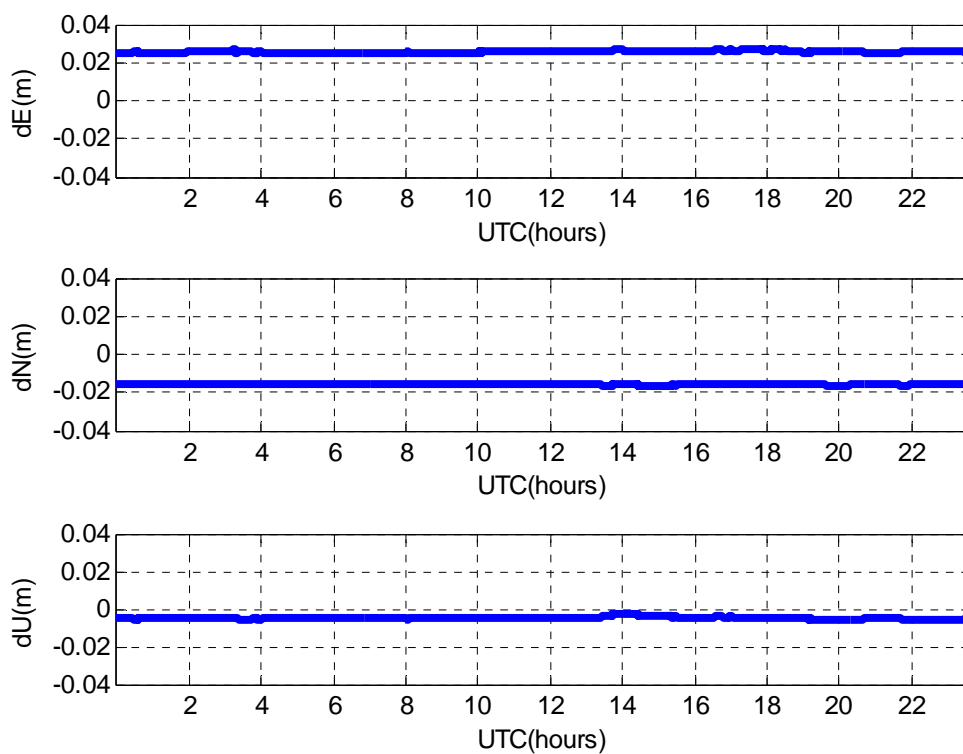


圖 3.26(c) 2009 年 2 月 5 日 WIAN(外坵站)PPP 靜態定位誤差

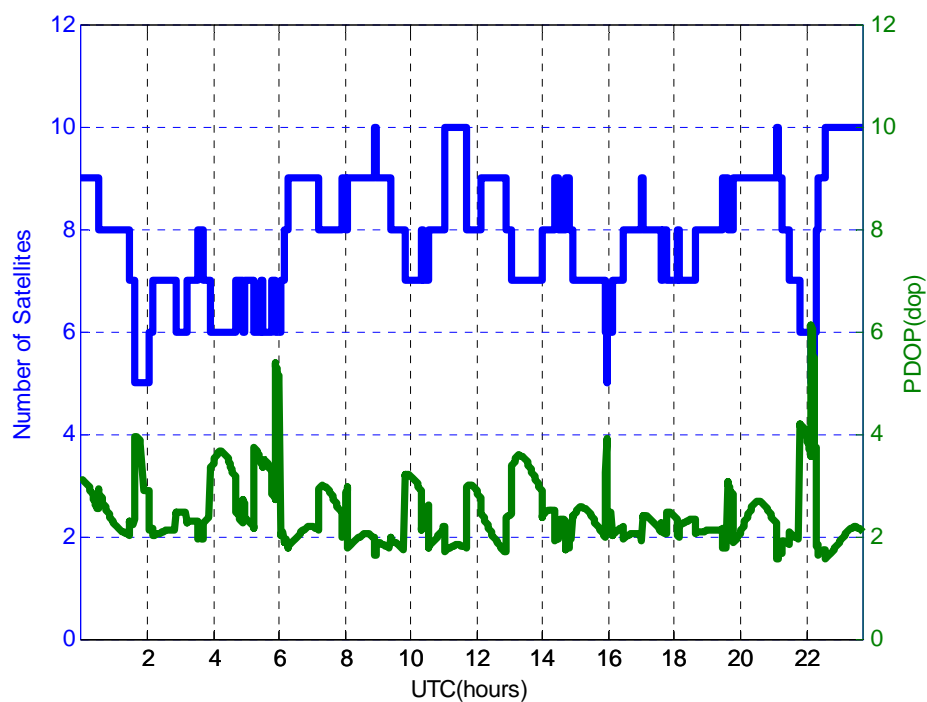


圖 3.26(d) 2009 年 2 月 5 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

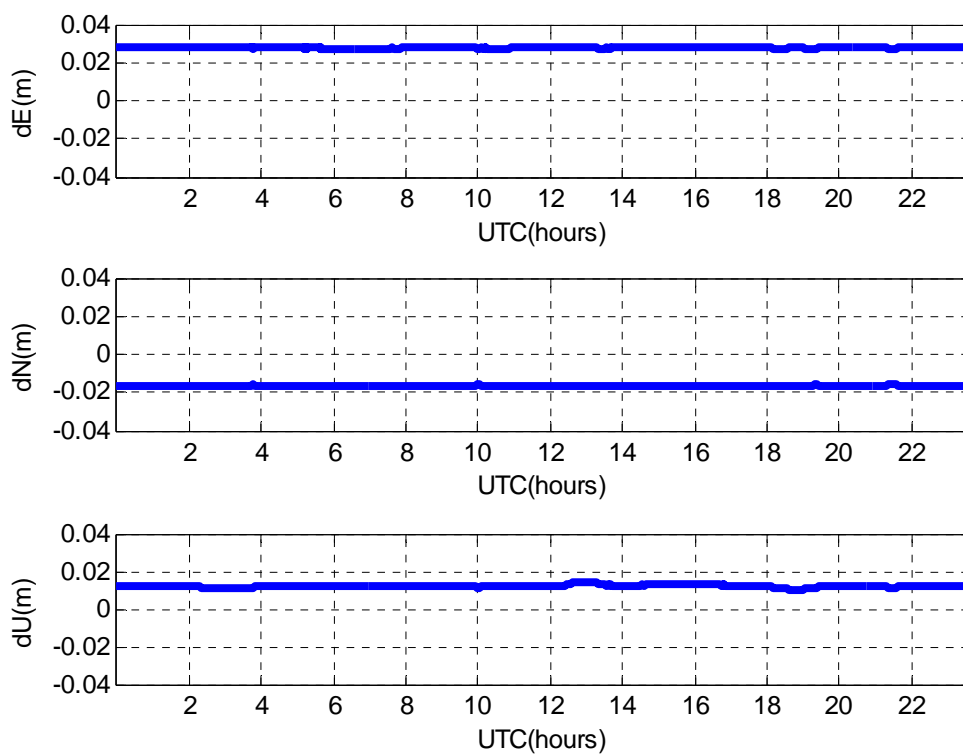


圖 3.26(e) 2009 年 2 月 23 日 WIAN(外垵站)PPP 靜態定位誤差

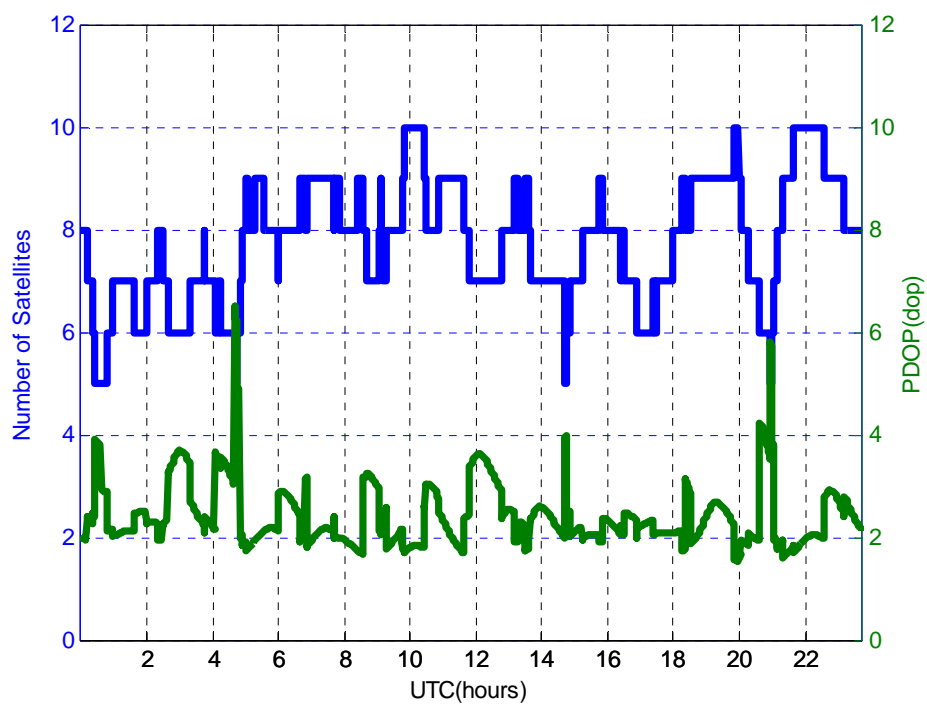


圖 3.26(f) 2009 年 2 月 23 日解算過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

由表 3.9 可以發現，利用精密單點定位技術來進行靜態定位時，5 個 e-GPS 站之平面精度及高程精度皆在 5 公分以內，因此公分級需求之靜態定位已經可以利用精密單點定位來獲得，且在人力及儀器設備的需求皆可降低。表中高程精度甚佳的原因可歸納為：(1)24 小時之靜態觀測量定位解算成果收斂狀況佳、(2)這些觀測站的訊號品質與(3)精密單點計算模式中採正向濾波與逆向濾波之雙向計算成果取平均。

除了進行上述比較外，為了瞭解每個站點的觀測環境、觀測數據，本實驗使用了 UNAVCO (University NAVSTAR Consortium) 提供的 TEQC (Translate, Edit, Quality Check) 數據處理工具檢查各個 e-GPS 站的觀測資料情形，TEQC 是一套專門針對 GPS / GLONASS / Galileo / SBAS 各種不同衛星定位系統觀測數據檢測、編輯的工具，擁有格式轉換、編輯以及品質檢測的功能。觀測檔(O 檔) 主要品質檢測項目有 o/slps、mp1、mp2 三個指標。O/slps 為觀測量-週波脫落比，即為總觀測量數除以總週波脫落數，代表的意義為每幾筆資料會發生一次週波脫落，此值越大代表觀測品質越好；mp1、mp2 則分別代表 L1、L2 載波相位上的多路徑效應對虛擬距離和載波相位的綜合指標，單位為公尺。

將兩天每個 e-GPS 站的觀測檔 (O 檔) 經過此工具檢測後的數據如表 3.10 所示。我們可以發現表 3.8 中高雄港站 (KASH) 進行精密單點定位成果三天的 3D RMS 皆為最高，誤差量最大，此情形可以由其 o/slps 數值明顯低於其他站來解釋之。另旗山站 (CISH) 站之 o/slps 數值明顯高於高雄港站 (KASH)，然其定位精度卻與高雄港站 (KASH) 相似，約為 4 公分等級。其主要成因推測可能為這些測試站之參考坐標主要由金門站 (KMNM) 當作固定站，使用網型解算出外垵站 (WIAN)、七美站(CIME)、北港站 (PKGGM)、旗山站 (CISH)、高雄港站 (KASH) 之坐標。由幾何關係可知，旗山站 (CISH)、高雄港站 (KASH) 相對其他站而言距離金門站 (KMNM) 是較遠的，故其經由平差計算後所得參考坐標之精度可能受基線長度之影響而有

所降低。另一個可能原因為 2008 迄本實驗之觀測時刻，南台灣陸續發生幾次規模較大之地震，故此二點位現有坐標較 2008 獲得之參考坐標產生系統性偏移。由表 3.9 可知這三次的實驗結果顯示此二站較大的誤差都出現在東西向(約 4 公分)。

表 3.10 台灣 e-GPS 站觀測品質指標

2009 年 1 月 9 日	CIME	CISH	KASH	PKGGM	WIAN
o/slps	4539	23377	313	38944	2118
mp1(m)	0.36	0.33	0.31	0.40	0.37
mp2(m)	0.42	0.41	0.32	0.44	0.41
2009 年 2 月 5 日	CIME	CISH	KASH	PKGGM	WIAN
O/slps	5321	12310	299	49201	4484
mp1(m)	0.36	0.33	0.31	0.43	0.31
mp2(m)	0.41	0.42	0.31	0.46	0.33
2009 年 2 月 23 日	CIME	CISH	KASH	PKGGM	WIAN
O/slps	2883	4324	262	26607	8506
mp1(m)	0.44	0.34	0.36	0.44	0.30
mp2(m)	0.52	0.43	0.47	0.47	0.32

§ 3.7.2 精密單點定位與差分相對定位之比較

為了得到精密單點定位與差分相對定位應用於 GPS 移動站定位的比較，本研究在安平潮位站旁進行了 6 次 GPS 移動站實驗，分別利用不同發布時間延遲的精密星曆及精密時鐘誤差來進行 GPS 移動站精密單點定位；而距離 GPS 移動站 1.5 公里之 S810 二等衛星控制點進行相對差分相對定位之解算成果理論上已將系統誤差等影響降至最低，本研究將其視為參考解或正確解。由於精密單點定位屬於直接定位，解算後得到 GPS 移動站天線盤相位中心之絕對坐標；而差分相對定位解算的是參考主站到 GPS 移動站天線盤相位中心的基線，再由參考主站之坐標推算出 GPS 移動站之坐標。故我們進行兩種成果之比較時必須謹慎考慮兩種定位方法的坐標系統是否一致，研究中需將所有解算成果進行坐標轉換至同一坐標系統。

在進行精密單點定位解算時，考慮到其待估參數較多，故需要之衛星數較多，但低角度之衛星訊號延遲較嚴重的情形下，將兩種方法解算的衛星仰角皆設為 10 度；而在此種簡易型 GPS 移動站的設計下非常貼近海水面，多路徑效應誤差也可降至最低。IGS 最終產品(final product)為目前可以取得之最精準之星曆、時鐘改正資料，發布延遲時間約為 13 天，本研究使用之精密時鐘改正資料時間間隔為 30 秒，計算時會將其改正資料內插為 GPS 移動站接收頻率(1 Hz)，當使用時間間隔越長之改正資料時，其內插的精度將會下降，圖 3.26(a) ~ 圖 3.26(l)分別為 6 次 GPS 移動站實驗之精密單點定位解算成果與參考解之 ENU 方向誤差比較、衛星顆數變化、PDOP 值變化。

6 天 GPS 移動站 ENU 方向誤差之平均值(Mean)、均方根(RMS)及標準差(STD)如表 3.11 所示。由圖 3.27(a) ~ 圖 3.27(l)可以發現，當衛星顆數、幾何分佈變化時會導致 PDOP 值突然上升，精密單點定位的精度會突然變差，尤其是高程方向更為明顯。故進行單點定位時 PDOP 值與定位精度是息息相關的。如表 3.11 所示，使用 IGS 最終產品(final product)進行動態精密單點定位時，平面方向 RMS 可以達到 3~5 公分左右；高程方向 RMS 則在 10 公分左右，在高變動率的海上進行測量時，這樣的精度已可滿足大部分的定位需求。

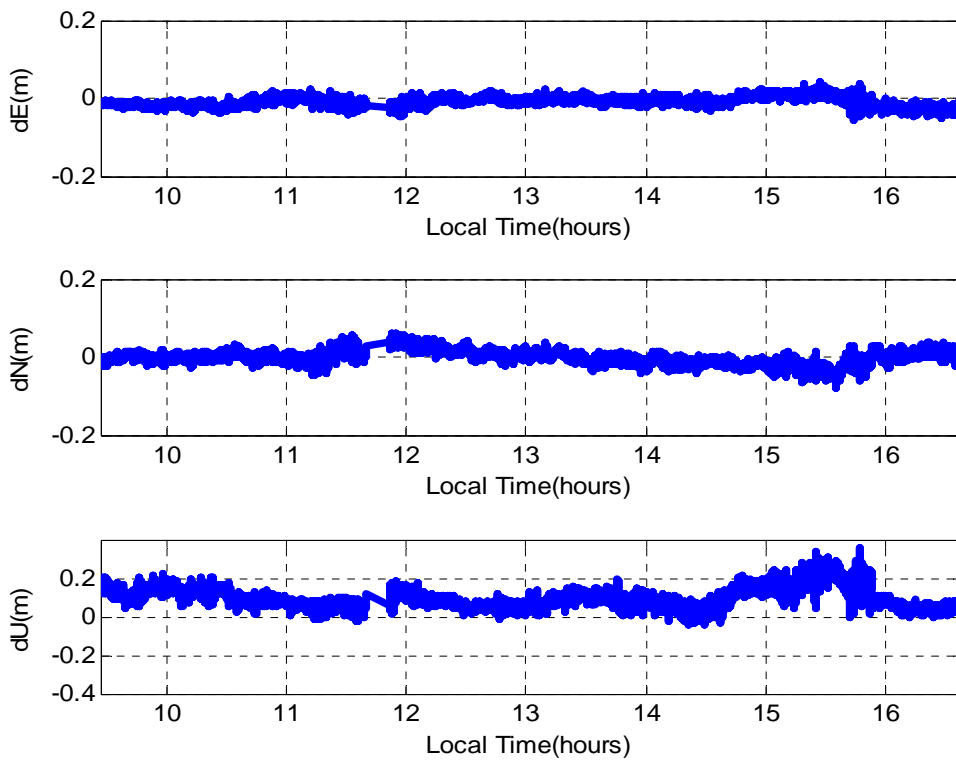


圖 3.27(a) 2009 年 1 月 9 日 PPP 定位誤差(使用 IGS 最終產品)

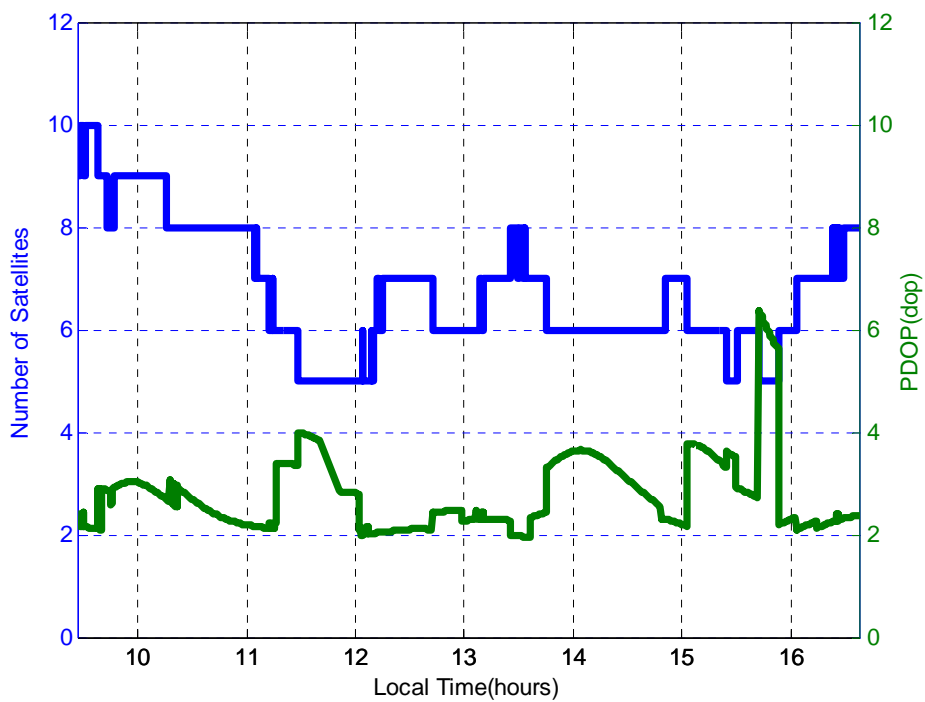


圖 3.27(b) 2009 年 1 月 9 日實驗過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

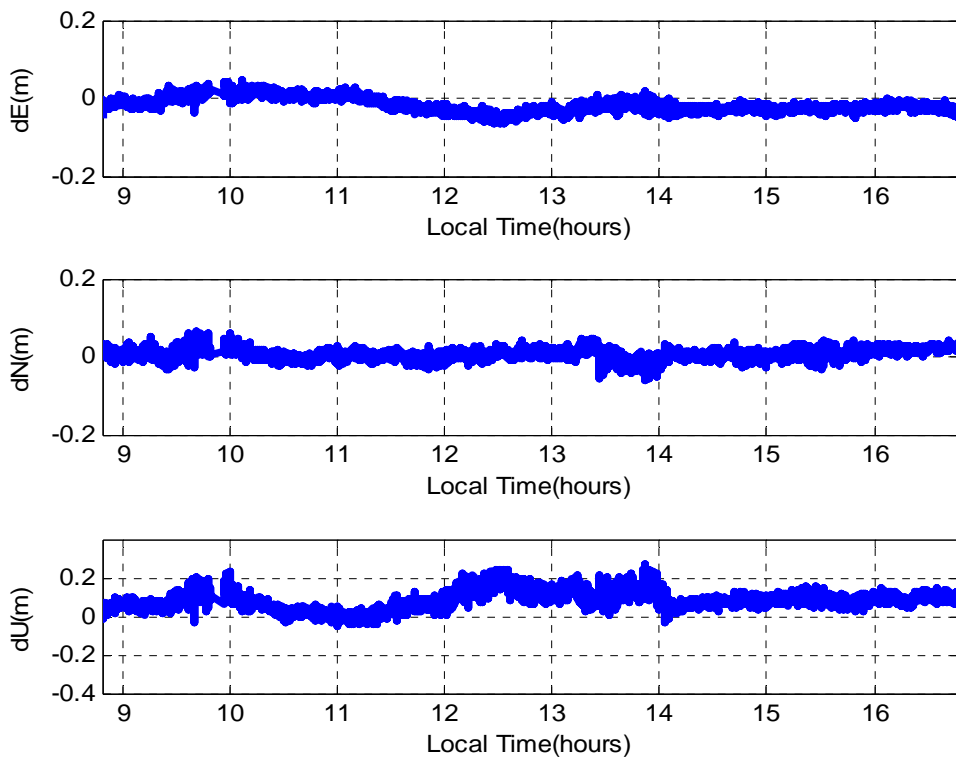


圖 3.27(c) 2009 年 2 月 5 日 PPP 定位誤差(使用 IGS 最終產品)

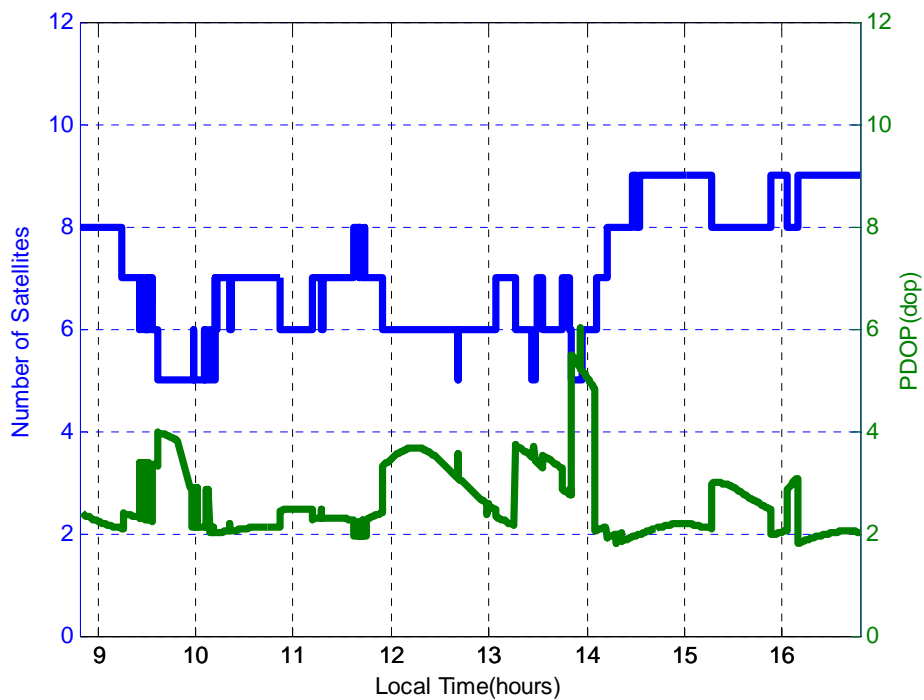


圖 3.27(d) 2009 年 2 月 5 日實驗過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

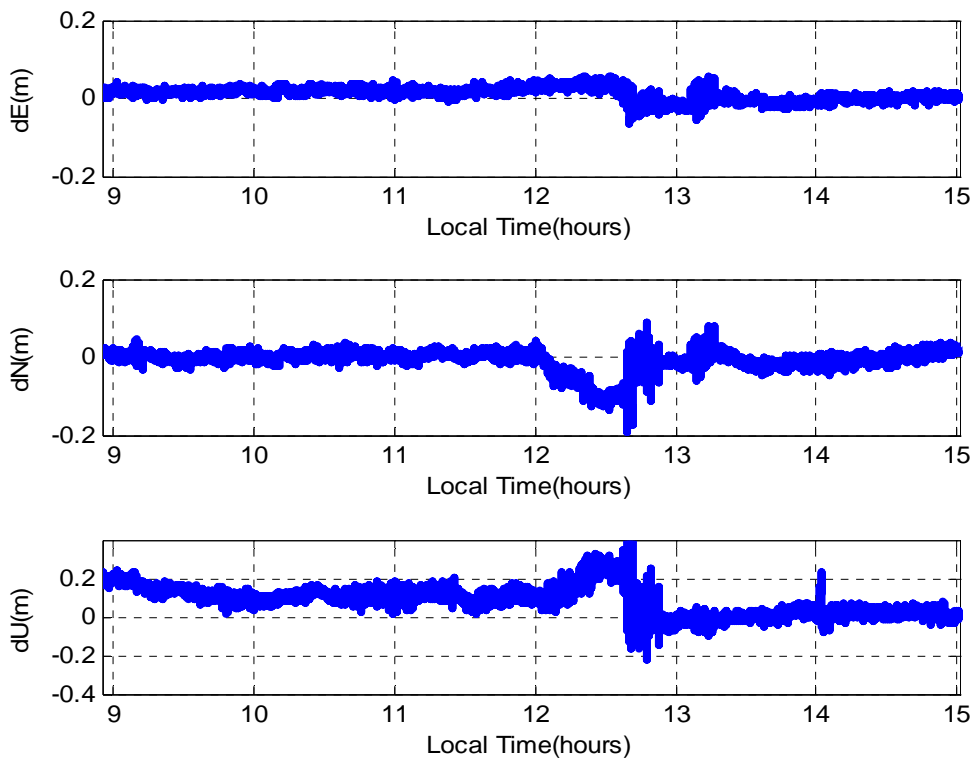


圖 3.27(e) 2009 年 2 月 23 日 PPP 定位誤差(使用 IGS 最終產品)

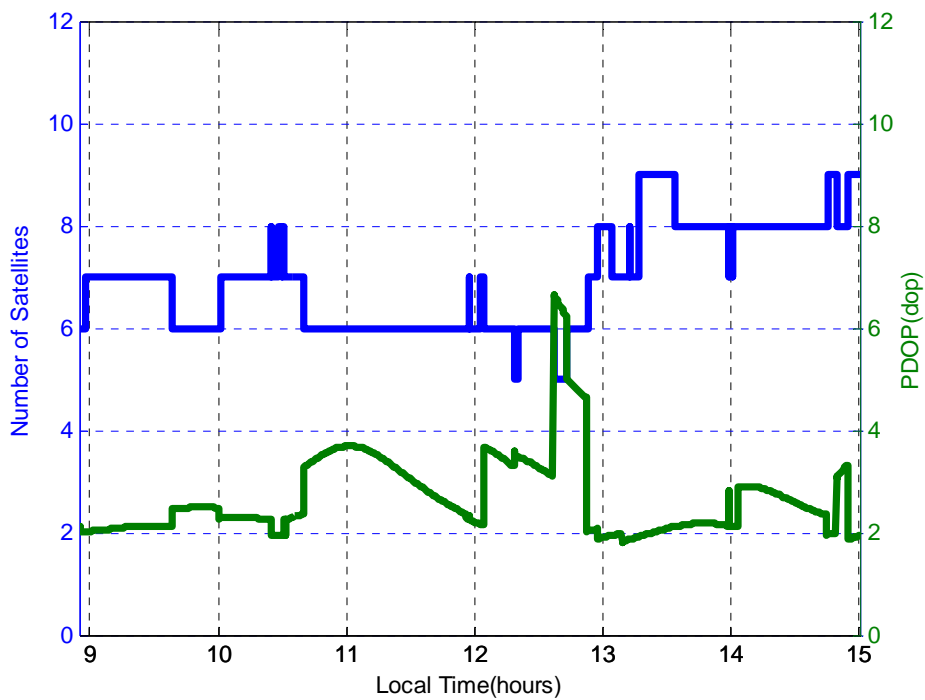


圖 3.27(f) 2009 年 2 月 23 日實驗過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

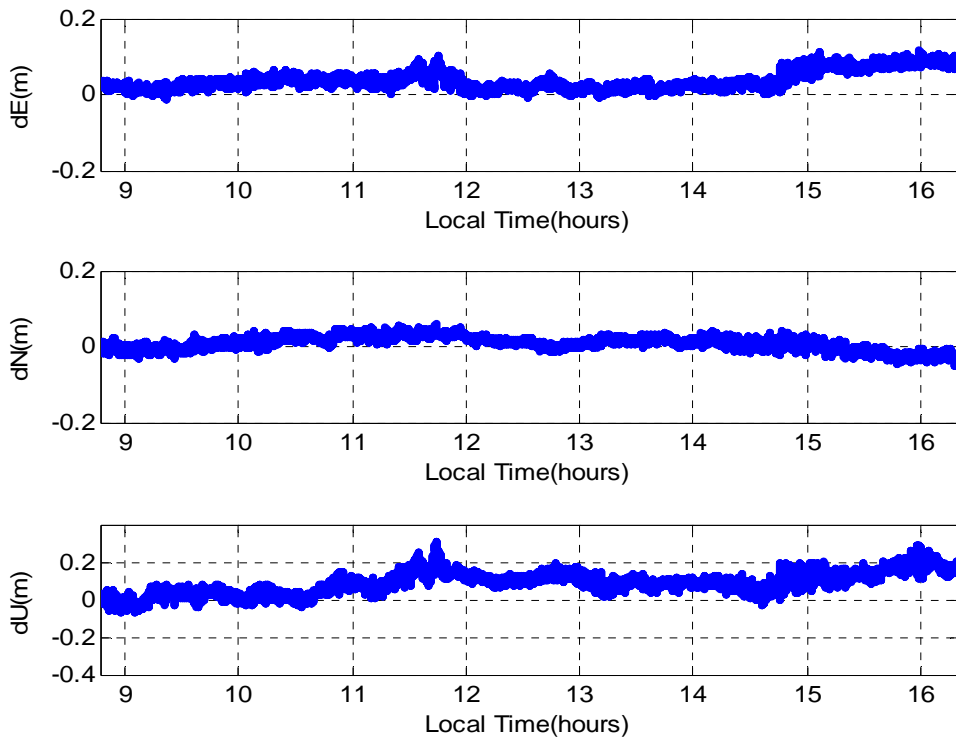


圖 3.27(g) 2009 年 5 月 13 日 PPP 定位誤差(使用 IGS 最終產品)

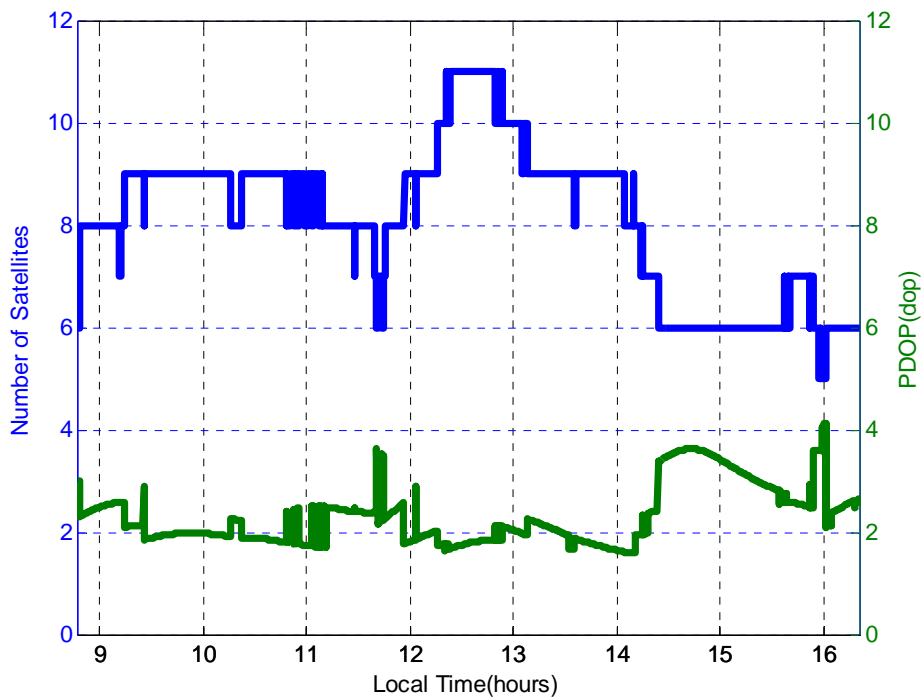


圖 3.27(h) 2009 年 5 月 13 日實驗過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

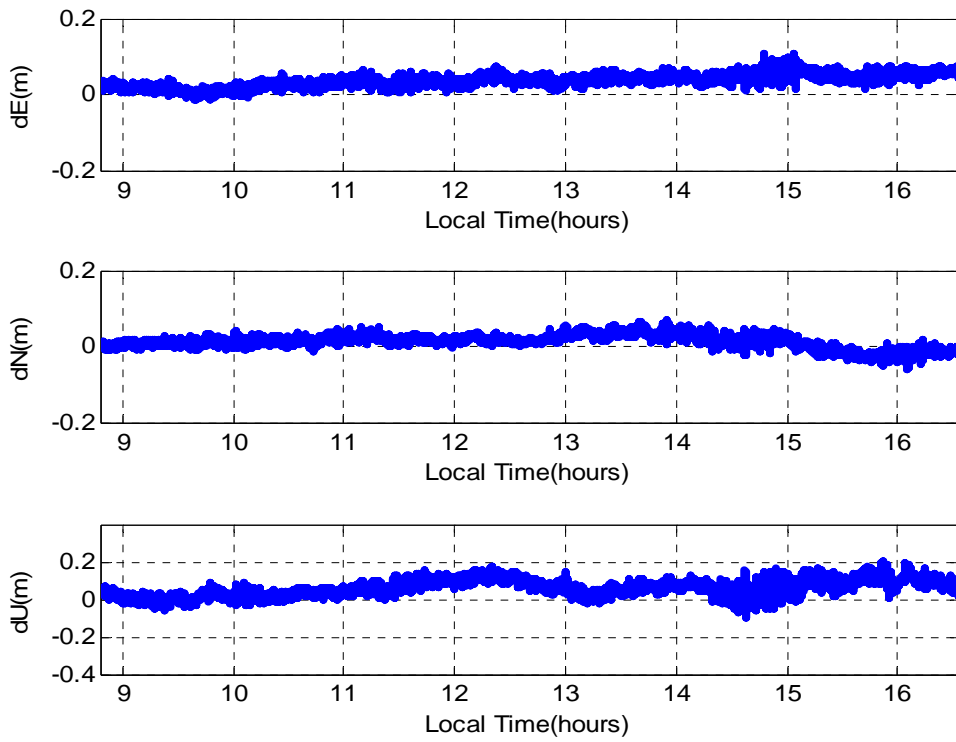


圖 3.27(i) 2009 年 5 月 14 日 PPP 定位誤差(使用 IGS 最終產品)

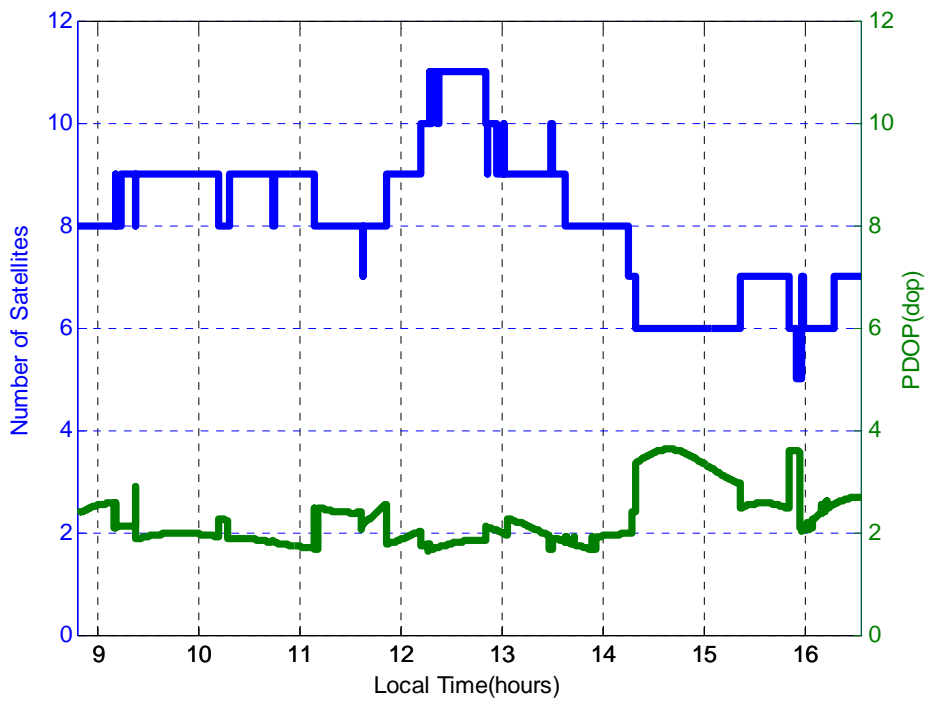


圖 3.27(j) 2009 年 5 月 14 日實驗過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

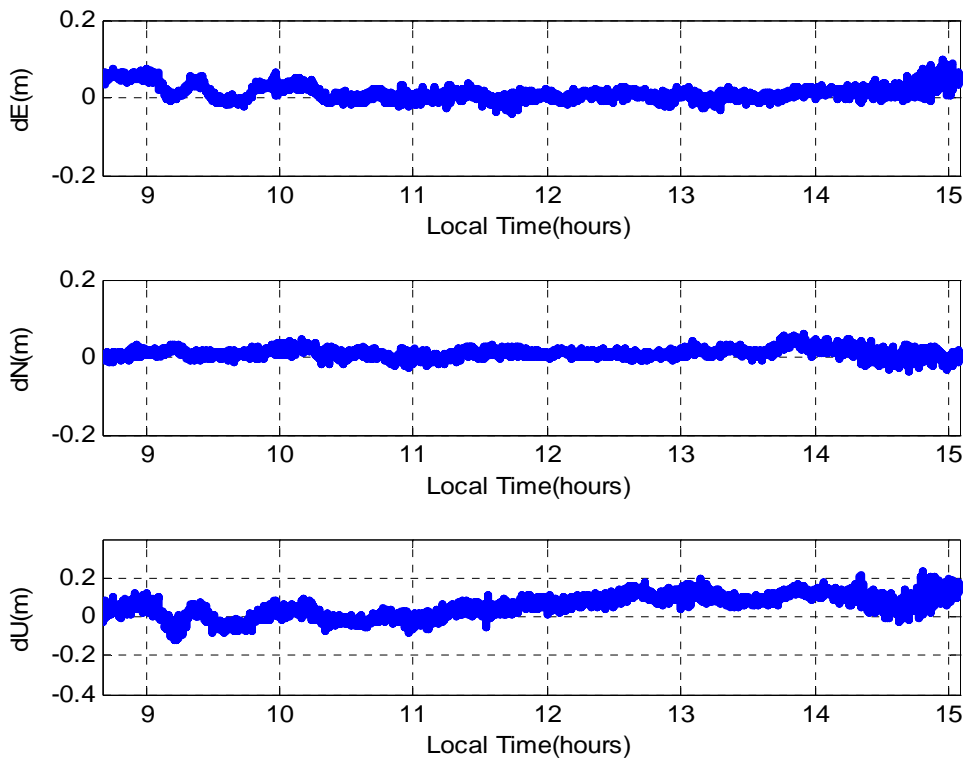


圖 3.27 (k) 2009 年 5 月 15 日 PPP 定位誤差(使用 IGS 最終產品)

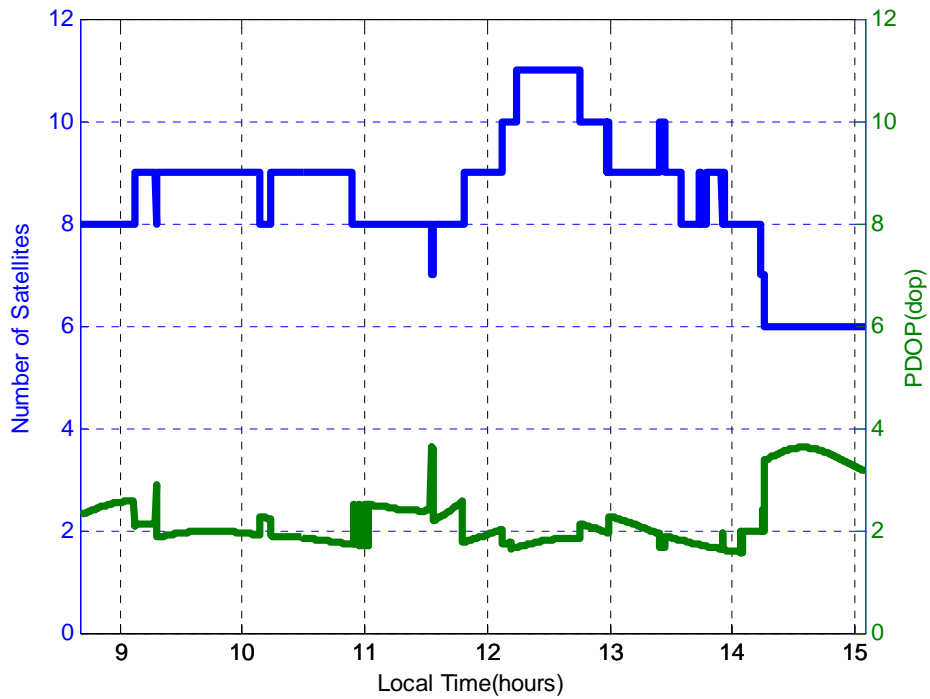


圖 3.27(l) 2009 年 5 月 15 日實驗過程中衛星顆數及 PDOP 值變化

表 3.11 動態精密單點定位精度(使用 IGS 最終產品)(單位:公分)

2009-01-09	E	N	U
Mean	-0.800	-0.200	9.600
RMS	1.500	1.900	11.100
STD	1.300	1.900	5.600
2009-02-05	E	N	U
Mean	-1.800	0.600	8.400
RMS	2.500	1.600	9.700
STD	1.800	1.400	4.800
2009-02-23	E	N	U
Mean	1.100	-0.800	8.400
RMS	2.000	2.900	11.300
STD	1.600	2.800	7.500
2009-05-13	E	N	U
Mean	3.700	0.800	8.800
RMS	4.500	2.000	10.600
STD	2.500	1.800	6.000
2009-05-14	E	N	U
Mean	3.700	1.300	5.900
RMS	4.100	2.200	7.400
STD	1.700	1.800	4.400
2009-05-15	E	N	U
Mean	1.300	1.000	5.500
RMS	2.400	1.600	7.900
STD	2.000	1.200	5.700

§ 3.8 利用 PPP 估計 e-GPS 站絕對天頂對流層總延遲

如前所述，使用 PPP 可以準確的獲得國土測繪中心連續 e-GPS 站之天頂對流層總延遲的絕對量，而不是相對於參考基準站之相對量，這對於本計畫的研究目的是非常重要的。於是計畫中將利用 PPP 方法配合卡曼濾波技術估計出每一個觀測時刻 (observation epoch) 的 e-GPS 站天頂方向對流層總延遲 (ZTD)。

估算過程所需的計算資料除了必須蒐集 e-GPS 站的觀測檔 (*.o) 之外、尚必須包含 IGS 分析處理中心 (或其他單位) 所產生的精密衛星時錶差改正檔 (*.clk) 與精密星曆 (*.sp3) 檔案，以分別獲得精密的衛星時錶差改正量以及衛星的精確 ITRF 星曆。此處之計算流程如圖 3.28 所示。

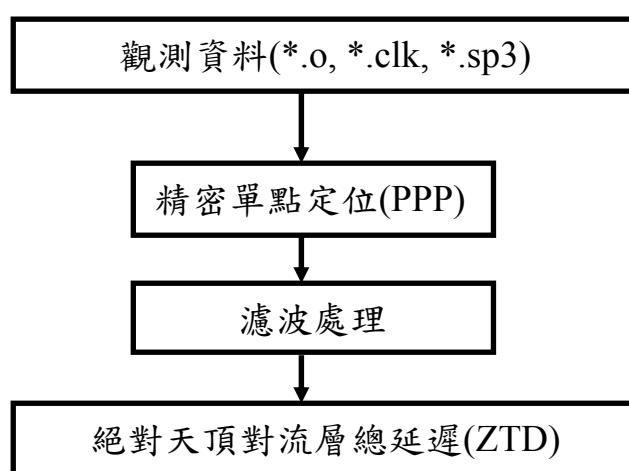


圖 3.28 利用 PPP 估計絕對天頂對流層總延遲流程圖

§ 3.8.1 利用氣象資料計算 e-GPS 站絕對天頂對流層乾延遲

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)嘗試將對流層模式化。

如第二章所敘述，天頂對流層乾延遲量的部份約佔總延遲量 90%，並可以視為跟地表壓力與溫度有關的函數，目前已可使用全球模式精確估計達到公釐等級精度的乾延遲量 (Skone, 2001)。

因此計畫中根據 e-GPS 站之坐標，利用第四章中之經由中央氣象局氣象站氣溫以及氣壓資料推估所獲得的 e-GPS 站氣壓量帶入 Modified Hopfield 對流層模型中計算獲得所需 e-GPS 站之絕對天頂對流層乾延遲。e-GPS 站之絕對天頂對流層乾延遲量 (ZHD) 步驟如圖 3.29 所示。

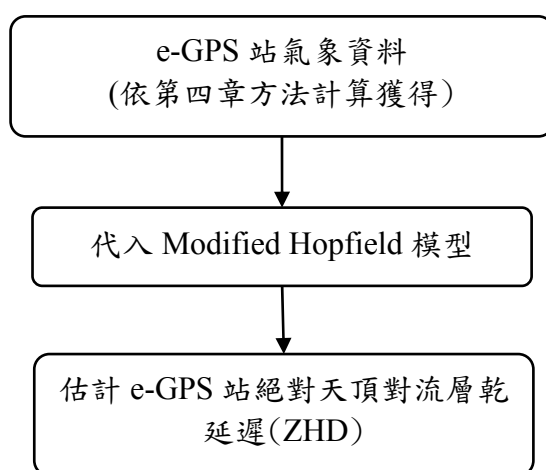


圖 3.29 e-GPS 站絕對天頂對流層乾延遲計算步驟

§ 3.8.2 估計 e-GPS 站絕對天頂對流層濕延遲

如第二章中所敘述，溼延遲部份雖僅佔總延遲量的 10% 左右，但由於濕延遲量係與水汽有關，而水汽會隨著空間與時間變化而快速改變，因此難以將其延遲量精確模式化，其模式估計精度僅約在 10%~20%左右 (Skone, 2001)。

在 GPS 資料處理方面，首先，利用精密單點定位 PPP 方法估計各 e-GPS 站絕對天頂對流層總延遲量 (ZTD)，然後再以台灣地區均勻分佈的氣象資料作為空間推估以及乾延遲模式計算的基礎，依照第四章所敘述的方式，計算得 e-GPS 站的絕對天頂對流層乾延遲量 (ZHD)，之後再根據 (3.57) 式將乾延遲量從總延遲量中扣除，便可獲得 e-GPS 站之絕對天頂對流層濕延遲量 (ZWD)：

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (3.57)$$

其計算流程圖如圖 3.30 所示。

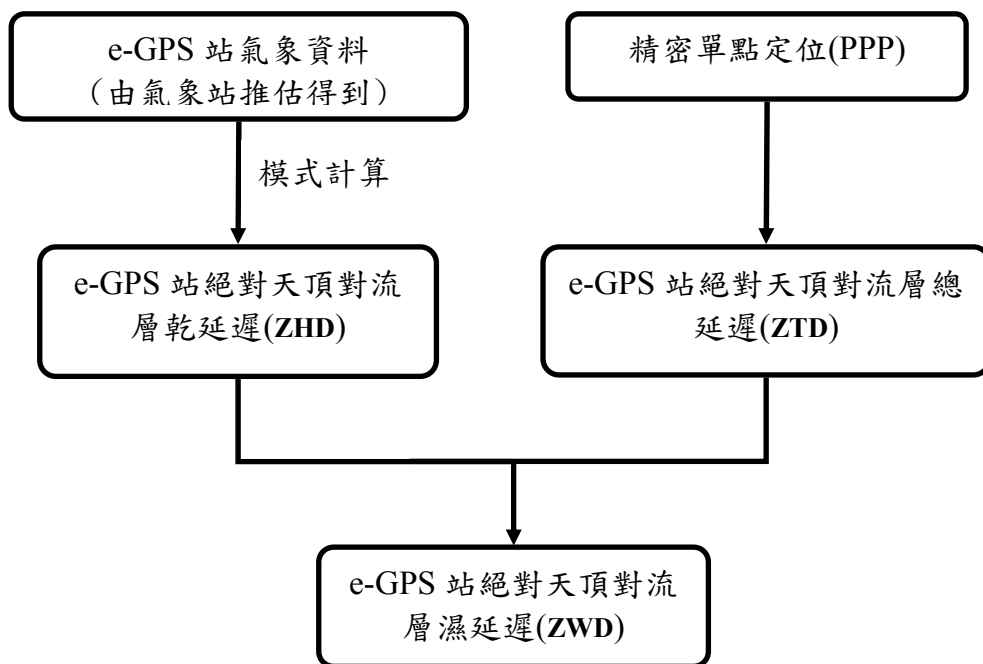


圖 3.30 e-GPS 站天頂對流層濕延遲估計流程圖

第四章 氣象資料、e-GPS 站資料及乾溼延遲量之空間推估

天頂對流層總延遲量 (ZTD) 可以分成天頂對流層乾延遲量 (ZHD) 以及天頂對流層濕延遲量 (ZWD)，其中，ZTD 對於整體對流層誤差的影響非常大，約佔了 90% 的影響量，並與地表壓力與溫度高度相關。因此欲使用對流層模式求得精確之 ZHD，須具有氣象觀測資料，但全台 e-GPS 站中具有氣象觀測設備僅有 15 站，並非所有的 e-GPS 站都有氣象觀測設備。是以，對於無氣象觀測的 e-GPS 站而言，我們必須先設法獲得地表氣象資料，包含氣溫以及氣壓資料，以計算各站之 ZTD。因此採用中央氣象局所設立之地面氣象站所觀測之氣溫與氣壓資料，作為氣象參數來源資料提供計算 ZTD 使用。

由各 e-GPS 站利用 PPP 方法所估計出天頂對流層延遲量減去 ZHD 便可獲得 ZWD，再進行空間推估，便得以獲得全台灣濕延遲量，並與乾延遲量加總求得天頂對流層總延遲量。

§ 4.1 去群集時空趨勢迴歸法

本計畫中天頂延遲之乾濕分量，均可模式化為時間與空間(以下所稱之自變數)之函數(以下指稱之應變函數)。該模式之數學表示法可參考各文獻中之理論說明，在此僅說明其數學表示法之參數率定方式。

為求得空間中應變函數對其相關自變數之模式參數值，可採用空間趨勢迴歸 (spatial trend regression)(Goovaerts, 1997) 方法對該模式之待定參數進行量化。該量化方法則以應變函數之量測值相對於不同參數下之模式值作方差之最小化 (minimization of squared difference)，並以該最小方差下模式所取之參數作為最佳之量化參數。此迴歸方法之概念可表示如下：

$$\min \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2; \quad \hat{y}_i = f(\mathbf{x}_i) \quad (4.1)$$

其中 y_i 為應變函數之量測值， \hat{y}_i 為應變函數之模式值，不同 i 分別代表不同位置之數量，而 \mathbf{x}_i 則為各位置之坐標向量。

本計畫所考慮之自變數除空間因素外，亦加入時間變數之考量，使其模式之參數兼含時空因子之特性，而成為一時空趨勢模式。其迴歸方法可表示如下：

$$\min \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2; \quad \hat{y}_i = f(\mathbf{x}_i, t) \quad (4.2)$$

其中 t 為時間因子，本計畫中以 DOY(day of year) 作為其變數值。

然而考量空間中量測位置之群聚情況可能導致迴歸結果之偏估 (De Smith, 2007)，本計畫將各位置上應變函數與模式值之方差加以權重，再求其權重後方差之最小化，以消解建模時因量測位置之群聚所造成之影響。有鑑於臺灣本島之量測站多設立於平地，此去群集方法在臺灣本島地區之建模尤其重要。若未經去群集處理，則由於方差之總和包含大量平地資料，將致使迴歸之結果偏重於平地量測值與模式值間之方差最小化，以致於所求得之量化模式在山地之趨勢誤差遠大於平地之趨勢誤差。為求得一全臺灣本島之通用模式，則必須使用去群集之時空趨勢迴歸法。該方法之數學式可表示如下：

$$\min \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2; \quad \hat{y}_i = f(\mathbf{x}_i, t) \quad (4.3)$$

其中 w_i 為去群集權重。對測站群集處加以較小之權重，則可降低該處各測站於總方差量之影響，以均化時空模式在各處之趨勢推估效率。

空間去群集權重可大致分為兩類：多邊形法 (polygonal method) 與分格去群集法 (cell declustering)(Goovaerts, 1997; Deutsch and Journel 1997)。其中多邊形法以各測站為中心將研究區域劃分為數個徐昇氏多邊形 (Theissen's polygons)，並以各測站所佔之徐昇氏多邊形面積為權重作為該站之去群集權重，如圖 4.1：

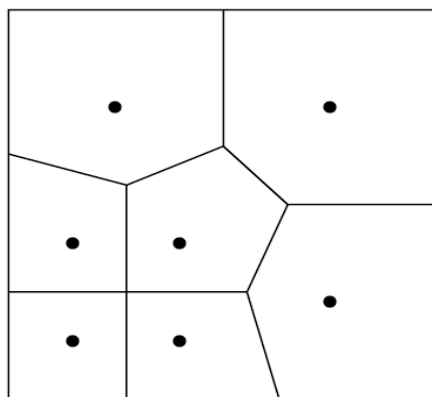


圖 4.1 多邊形法空間去群集權重示意圖

分格去群集法除考慮監測站之幾何相關位置以外，亦考慮各監測站之量測值大小，藉以針對目標變數高低值處之群聚測點做最有效之去群聚處理。該方法不論監測站所在位置，將研究區域均等劃分為正方形網格，取網格內之平均值後再對所有網格之平均值取總平均，如圖 4.2 所示：

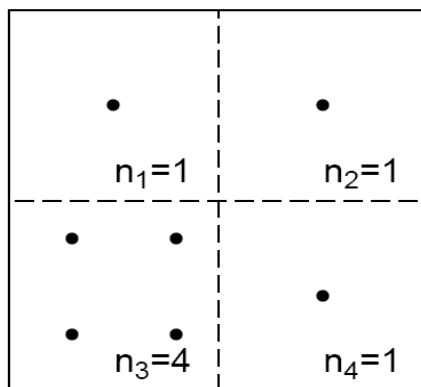


圖 4.2 分格去群集法權重示意圖

由於高低值處之群聚效應，總平均將隨網格大小而有變化。若群聚測點集中於高值，則最小網格分割（各站權重均為 1）與最大網格分割（各站權重均為 $1/n$ ，與各站權重均為 1 之去群聚權重效果相同）均受該高值影響而致使總平均偏高；依網格之大小不同，分別對總平均值具有大小不同之影響，造成不同之去群聚總平均。最佳之網格大小（針對於高值群聚之情況）則為其最小總平均值相對應之網格大小，如圖 4.3 所示：

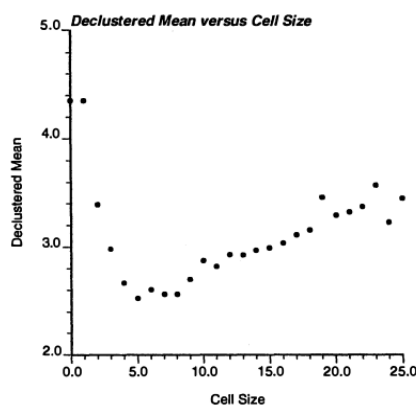


圖 4.3 去群聚最小總平均值相對應之網格大小

本計畫所採用之去群集時空趨勢迴歸法，即考慮空間中測站密度不同之影響，並針對時空趨勢之理論函數所進行之參數迴歸方法。由於本計畫之乾濕延遲量呈現時空上之非線性函數（後述），故所採行之迴歸方法為針對式 4.3 所進行之非線性數值迴歸方法(Matlab Manual)。

§ 4.2 地理統計方法與克利金空間推估

地理統計學 (geostatistics) 最初為南非礦業工程師 Daniel Gerhardus Krige 於 1951 年對於南非礦脈分佈進行研究探查時所發展之空間資料分析技術 (Krige, 1951)。Matheron 根據 Krige 的研究，提出一套有別於傳統統計方法的估算理論來作為地理統計學 (geostatistics) 的基礎。

1963 年，Matheron 出版 *Principles of Geostatistics* (Matheron, 1963)，提出地理統計學的概念，將地理統計學定義為一種隨機函數 (random function) 在推估自然現象的應用，並在 1970 年提出區域化變數理論，探討自然現象在空間上分佈的相關性。為紀念 Krige 的貢獻，Matheron 將地理統計之估計方法稱為克利金法 (kriging)。1970 年代以後，大量地理統計研究與應用書籍相繼出版，地理統計理論自此被廣泛應用於環境工程、生態、水文、氣象、遙測、土壤、人文等，具有空間相依性質，卻不易進行全面調查之空間資料分析。其主要應用方向為 (1) 空間點推估，(2) 隨機變域模擬與條件模擬，(3) 環境污染區域之界定，(4) 監測網站設計與評估。地理統計可根據空間變異隨距離遠近的變化情形，藉由部分觀測值得分析結果估算出完整的空間分佈。由於該方法最初是因應地理學領域(如採礦學、地質學)的需求而發展與應用，所以被稱為地理統計學，而 Matheron 也因此被人稱為地理統計學的奠基者，其生平可以參考 (Agterberg, 2007)。

由上述可知，克利金法的主要內容，在於探討如何在有限的觀察數據下，建立一個在特定範圍內某種自然現象變異程度的推測方法。欲觀察某個區域內的一種自然現象之趨勢或分佈，如海拔高度、空氣密度、降雨、氣溫、濕度、空氣污染物等，直觀的作法是在不同的位置取樣量測此自然現象，藉以對該自然現象在空間中的分佈有初步瞭解，再根據這些取樣所收集到的數據，來預測在這個區域內的一個沒有經過取樣的位置之預測值，如圖 4.4，o 為取樣點、x 為欲預測的位置。

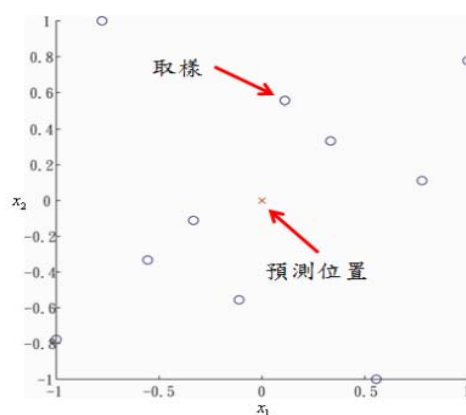


圖 4.4 取樣點與預測位置示意圖

如果由 n 個取樣點所得到的量測值為 $z(x_\alpha)$, $\alpha=1\dots n$, 未取樣位置的函數預測值為 z^* , 克利金法的概念是此預測值是所有量測值的線性組合, 如方程式 4.4, 其中 $\lambda(x_\alpha)$ 為一組線性組合的權重, 而不同的位置會有不同的權重, 因此對於克利金法來說, 只要決定了這組權重即可決定取樣與預測之間的關係。

$$z^* = \sum_{\alpha=1}^n \lambda(x_\alpha) z(x_\alpha) \quad (4.4)$$

以區域化變數理論為基礎之地理統計學, 將任一位置 x_i 的觀測值假設為隨機變數 $Z(x_i)$, 且認為所有位置 x 上之 $Z(x)$ 具有一特定的空間結構, 稱為區域化變數 $Z(x)$ 。如果兩個相距 δ 的隨機函數分別為 $Z(x_i)$ 、 $Z(x_i+\delta)$, 假設 δ 是一個相當小的值, 則區域化變數理論認為如果在 x_i 位置的量值很大, 那麼就可以很合理的認為在 $x_i+\delta$ 位置的量值也會很大, 也就是說一個序率歷程中的兩個不同位置之量值的關係, 會與兩者之間的距離有關。因此, 在經過大量統計數據上的觀察後, 統計學家提出了兩種關於區域化變數的基本假設, 分別是平穩假設 (stationary hypothesis) 與本質假設 (intrinsic hypothesis), 分別如下:

一、平穩假設: 完整的敘述應該是二階平穩假設 (second-order stationary hypothesis), 又稱為廣義性平穩假設 (wide-sense stationary), 當一個隨機函數滿足下列三個條件則稱為滿足平穩假設。

1. 隨機函數在不同位置的期望值不會因為位置的不同而改變:

$$E[Z(x)] = m \quad (4.5)$$

2. 隨機函數在不同位置的變異數不會因為位置的不同而改變:

$$Var[Z(x)] = \sigma^2 \quad (4.6)$$

3. 兩個不同位置的隨機函數，其共變異數只與兩者之間的相對距離有關，與其分別所在位置無關。

$$\text{Cov}[Z(x_i), Z(x_j)] = E\{[(Z(x_i) - m)][Z(x_j) - m]\} = C(h) \quad (4.7)$$

其中 $h = \|x_i - x_j\|$ ， $C(h)$ 為一個與距離有關之函數。

二、本質假設：當隨機函數滿足下列兩個條件即為滿足本質假設。

1. 兩個不同位置的隨機變數，其之間差值的期望值為兩個位置之間距離的函數，與其分別所在位置無關。

$$E[Z(x_i) - Z(x_j)] = m(h) \quad (4.8)$$

2. 兩個不同位置的隨機變數，其之間差值的變異數為兩個位置之間距離的函數，與其分別所在位置無關。

$$\text{Var}[Z(x_i), Z(x_j)] = E\{[(Z(x_i) - Z(x_j))]^2\} = 2\gamma(h) \quad (4.9)$$

其中 $h = \|x_i - x_j\|$ ， $m(h)$ 與 $2\gamma(h)$ 代表兩個與距離有關之函數。

地理統計發展最初的主要目的是在一個區域內，以少數樣本資料，依據資料的空間變異結構，估算出資料之完整空間分佈。主要概念是利用變異圖 (variogram) 描述資料的空間相關性，並經由變異圖所示之空間結構模式對未採樣位置作最佳線性無偏估計 (best linear unbiased estimation, BLUE)。克利金法的最佳線性無偏估計主要有兩個目標，分別是整體期望值無偏 (unbiased) 與最小均方誤差 (minimum mean squared error)。第一個目標是令克利金法具有無偏差的性質，其方法是令推估點 x_0 上的真實量值 $Z(x_0)$ 與 (4.4) 式所表示之推估量兩者期望值相等，即可得方程式 4.10 作為無偏差拘束條件，即當線性組合的權重滿足此方程式時，克利金法即可具有無偏差性質的預測值。

$$\begin{aligned}
E[Z(x)] &= E\left[\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} Z(x_{\alpha})\right] = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} m = m \\
\Rightarrow \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} &= 1
\end{aligned} \tag{4.10}$$

第二個目標是要最小化均方誤差。將觀測點上之量值 $Z(x_{\alpha})$, $\alpha=1\dots n$ 表示為一變數向量 $\mathbf{Z}(\mathbf{x})=[Z(x_1), \dots, Z(x_n)]^T$, 各權重 λ_{α} , $\alpha=1\dots n$ 表示為 $\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x})=[\lambda(x_1), \dots, \lambda(x_n)]^T$, 則克利金推估量與真實量值之間的均方誤差為

$$\begin{aligned}
E\{[Z(x_0) - Z^*]^2\} &= E\{[Z(x_0) - \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x})^T \mathbf{Z}(\mathbf{x})]^2\} \\
&= \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x})^T \mathbf{K} \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x}) + \sigma^2 - 2\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x})^T \mathbf{k}
\end{aligned} \tag{4.11}$$

其中 \mathbf{K} 與 \mathbf{k} 分別為觀測點間之共變異數以及觀測點與推估點間之共變異數：

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} C(\|x_1 - x_1\|) & \cdots & C(\|x_1 - x_n\|) \\ \vdots & & \vdots \\ C(\|x_n - x_1\|) & \cdots & C(\|x_n - x_n\|) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{k} = \begin{bmatrix} C(x_1 - x_0) \\ \vdots \\ C(x_n - x_0) \end{bmatrix}$$

方程式 4.11 即克利金法的推估變異數一般式。此一般式代表著克利金法與實際函數的方均誤差，因此我們要在無偏差拘束條件下，令其方均誤差最小化，便可以將此問題寫成一般最佳化形式，如方程式 4.12。

$$\begin{aligned}
\min \quad & \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x})^T \mathbf{K} \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x}) + \sigma^2 - 2\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x})^T \mathbf{k} \\
s.t. \quad & \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x})^T \mathbf{1} = 1
\end{aligned} \tag{4.12}$$

其中 $\mathbf{1}^T=[1, \dots, 1]$ 為單一數值向量。方程式 4.12 的最佳化問題可用式 4.13 所表示之拉格朗日方程式 (Largrange Function) 來求解，其中 v 為拉格朗日因子 (Largrange Multipliers)(Largrange, 1760)。

$$L_\nu = [\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x})^T \mathbf{K} \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x}) + \sigma^2 - 2\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x})^T \mathbf{k}] - \nu[\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x})^T \mathbf{1} - 1] \quad (4.13)$$

將拉格朗日方程式對 λ_α 微分，令其為 0 以求侷限條件下之最小值，可得

$$\mathbf{K} \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x}) - \mathbf{k} - \nu \mathbf{1} = 0 \quad (4.14)$$

方程式 4.10 與方程式 4.14 之聯立解為 λ_α 與 ν ，將其寫成矩陣形式，如方程式 4.15。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{1} \\ \mathbf{1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x}) \\ -\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{k} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

可解得 λ_α ，從而求得克利金推估值 Z^* 。克利金法的推估變異數即為方程式 4.11，藉由式 4.14 的關係式亦可寫成如式 4.16 的簡易計算公式。

$$E\{[Z(x_0) - Z^*]^2\} = \sigma^2 - \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x})^T \mathbf{k} \quad (4.16)$$

以上導證的結果，稱為一般克利金法 (ordinary Kriging, 簡稱為 OK)。一般克利金法是目前工程領域最常使用的克利金法，本文內容也將以該方法為主。然而以上方程式的推導，都是假設函數的共變異數方程式 (4.7) 為已知的情況下所得到的結果。不同的共變異數方程式將會產生不同的克利金結果，因此決定此共變異數方程式是一件重要的事。一般將這個過程稱為模式套配 (model fitting)。

變異圖是一種統計上的量測工具，用來量測一個隨機函數的空間相關程度，其詳細內容可參考 (Kitanidis, 1997; Chiles and Delfiner, 1999)，其數學定義與本質假設的第二個方程式 (4.9) 相同，重述如下：

$$\text{Var}[Z(x_i), Z(x_j)] = E\{[(Z(x_i) - Z(x_j))]^2\} = 2\gamma(h)$$

其中 $2\gamma(h)$ 即為變異圖，而稱 $\gamma(h)$ 為半變異圖(semivariogram)。一般來說為求簡便，多數學者亦稱 $\gamma(h)$ 為變異圖。半變異圖與共變異數間的函數關係，在平穩假設下可寫為 4.17 式：

$$C(h) = \sigma^2 - \gamma(h) \quad (4.17)$$

之所以推導變異圖與共變異數之間的關係，其最大用意是一個隨機歷程的共變異數，由於準確的母體平均值無法直接由取樣得知，固須經由取樣所得到的變異圖計算結果觀察其趨勢。

由於實際量測的數據皆為定率資料，故須將變異圖方程式(4.9)改寫成方程式 4.18，以求得母體期望值在樣本上所表現的相對應量值，稱之為經驗變異圖(empirical variogram)。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_x [z(x) - z(x+h)]^2 \quad (4.18)$$

其中 $N(h)$ 代表取樣之間距離為 h 的樣本個數，由經驗變異圖方程式的內容來說明，即為在所有的樣本中，符合樣本之間的距離為 h 的樣本，將其量測值兩兩相減平方總和之後，再除以距離為 h 的樣本總數。可參考圖 4.5，藍色 x 為樣本，距離 h_1 與 h_2 為不同距離的樣本，所以必須分開計算，而滿足距離為 h_1 的樣本有 $N(h_1)$ 個，滿足距離為 h_2 的樣本有 $N(h_2)$ 個，以此類推。

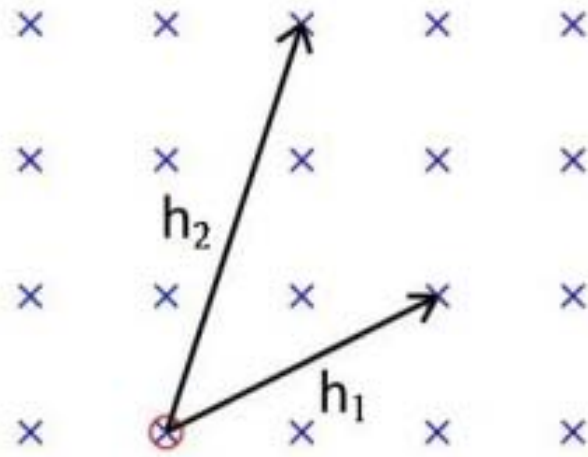


圖 4.5 經驗變異圖之距離與取樣位置示意圖

依照經驗變異圖方程式 (4.18) 計算後可以得到如圖 4.6 之關係圖，稱之為變異雲圖(variogram cloud)。

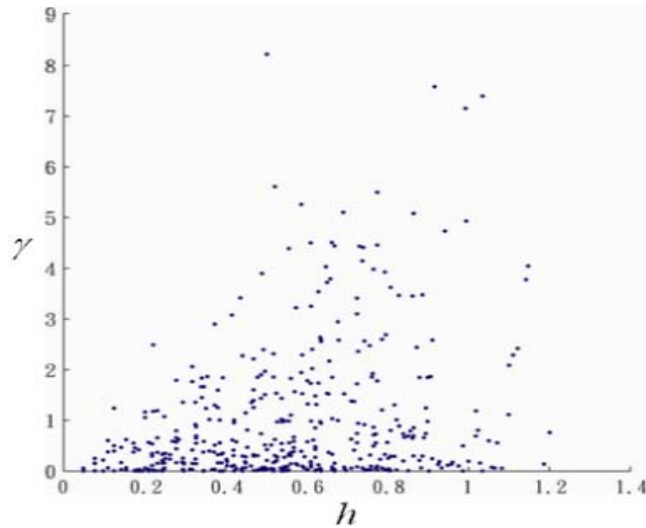


圖 4.6 變異雲圖之一例

然而此變異雲圖資料過於分散，仍然無法看出變異圖的趨勢，因此我們使用實驗變異圖 (experimental variogram)，其概念是將經驗變異圖方程式的距離 h ，改為滿足一個區間範圍內的樣本，如圖 4.7：

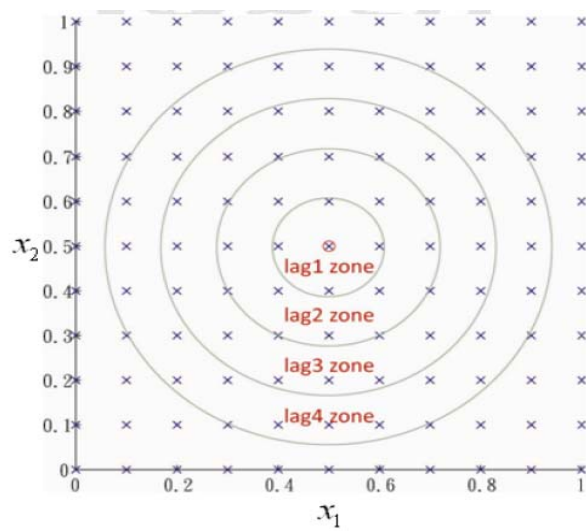


圖 4.7 距離區域範圍示意圖

將其量測值兩兩相減平方總和之後，再除以滿足區間範圍內的樣本總數，然後將此點實驗變異圖資訊的距離定為此區間的一半，也可以定為區間內所有樣本的平均距離，將此範例之實驗變異圖繪製成圖，如圖 4.8。

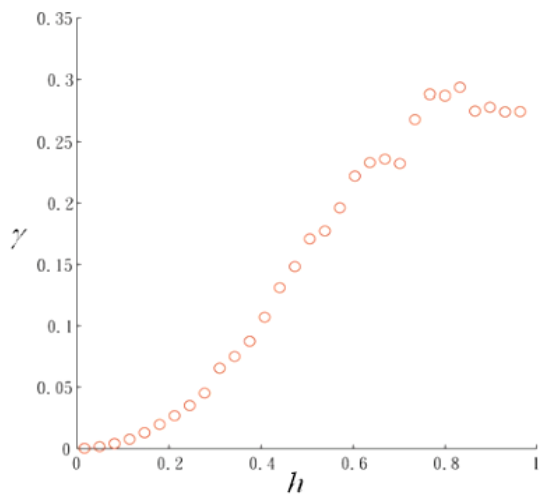


圖 4.8 實驗變異圖之一例

當空間中兩點相對距離越大時，相互關係性則越小，造成半變異數越大。然而和平穩假設下，半變異數函數 $\gamma(h)$ 隨相對距離 h 的增

加卻將漸趨緩。在統計上的意義是此隨機函數在超過某一個距離之後，其不同位置的相關性會變得很小，也可以說是不相關 (uncorrelated)，而非平穩則是無論隨機函數的距離為多少皆為相關。大部分的自然現象應屬於平穩狀態，然而會出現非平穩的情形也並不代表此自然現象為非平穩，很有可能是在取樣的空間範圍內所收集到的資訊為非平穩。

在一個平穩假設下的變異圖中，當變異圖趨近一臨界穩定狀態，一般將其圖形高度稱之為尾檻值 (sill)，而到達這穩定狀態的距離稱之為實驗變異圖的影響範圍 (influence range) 或是相關距離 (correlation length)。此外，在極短距離量測 $z(x)$ 時可能因為人為儀器誤差或定位點的精確度，使得半變異數在極小距離內無法顯示變化情形，實際應用上，稱為碎塊效應 (nugget effect)。變異圖之各主要參數如圖 4.9 所示。

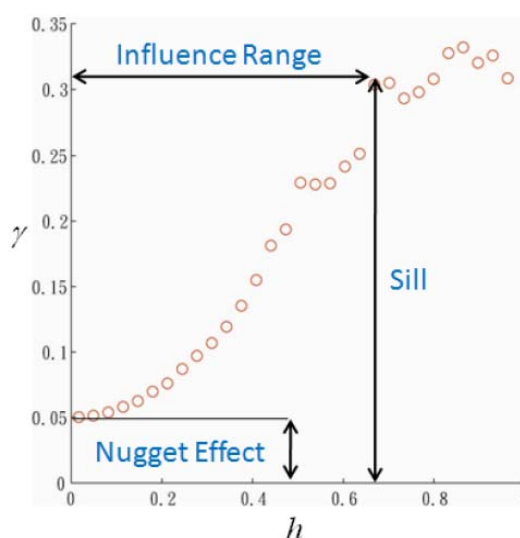


圖 4.9 平穩型實驗變異圖參數名詞示意圖

至此，我們大致上已經知道究竟如何利用變異圖來瞭解一個隨機函數在空間中不同位置的相關性，然而由實驗變異圖所得到的資訊是離散的，但是我們必須對克利金法上的任何位置皆有定義其相關性，

因此需要制定一些數學式來取代這些由實驗變異圖所得到的資訊，而我們稱這些數學式為理論變異圖 (theoretical variogram)，以下將列出三種常用的理論變異圖：

一、球形模式(spherical model)

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left[1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & h \leq a \\ C, & h > a \end{cases}$$

二、指數模式(exponential model)

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp\left(\frac{-3h}{a}\right) \right]$$

三、高斯模式(Gaussian model)

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp\left(\frac{-3h^2}{a^2}\right) \right]$$

其中 a 代表影響範圍。若以 C_0 為碎塊效應，則該式中的 C 加上 C_0 即為理論模式的尾坎值。這些參數均為克利金法中需要進行套配的參數。

在地理統計領域中，因為希望能保留使用者對於克利金法調整的彈性，因此對於變異圖的套配並沒有一個絕對標準的作法，一般來說都是將實驗變異圖繪製圖形後，觀察變異圖的行為與趨勢，並結合此自然現象的特性來設定理論變異圖的參數，以達到建立一個更適合此自然現象的推估模型的目的，如圖 4.10。

本小節只將變異圖概念與內容做一個簡單的介紹，事實上在使用變異圖進行套配時，還可以考慮其他統計上的性質，如等向性 (isotropic)、非等向性 (anisotropic)、週期性 (cyclic) 等，欲瞭解有關於更多變異圖的概念，可參考 (Chiles and Delfiner, 1999)。

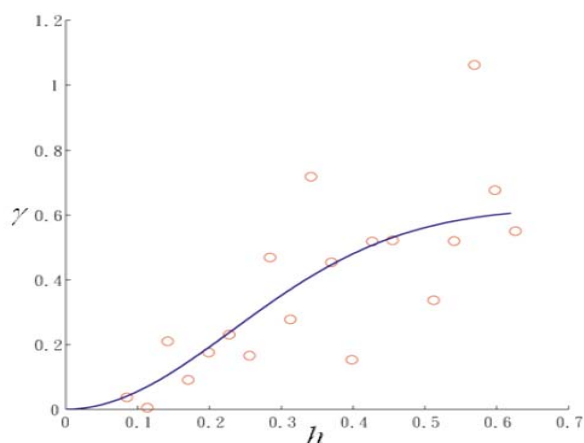


圖 4.10 實驗變異圖與理論變異圖之套配示意圖

§ 4.3 氣象資料處理與推估 e-GPS 站絕對對流層乾延遲

天頂對流層乾延遲量可藉由地面氣象站氣壓、氣溫觀測值輸入經驗模式進行計算，本計畫中地面氣象觀測資料亦包含氣壓以及氣溫，資料來源皆為中央氣象局觀測資料，下載自大氣資料庫(DBAR)，主要提供空間推估計算各 e-GPS 站氣象資料，進而求得 e-GPS 站之 ZHD。

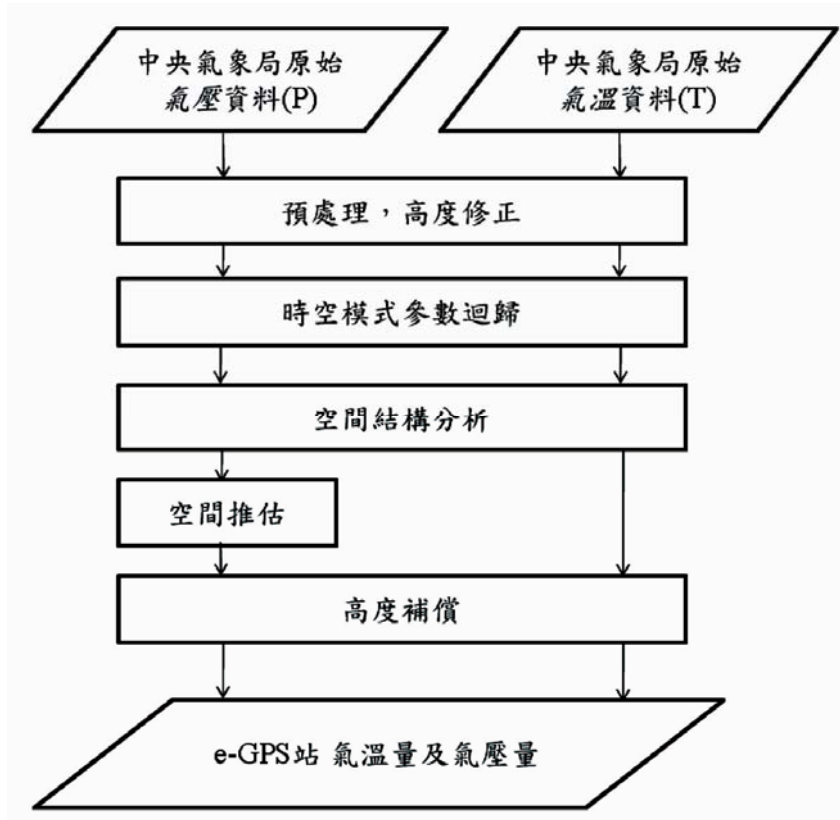


圖 4.11 中央氣象局氣象資料處理分析流程

中央氣象局原始氣象資料分析流程如下：

- Step 1.** 預處理，高度修正：預處理主要包含計算氣象資料每日平均，然而由於中央氣象局氣象站與 e-GPS 站所在高度不同，因此進行氣象資料分析前必須將中央氣象局氣象資料轉換至大地水準面。
- Step 2.** 時空模式參數迴歸：主要迴歸方法如§4.1 去群集時空趨勢迴歸法所述。分別針對中央氣象局氣象站大地水準面上氣溫量以及氣壓量之時空模式進行參數迴歸。使用此時空模式即可計算台灣本島地區 2009 年大地水準面上任一 e-GPS 站在大地水準面上任一時間與位置之氣壓及氣溫模式量，模式詳述於 § 4.3.2 中。

Step 3. 空間結構分析、空間推估：中央氣象局氣象站大地水準面氣溫量以及氣壓量分別扣除前一步驟模式量後即為殘差量，針對此殘差量進行空間結構分析。若殘差量於空間中的分佈符合理論模式則進行模式套配 (model fitting)，並利用克利金法進行空間推估，計算各 e-GPS 站在大地水準面上之殘差量。

Step 4. 高度補償：由於各 e-GPS 站所在高度不同，因此將大地水準面上氣溫量以及氣壓量進行高度補償，轉換至各測站正高。

§ 4.3.1 氣象資料預處理、高度修正及高度補償

中央氣象局氣象資料觀測頻率為每小時一筆，預處理即為計算各氣象站每日氣壓以及氣溫平均。為避免受到極端值影響，例如颱風侵襲時氣壓較平日低，DOY 218 至 DOY 221 因為受到莫拉克颱風的影響，此期間氣象資料皆不採用。由於各氣象站以及各 e-GPS 站所在高程均不同，因此在進行資料分析前必須將所有氣象觀測資料因高程變化進行修正，本計畫中將資料由測站高程轉換至大地水準面。高度修正步驟除了將氣象觀測資料因地形效應所造成的影響移除，亦使得氣象量於同一參考面上進行空間結構分析以及空間推估。可分為以下 3 個步驟進行，如圖 4.12：

Step 1：高度修正

第一步將對氣象站氣壓及氣溫觀測資料 (Station Level, SL) 經由式 4.19 及式 4.20 進行高度修正，以推算氣象站在大地水準面上相對應氣象量。氣壓資料轉換至大地水準面上公式，按 Laplace 方程式之簡式不計濕度及重力之變化影響如式 4.19，即得 (劉明揚，2001)：

高度訂正值 C 為

$$C = P_0 - P_{SL} = P_{SL}(10^m - 1)$$

則 大地水準面氣壓量為

$$P_0 = P_{SL} + P_{SL}(10^m - 1) \quad (4.19)$$

$$m = \frac{H}{18400(1+t/273)} = \log_{10} \frac{P_0}{P_{SL}}$$

其中

H：測站正高 (m)

P_0 ：大地水準面氣壓量(hPa)

P_{SL} ：測站大氣壓力 ($^{\circ}C$)

大地水準面上氣溫量計算則如式 4.20

$$T_0 = T_{SL} + 0.0065 \cdot H \quad (4.20)$$

其中

H：測站正高(km)

T_0 ：大地水準面氣溫量(hPa)

T_{SL} ：測站氣溫($^{\circ}C$)

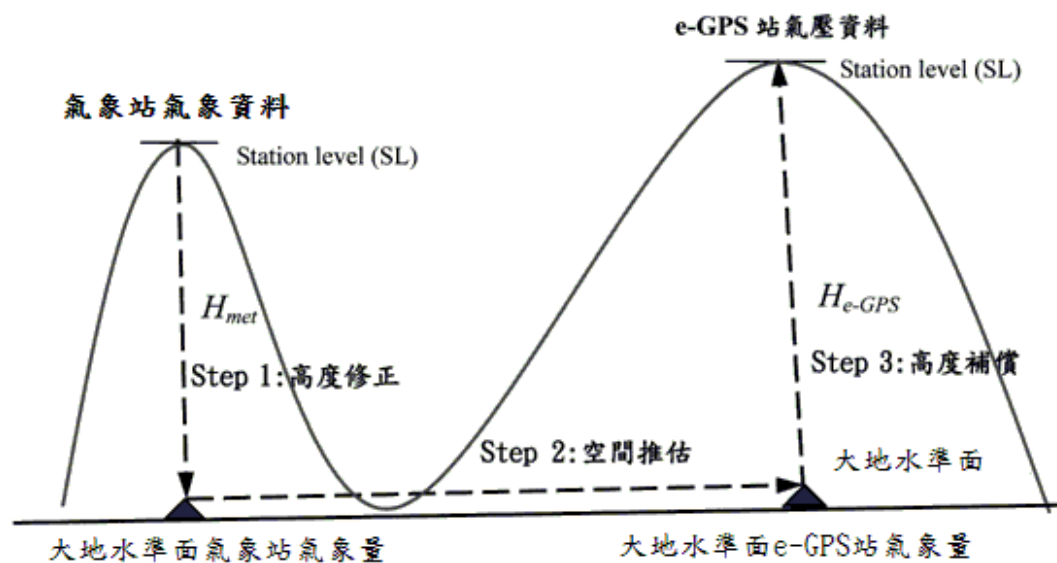


圖 4.12 將氣象站氣壓觀測資料轉換至 e-GPS 站之示意圖

Step 2：空間推估

由於氣象站位置與 e-GPS 站位置不同，因此須將 Step 1 中得到的大地水準面或平均海水面上的氣象量，採用一般克利金法，利用 GSLIB (Geostatistical Software LIBrary) 中之程式推估至 e-GPS 站。

Step 3：高度補償

獲得 e-GPS 站在大地水準面或平均海水面上投影點的氣壓量之後，可利用式 4.19 及 4.20 進行高度補償以轉換回到 e-GPS 站的高度，便可得到 e-GPS 站的氣象資料。

§ 4.3.2 大地水準面上氣象量之時空模式

大地水準面上氣象量模式值可表示成與氣象量年平均、週期（餘弦）函數之振幅、相位以及時間有關，如式 4.21 (Niell, 1996)

$$\xi = \xi_{avg} - \xi_{amp} \cdot \cos\left(2\pi\left(\frac{DOY - 28}{365.25}\right)\right) \quad (4.21)$$

其中

ξ ：代表大地水準面上氣向量模式值，為大地水準面上氣溫量或氣壓量

ξ_{avg} ：大地水準面上氣象量年平均

ξ_{amp} ：大地水準面上氣象量週期函數之振幅

DOY：時間變數，Day Of Year

台灣本島地區大地水準面上氣象量時空模式中自變數除了考慮時間因素外，亦加入空間變異之考量。由於大地水準面上氣溫量不僅隨時間而改變亦隨著空間而有所變化，因此大地水準面上氣溫量模式除了時間因素外也包含緯度因素，使其模式之參數兼含時空因子之特性。大地水準面上氣溫量模式值可表示成式 4.22。

$$T_0 = (a_1 \cdot \varphi + a_2) - (a_3 \cdot \varphi + a_4) \cdot \cos\left(2\pi \left(\frac{DOY - 28}{365.25}\right)\right) \quad (4.22)$$

其中

T_0 ：大地水準面上氣溫量模式值

a ：經驗係數，經由迴歸後得

$a_1 = -0.8295, a_2 = 44.4101, a_3 = 0.7618, a_4 = -12.4038$

φ ：緯度(度)

DOY：時間變數，Day of year

式 4.22 中， T_0 為大地水準面上氣溫量模式值， a_i 係數即為台灣本島地區大地水準面上氣溫量模式之經驗係數，是使用大地水準面上中央氣象局地面氣象站氣溫資料以及 § 4.1 中去群集時空趨勢迴歸法求得。等號右邊第一項代表模式中大地水準面上氣溫量年平均，並假設其年平均與緯度變化成線性相關，其中 a_1, a_2 為線性函數係數。週期函數之振幅假設其與緯度呈線性關係，也可視為氣溫量之季節變化， a_3, a_4 為線性函數之係數。而週期函數之相位角則與時間變數相關，以 DOY (Day of year) 表示。

本計畫中大地水準面上除了氣溫量之外，亦處理分析氣壓量，然而氣壓量在空間上與緯度並無特定的相關性，因此大地水準面上氣壓量模式僅考慮其年平均、與時間相關週期函數之振幅以及相位。時空模式表示如式 4.23：

$$P_0 = b_1 - b_2 \cdot \cos\left(2\pi \left(\frac{DOY - 28}{365.25}\right)\right) \quad (4.23)$$

其中

P_0 ：大地水準面上氣壓量模式值

b_i ：經驗係數，經由迴歸後得 $b_1 = 1015.9$ (hPa), $b_2 = -6.5621$ (hPa)

DOY：時間變數

分析 2009 年大地水準面上氣壓殘差量實驗半變異圖，其殘差量在空間中的分佈特性仍然符合理論模式，如圖 4.14，而符合此實驗半變異圖之最佳的理論模式則是球型模式。為了後續藉由 e-GPS 站氣象參數推估值準確地計算 ZHD 及 ZWD，必須針對大地水準面上氣壓殘差量進行 e-GPS 站位置之空間推估。殘差量推估值加上氣壓模式值 (式4.23) 即為大地水準面上各 e-GPS 站位置之氣壓量推估值，可表示如式 4.24。

$$P_0 = 1015.9 + 6.5621 \cdot \cos\left(2\pi\left(\frac{DOY - 28}{365.25}\right)\right) + \hat{\delta} \quad (4.24)$$

其中

P_0 ：大地水準面上氣壓量模式值

DOY：時間變數，Day of year

$\hat{\delta}$ ：由空間推估獲得之氣壓殘差量

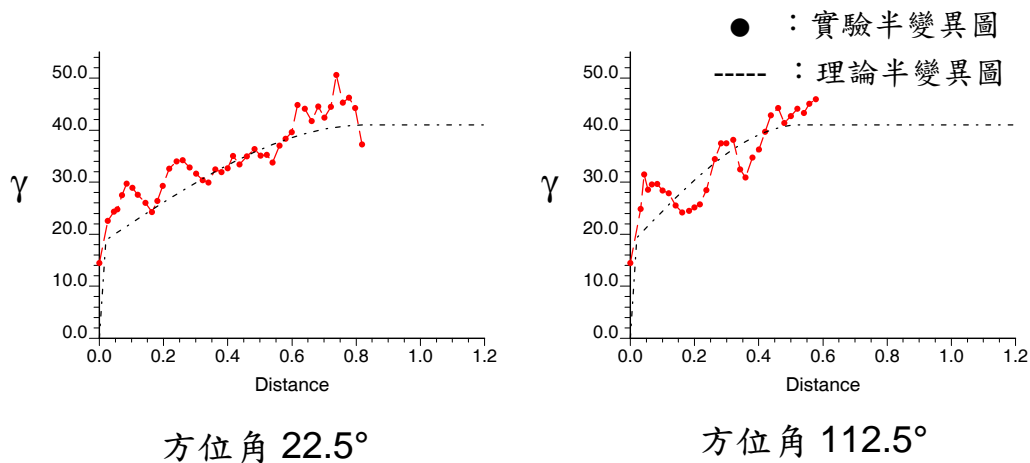


圖4.14 2009年大地水準面氣壓殘差量實驗半變異圖及理論半變異圖

§ 4.4 推估 e-GPS 站絕對對流層濕延遲

由各 e-GPS 站利用 PPP 方法所估計出絕對 ZTD 扣除利用空間推估方法獲得之乾延遲 ZHD 後即可獲得各站之濕延遲 ZWD。由

Modified Hopfield 對流層模式中可知 ZWD 與水汽分壓有關，因此建立台灣區域性對流層延遲修正模式時，各 e-GPS 站上之絕對 ZWD 自然是建立濕延遲量修正模式的必要資料。

§ 4.4.1 e-GPS 站濕延遲量與水汽分壓

由於各測站絕對 ZWD 隨水汽分壓變化而改變，因此必須建立台灣地區大地水準面上水汽分壓之時空模式。利用式 4.22 及式 4.24 獲得大地水準面上之氣溫及氣壓模式值藉由 Modified Hopfield 模式計算各 e-GPS 測站 ZHD 估值，並且將各 e-GPS 站觀測之絕對 ZWD 轉換成為各站之水汽分壓，轉換流程如圖 4.15。

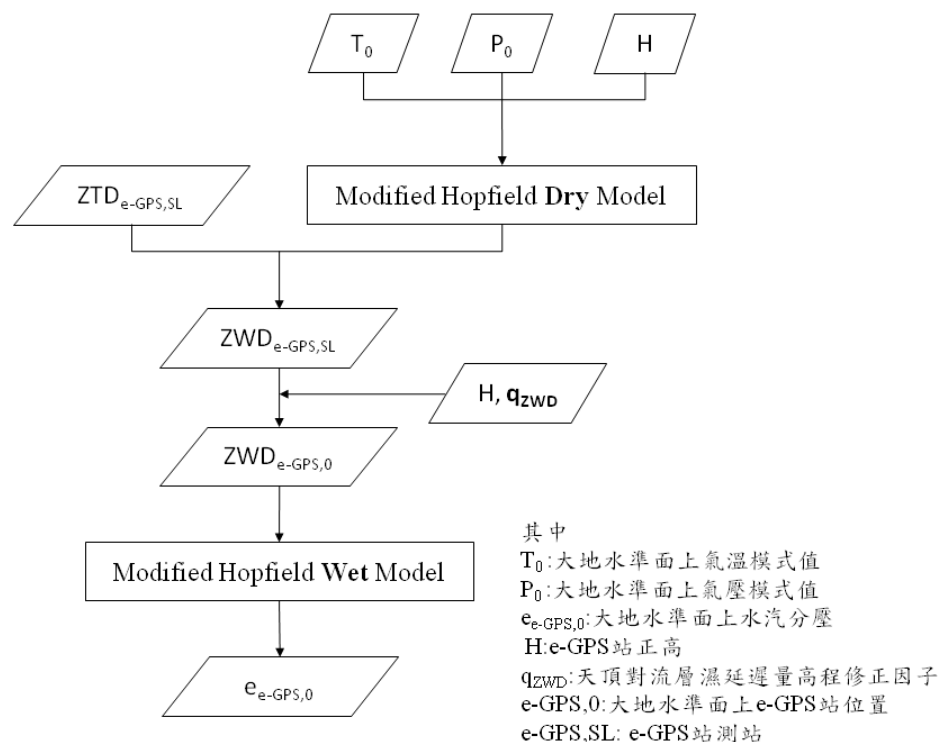


圖 4.15 天頂對流層濕延遲量轉換為水汽分壓流程圖

天頂對流層濕延遲量由 e-GPS 測站透過 q_{ZWD} 值轉換至大地水準面上，可表示如式 4.25(Schüler, 2001)：

$$ZWD_{e-GPS,0} = \frac{ZWD_{e-GPS,SL}}{\exp\left(-\frac{H-H_0}{q_{ZWD}}\right)} \quad (4.25)$$

其中

q_{ZWD} : 天頂對流層濕延遲量高度修正因子, 經由迴歸後得 $q_{ZWD}=3.1547$

$ZWD_{e-GPS,0}$: e-GPS 站位置大地水準面上 ZWD

$ZWD_{e-GPS,SL}$: e-GPS 站之 ZWD

H: 測站正高

H_0 : 參考面正高, 在此參考面為大地水準面

除了 14 個具有氣象設備的 e-GPS 站被使用來作為檢核點以外, 本計畫利用了台灣本島所有 e-GPS 站的天頂對流層濕延遲量來求取適用於台灣地區的 q_{ZWD} 值, 並且同時進行水汽分壓時空模式之係數迴歸。

§ 4.4.2 大地水準面上水汽分壓之時空模式

大地水準面上水汽分壓時空模式與氣溫量、氣壓量相同, 皆可表示為週期函數。如式 4.26:

$$e_0 = c_1 - c_2 \cdot \cos\left(2\pi\left(\frac{DOY-28}{365.28}\right)\right) \quad (4.26)$$

其中

c_i : 大地水準面上水汽分壓模式之係數, 經由迴歸後得 $c_1=28.7013(\text{hPa})$,

$c_2=10.5448(\text{hPa})$

e_0 : 大地水準面上水汽分壓模式值

如 § 4.1 所述, 採用去群集時空趨勢迴歸法進行水汽分壓模式建立。欲對 e-GPS 站上水汽分壓時空模式同時進行自變數與應變數參數迴歸, 可表示如式 4.27:

$$err(x, H, DOY) = c_1 - c_2 \cdot \cos\left(2\pi\left(\frac{DOY - 28}{365.25}\right)\right) - \frac{\frac{ZWD_{e-GPS,SL}}{\exp\left(-\frac{H - H_0}{q_{ZWD}}\right)}}{2.2 \times 10^{-3} \times \left(\frac{-12.96}{T_0} + \frac{371800}{T_0^2}\right)} \quad (4.27)$$

其中

x：表式不同之 e-GPS 站

q_{ZWD} ：天頂對流層濕延遲量高度修正因子，經由迴歸後得 $q_{ZWD}=3.1547$

$ZWD_{e-GPS,SL}$ ：e-GPS 站位置 ZWD

H：e-GPS 站正高

H_0 ：參考面正高，在此參考面為大地水準面

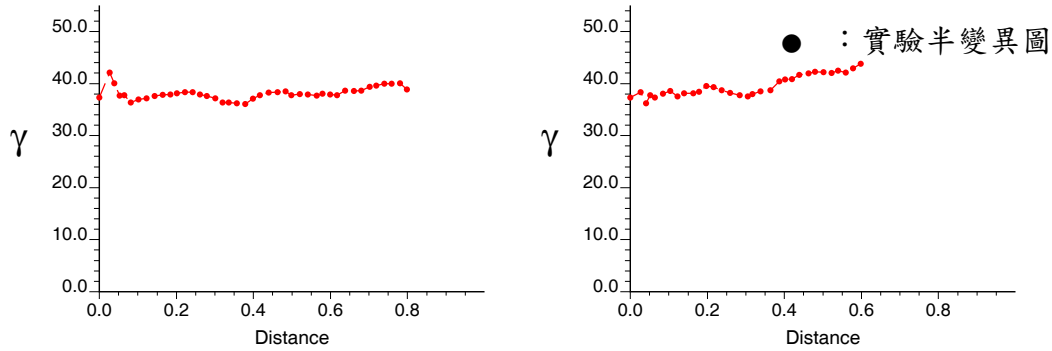
T_0 ：大地水準面上氣溫模式值，由式 4.20 計算

c_i ：大地水準面上水汽分壓模式之係數，經由迴歸後得 $c_1=28.7013$,
 $c_2=10.5448$

將 $err(x, H, DOY)$ 之去聚集加權方差最小化，即可求得參數 c_1 , c_2 及 q_{ZWD} 。 c_i 係數及是利用大地水準面上水汽分壓資料並配合 § 4.1 中去群集時空趨勢迴歸法以及非線性迴歸求得，即為台灣本島地區大地水準面上水汽分壓量模式之經驗係數。 c_1 代表大地水準面上水汽分壓量年平均值， c_2 代表週期函數之振幅，可視為其季節變化。 c_1 及 c_2 項代表大地水準面上水汽分壓量時空模式，如式 4.27，而第三項則代表利用 GPS 資料獲得之大地水準面上水汽分壓。 q_{ZWD} 於迴歸時同時求得，故此迴歸方法除求得大地水準面上水汽分壓模式參數外，亦同時對高度修正模式進行最佳參數之迴歸。

§ 4.4.3 水汽分壓空間結構分析、空間推估

由 PPP 技術所估計之 ZWD 減去模式值即為水汽分壓在大地水準面上殘差量。而此殘差量在空間中的結構分析若符合理論模式，則必須進一步計算 e-GPS 位置之水汽分壓殘差量。



方位角 22.5°

方位角 112.5°

圖 4.16 2009 年大地水準面水汽分壓殘差量實驗半變異圖及理論半變異圖

對於大地水準面上水汽分壓殘差量，針對方位角 22.5° 及 112.5° 分別計算實驗半變異圖 (experimental variogram)，提供模式套配 (model fitting) 找出可代表水汽分壓殘差量之最佳模式。

2009 年大地水準面上水汽分壓殘差量經由實驗半變異圖分析後，如圖 4.16 所示，其殘差之半變異量在各相對距離下大致均等，可視為不具有空間結構，因此，不需考慮水汽分壓殘差量之空間分佈以及大地水準面上 e-GPS 站位置的推估。式 4.26 即可表示任一位置以及時間位於台灣本島地區大地水準面上之水汽分壓模式值。

§ 4.5 建立台灣區域性對流層延遲修正模式

一般有兩種方法可表達一個區域性修正模式：網格法與參數法。當採用網格法時，對應於每個不同位置 (φ, λ) 網格點的數值同時也必須是時間 (t) 的函數。然而一旦網格點的密度與數目增加，這會是參數儲存量需求較大的表達方式，雖然對於特殊科學研究用途仍然是適合的，但對於一般 GPS 衛星定位工程應用而言是不方便的。

另一種可表達區域性修正模式的方式是參數法，也就是以預選的公式型態搭配一組預先解算出的經驗參數 (empirical parameters) 來計算對流層修正量的大小。常見的參數型態有球諧係數 (spherical harmonics)、多項式係數 (polynomial coefficients)、週期函數的振幅 (amplitudes)、頻率 (frequencies) 與相位角 (phase angles) 等等。其中，本計畫採用週期 (餘弦) 函數，做為區域性對流層修正模式之參數型態。

國土測繪中心目前所使用的 e-GPS 系統作業軟體為美國 Trimble 公司發展的 GPSNet 軟體，此軟體所使用的對流層模式為 Modified Hopfield 模型配合 Niell 映射函數。因此，為了使本計畫所發展的區域性修正模式能夠自然具備與 GPSNet 軟體的相容性，以期未來 Trimble 公司能夠輕易且順利地將台灣的區域性模式加入 e-GPS 系統軟體中，本計畫所產生之區域性對流層模式即是採用目前全球通用之 Modified Hopfield 模型型態，如 §2.3.3 所述。

Modified Hopfield 模式的輸入參數為氣象參數，包含氣溫、氣壓與相對濕度 (或水汽分壓) 量測值。在絕大多數的狀況下，GPS 測站處的氣象參數值是未知的，因此一般在使用 Modified Hopfield 模式時，是採用大地水準面上的內建標準 (default) 大氣參數值 (20°C, 1013mb, 50%) 先行推估測站高度 (H) 處的氣象參數，進而使用 Modified Hopfield 的計算公式推算測站之天頂對流層延遲量。

為了直接採用 Modified Hopfield 模型型態，作為台灣區域性對流層延遲模式之用，我們分為以下 3 個步驟進行 (參考圖 4.17、4.18)：

Step 1. 根據觀測日期 (DOY) 以及測站的近似緯度 (ϕ)，區域性模式會自動計算大地水準面上的溫度、壓力、水汽分壓參數值 (t_0, P_0, e_0)。

Step 2. 將前步驟所獲得的 (t_0, P_0, e_0) ，根據測站的高度 (H) ，使用 Modified Hopfield 內建模式估算測站處的氣象參數。

Step 3. 將估算出的氣象參數帶入 Modified Hopfield 的標準計算公式，推算測站之天頂對流層延遲量。

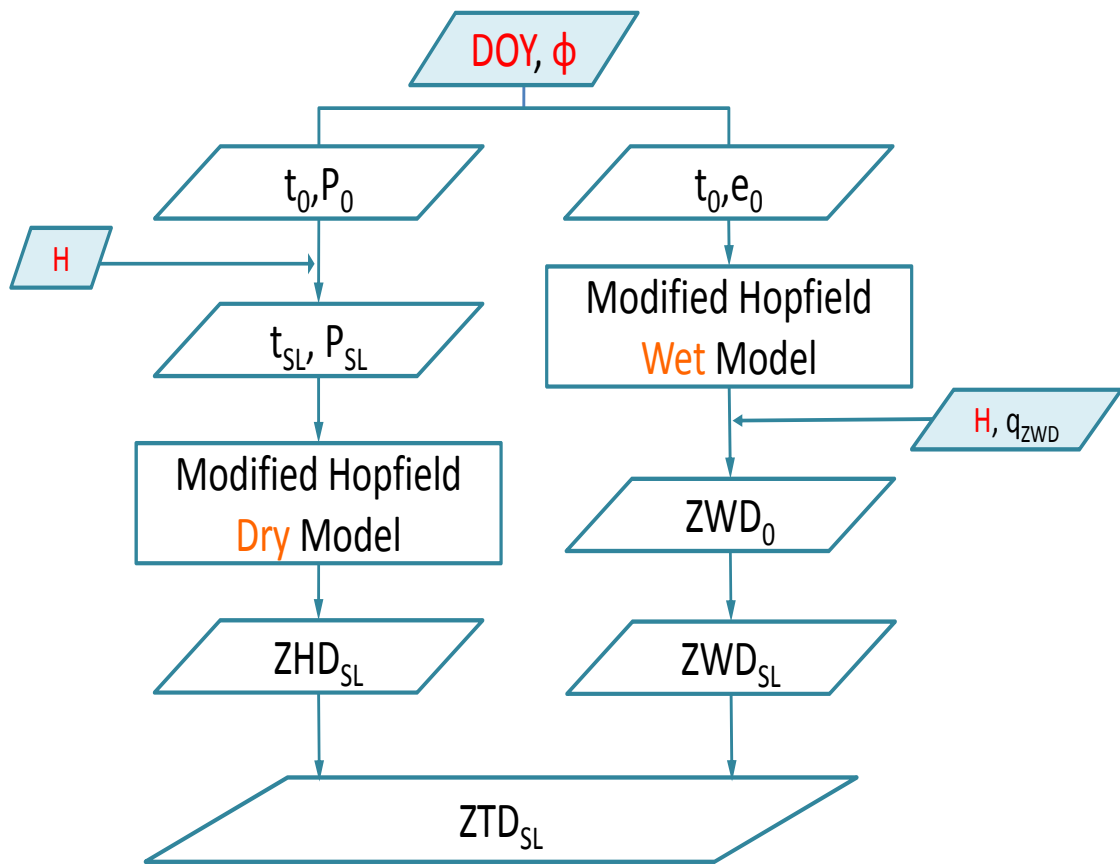


圖 4.17 台灣區域性對流層延遲修正模式計算流程圖

<p>A. 台灣本島區域大地水準面上氣象模式</p> $T_0 = (a_1 \cdot \varphi + a_2) - (a_3 \cdot \varphi + a_4) \cdot f(DOY)$ $P_0 = b_1 - b_2 \cdot f(DOY)$ $e_0 = c_1 - c_2 \cdot f(DOY)$ $f(DOY) = \cos\left(2\pi \left(\frac{DOY - 28}{365.25}\right)\right)$	<p>B. 氣象模式及ZWD₀轉換至測站高程</p> $T_{SL} = T_0 - 0.0065 \cdot H$ $P_{SL} = P_0 \cdot 10^{\frac{-H}{18400 \cdot (1 + T_{SL}/273)}}$ $ZWD_{SL} = \exp\left(\frac{-H}{q_{ZWD}}\right) \cdot ZWD_0$
<p>C. 迴歸參數表列</p> $a_1 = -0.8295, a_2 = 44.4101, a_3 = 0.7618, a_4 = -12.4038$ $b_1 = 1015.9, b_2 = -6.5621$ $c_1 = 28.7013, c_2 = 10.5448$ $q_{ZWD} = 3.1547$	

圖 4.18 台灣區域性對流層延遲模式中修正 Modified Hopfield 模式之相關參數

台灣區域性對流層延遲模式所需要的輸入參數，相較於傳統的 Modified Hopfield 模式所需的輸入參數，除了測站近似坐標外，僅多出了觀測日期 (DOY)，但同時 DOY 正是 Niell 映射函數所額外需要的參數。因此本計畫所建立的區域性對流層延遲模式具備與 GPSNet 軟體的高度相容性。

由於 GPSNet 程式亦是使用 Modified Hopfield 模式，因此可以將台灣區域對流層模式所使用之前端子程式 (在 MatLab 環境中開發) 提供給 Trimble 公司，以加入 GPSNet 程式中。由於技術操作上並不困難，只要 Trimble 公司願意，即可順利納入。

第五章 成果與精度分析

本計畫中使用精密單點定位 (PPP) 方法估計 e-GPS 站之天頂對流層延遲量以及利用中央氣象局氣象資料提供空間推估作為計算天頂對流層乾延遲量來源資料，因此分別針對天頂對流層延遲量以及天頂乾延遲量進行成果初步精度分析，以利後續對流層模式之建立。

e-GPS 站所估計之天頂對流層濕延遲量與 WVR 進行比較，國內所使用的水氣輻射儀 WVP-1500 型是一種被動式水氣微波輻射儀，由美國 Radiometrics Corporation 公司所開發，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，量測大氣中的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。水氣輻射儀平均十幾到二十秒可觀測一顆 GPS 衛星訊號通過大氣層所造成的延遲量，再利用映射函數轉成天頂溼延遲 (ZWD) 觀測資料記錄之，約 5-6 分鐘為一週期循環對全部衛星完成追蹤觀測活動；其中溫度 (TT)、溼度 (HH)、壓力 (PPP) 是利用地面大氣感測器量測而得。地面大氣感測器包括環境大氣溫度、相對溼度、大氣氣壓及降雨感測器；而環境大氣溫度、相對溼度是使用 Rotronic S3 感測器，大氣氣壓感測器則為 Vaisala PT B 100A 型。

§ 5.1 e-GPS 站與 WVR 天頂對流層濕延遲量比較

陽明山站 (YMSM) 與北港站 (PKGM) 在 2006 年皆有水氣輻射儀觀測值 (Water Vapor Radiometer, WVR) (劉說安, 2006)。由於水氣輻射儀資料與 GPS 觀測資料因其來源不同，因此可視為獨立觀測

量。利用精密單點定位估計上述兩站之天頂對流層濕延遲量並且與 WVR 觀測資料進行比較，成果分別如圖 5.1、圖 5.2 所示。所使用之資料為 2006 年連續六天 (DOY 85-90) 之連續 GPS 資料，每 30 秒估計天頂對流層濕延遲量與 WVR 天頂對流層濕延遲量進行比較。

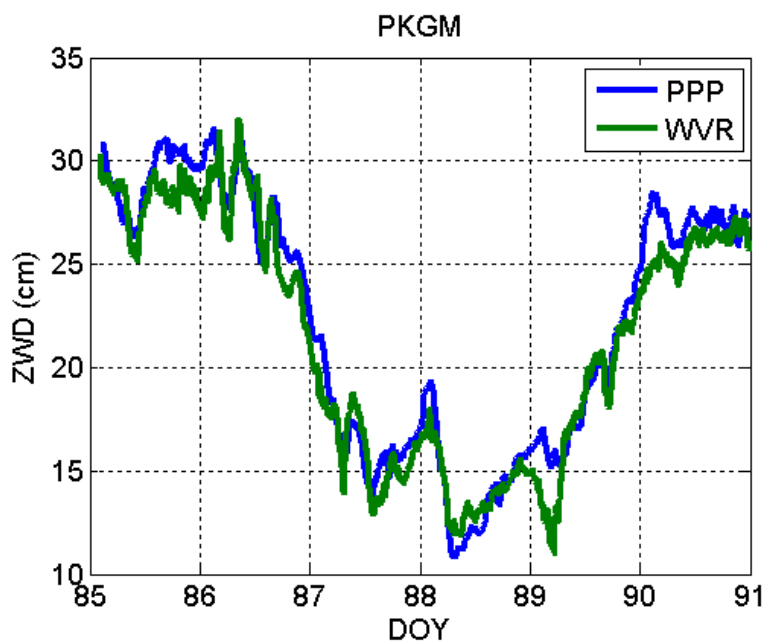


圖 5.1 北港站 2006 年每 30 秒估計天頂對流層濕延遲量比較圖

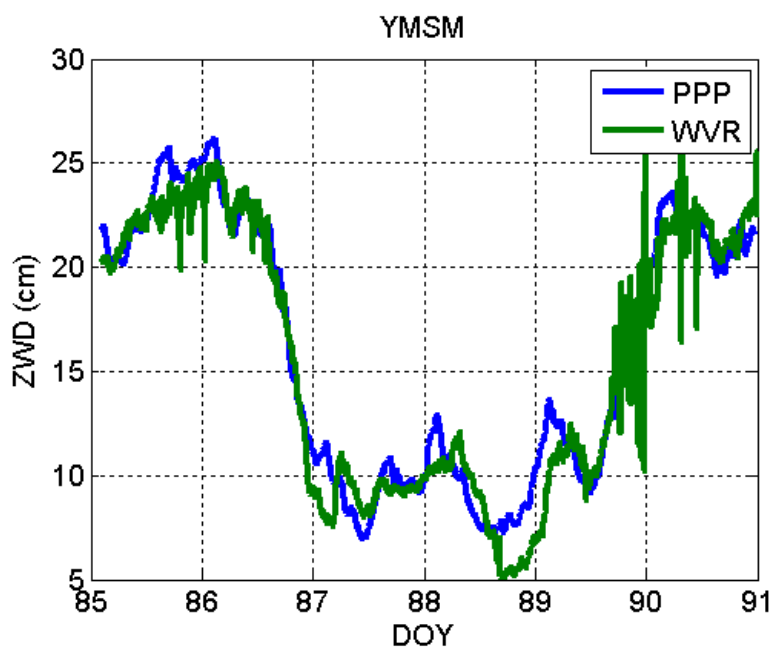


圖 5.2 陽明山站 2006 年每 30 秒估計天頂對流層濕延遲量比較圖

為比較上述 e-GPS 站之 ZWD 與 WVR 觀測值之差異，將每筆 e-GPS 站之 ZWD 估值減去相對應之 WVR 觀測量，可得到成果如圖 5.3、圖 5.4。計算差異量 RMS 可得表 5.1 中成果，北港站所估計之 ZWD 與 WVR 相比，平均差異為 0.75cm，RMS 為 1.41cm；陽明山站所估計之 ZWD 與 WVR 相比，平均差異為 0.45cm，RMS 為 1.51cm。此成果說明，利用精密單點定位方法可以準確地估計天頂對流層濕延遲量。

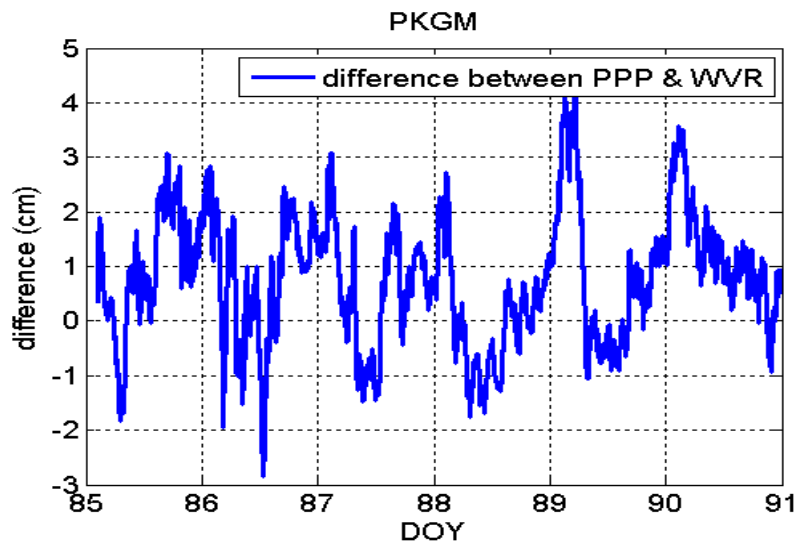


圖 5.3 北港站 (PKGM) 2006 年天頂對流層濕延遲量精密單點定位與水氣輻射儀差異量

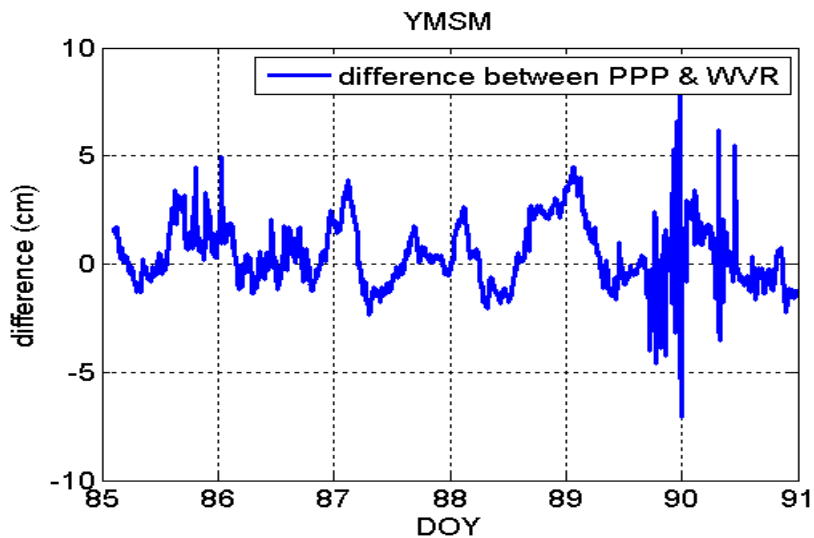


圖 5.4 陽明山站(YMSM) 2006 年天頂對流層濕延遲量精密單點定位與水氣輻射儀差異量

表 5.1 陽明山站與北港站天頂對流層濕延遲量與 WVR 之差異

	MEAN (cm)	STD (cm)	RMS (±cm)
北港站(PKGM)	0.75	1.19	1.41
陽明山站(YMSM)	0.45	1.44	1.51

§ 5.2 e-GPS 站每日觀測資料處理

本計畫目前已 PPP 技術完成 2009 年 e-GPS 站絕對 ZTD 估計，每站以日為單位進行每日連續資料計算，各月份所處理之 e-GPS 站資料站數如圖 5.5，各站計算之每日平均天頂對流層延遲量可參考附錄。

由於本計畫案需分析一年之 e-GPS 站觀測資料，因此採用 2009 年一整年之資料進行模式建立。

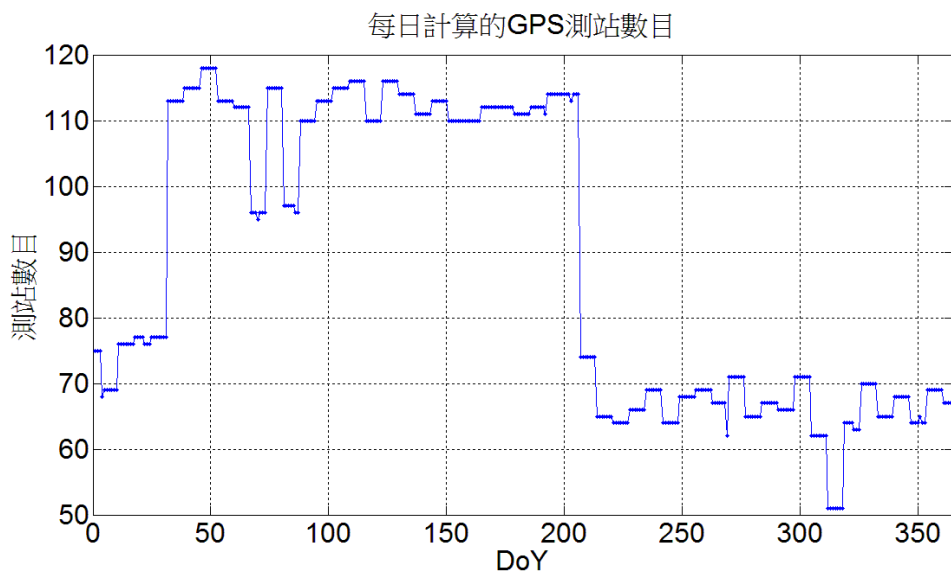


圖 5.5 2009 年每日 e-GPS 站天頂對流層總延遲量估計之站數

§ 5.3 乾延遲相關氣象資料說明

本計畫中天頂對流層總延遲量使用的模式為 Modified Hopfield 對流層模式，其中與乾延遲量有關的氣象參數為氣溫及氣壓。氣象資料由中央氣象局的局屬觀測站以及自動氣象站所觀測。中央氣象局在台灣大約有 33 個局屬觀測站，146 個自動氣象站，共約有 179 站，其分佈如圖 5.6。氣象資料觀測頻率約每小時一次，局屬觀測站記錄之氣象參數項目齊全，包含人工觀測；而自動氣象站觀測項目為累積雨量、平均氣溫、平均風速風向、測站氣壓、日照時數、濕度。本計畫使用中央氣象局所提供之氣壓及氣溫資料計算 e-GPS 站推估值以及 ZHD。

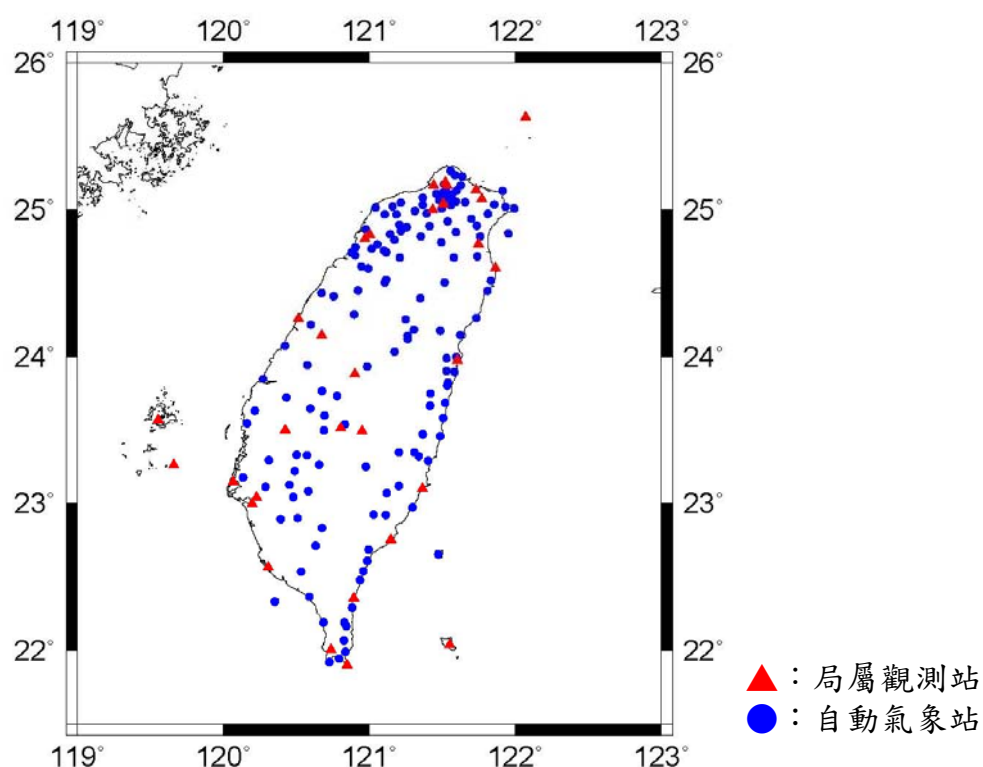
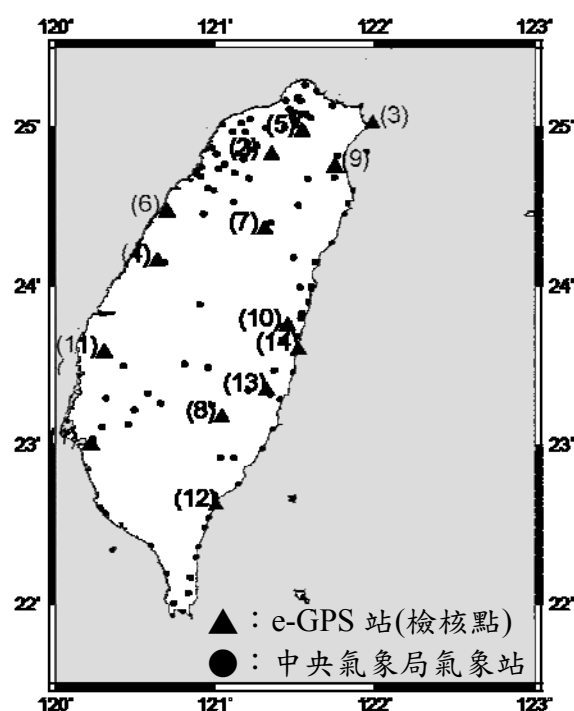


圖 5.6 中央氣象局氣象站分佈圖，約 179 站
(●:自動氣象站、▲：局屬觀測站)

§ 5.4 以氣象資料推估 e-GPS 站天頂對流層乾延遲量之精度比較

由表 5.1 得知 e-GPS 站天頂對流層濕延遲量與 WVR 天頂對流層濕延遲量的差異皆在 1.6 公分內；為了後續模式建立以及分析應用，吾人欲進一步把 ZTD 分成 ZHD 與 ZWD，因此，必須檢核 ZHD 的精度。



1:	CKSV	成大測量
2:	FUSI	復興
3:	GOLI	貢寮
4:	LSB0	測繪中心
5:	SIND	新店
6:	TASO	通宵
7:	WULI	武陵
8:	WULU	霧鹿
9:	YILN	宜蘭
10:	FLNM	鳳林
11:	PKG M	北港
12:	TMAM	太麻里
13:	JULI	玉里
14:	FONB	豐濱

圖 5.7 中央氣象局氣象站分佈與檢核點 (e-GPS 站) 之位置分佈

吾人選取具有氣象觀測且均勻分布於全台的 e-GPS 站當作檢核點，如圖 5.7，此檢核點設置有氣象儀器，紀錄其大氣壓力、溫度等氣象資料。透過檢核步驟，吾人可得到檢核點 ZHD 以及經由空間推估方法獲得 e-GPS 站之 ZHD。如圖 5.8 所示，其 rms 為 0.15~0.45 公分，表 5.2 為天頂對流層乾延遲量推估值與檢核點精度比較表。

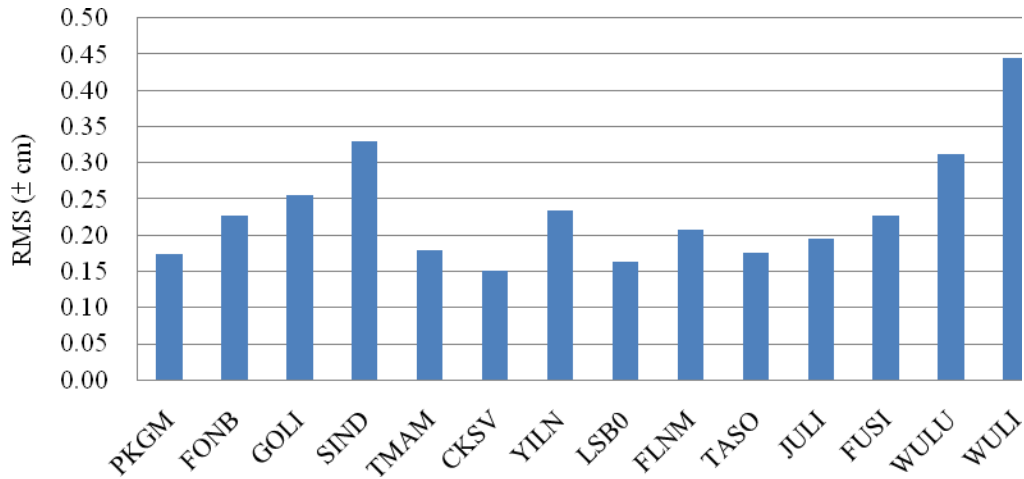


圖 5.8 天頂對流層乾延遲量推估值與檢核點精度直方圖

表 5.2 天頂對流層乾延遲量推估值與檢核點精度比較表

Station	PKGM	FONB	GOLI	SIND	TMAM	CKSV	YILN
	北港	豐濱	貢寮	新店	太麻里	成大測量	宜蘭
Elevation (m)	22.79	24.45	25.22	34.48	34.53	39.35	43.47
rms (± cm)	0.17	0.23	0.25	0.33	0.18	0.15	0.23

Station	LSB0	FLNM	TASO	JULI	FUSI	WULU	WULI
	測繪中心	鳳林	通霄	玉里	復興	霧鹿	武陵
Elevation (m)	102.37	114.66	132.29	152.09	480.75	900.75	1764.40
rms(± cm)	0.16	0.21	0.18	0.20	0.23	0.31	0.45

精度檢驗成果顯示天頂對流層乾延遲量推估值與檢核點觀測值之差異為數公厘等級，整體平均 RMS 約為 $\pm 0.23\text{cm}$ 。由成果可知，利用空間推估方法可由中央氣象局氣象站資料推估公厘等級的 e-GPS 站 ZHD，如此才能更進一步準確地計算 ZWD。

§ 5.5 e-GPS 站天頂對流層總延遲量推估之精度比較

利用§4.5 所建立之台灣區域性對流層延遲修正模式計算 14 個檢核站之 ZTD 延遲模式值，並且與 PPP 所估計之 ZTD 真實觀測值進行精度比較。

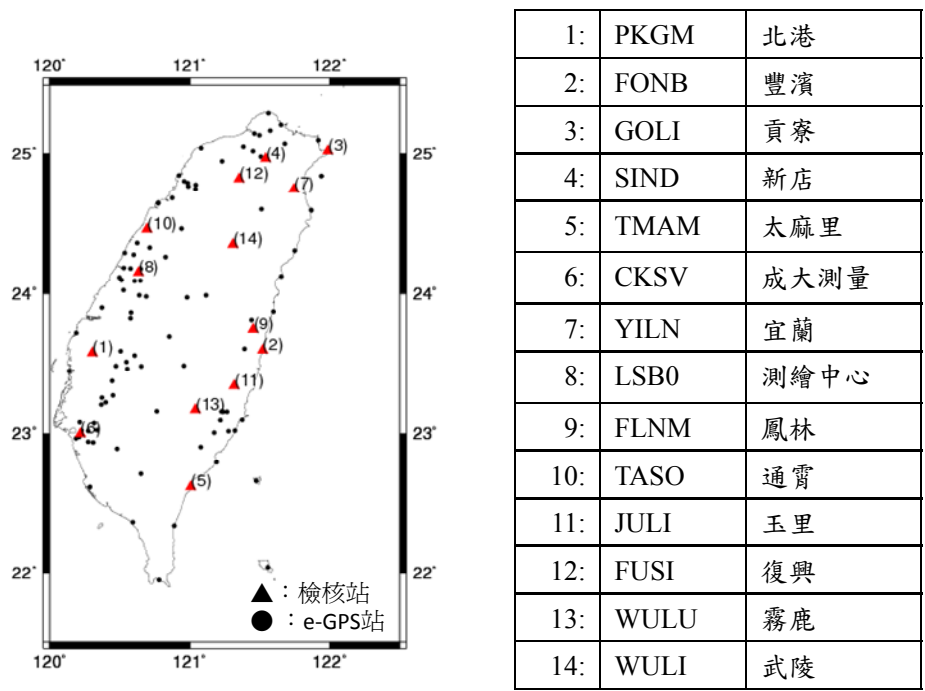


圖 5.9 檢核點(e-GPS 站)位置

吾人採用 14 個具有氣象觀測資料且均勻分布之 e-GPS 站作為 ZTD 空間推估檢核點，分佈如圖 5.9。檢核點精度比較成果如圖 5.10 以及表 5.3 所示，整體推估精度在 ± 4.77 公分之內。

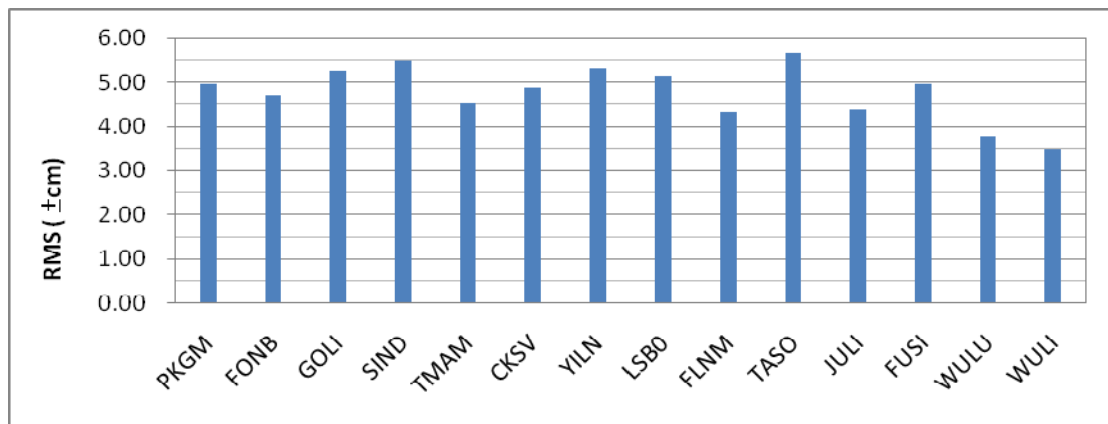


圖 5.10 天頂對流層總延遲量檢核精度直方圖

表 5.3 天頂對流層總延遲量檢核精度比較表

Station	PKGGM	FONB	GOLI	SIND	TMAM	CKSV	YILN
	北港	豐濱	貢寮	新店	太麻里	成大測量	宜蘭
Elevation (m)	22.79	24.45	25.22	34.48	34.53	39.35	43.47
rms (\pm cm)	4.94	4.69	5.28	5.48	4.53	4.88	5.32

Station	LSB0	FLNM	TASO	JULI	FUSI	WULU	WULI
	測繪中心	鳳林	通霄	玉里	復興	霧鹿	武陵
Elevation (m)	102.37	114.66	132.29	152.09	480.75	900.75	1764.40
rms (\pm cm)	5.12	4.34	5.65	4.37	4.95	3.77	3.49

§ 5.6 台灣區域性對流層延遲修正模式與全球模式比較

本計畫中除了分析檢核站 ZTD 推估精度之，亦進行台灣區域性對流層延遲修正模式與三種全球模式比較分析。目前所廣泛使用之全球模式包含 Hopfield 模式、Modified Hopfield 模式以及 Saastamoinen 模式，在多數 GPS 解算軟體中使用全球模式計算 ZTD 時係採用標準大氣模式做為氣象參數輸入值。本計畫亦使用 Hopfield 模式、Modified Hopfield 模式以及 Saastamoinen 模式進行比較，輸入模式之氣象參數為大地水準面上之標準大氣模式 (Dach *et al.*, 2008)。14 個檢核站之台灣區域性對流層延遲修正模式與全球模式比較如圖 5.11~5.13。

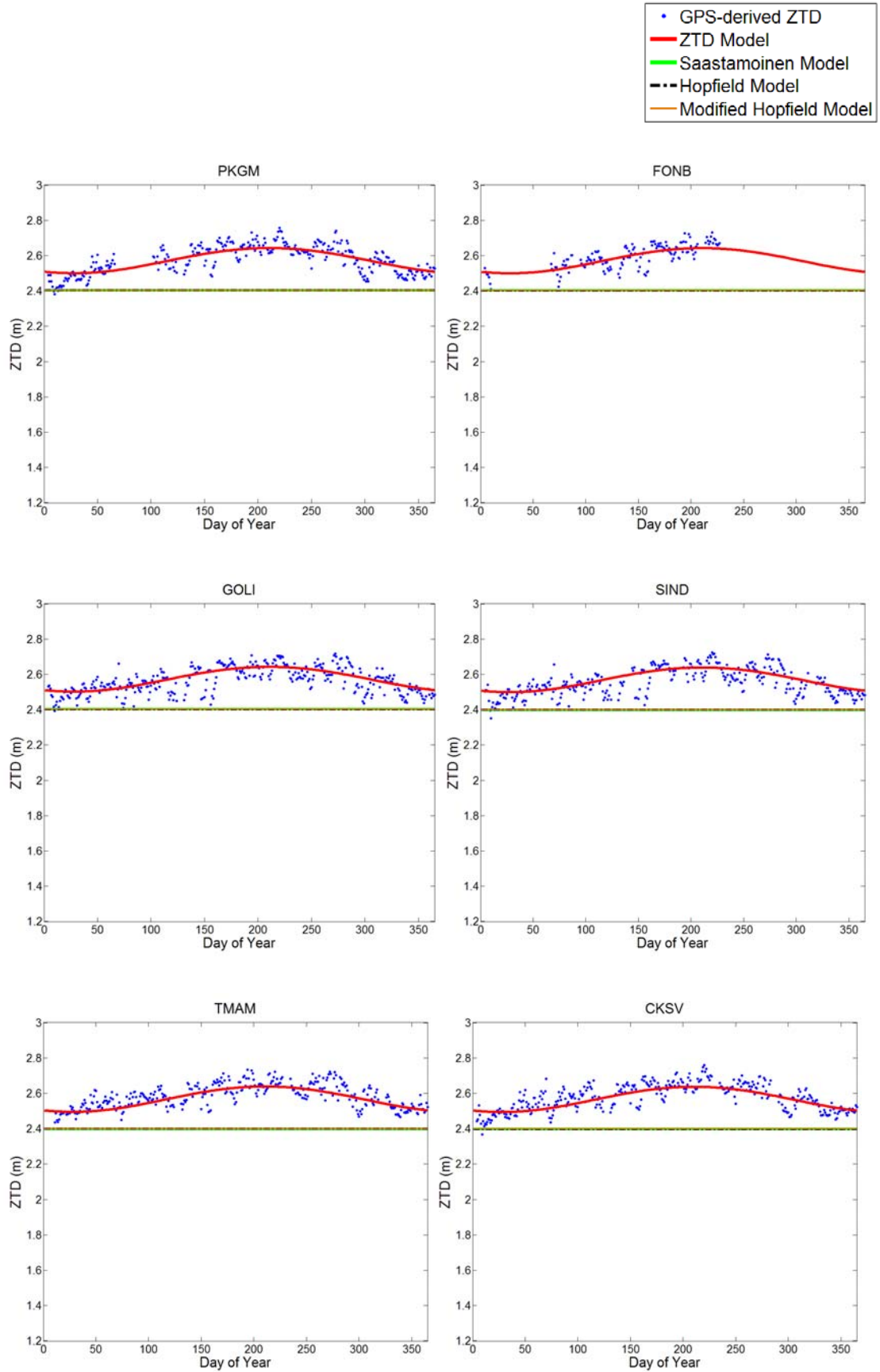


圖 5.11 檢核站上各種對流層延遲修正模式與 PPP 估計之 ZTD 比較圖

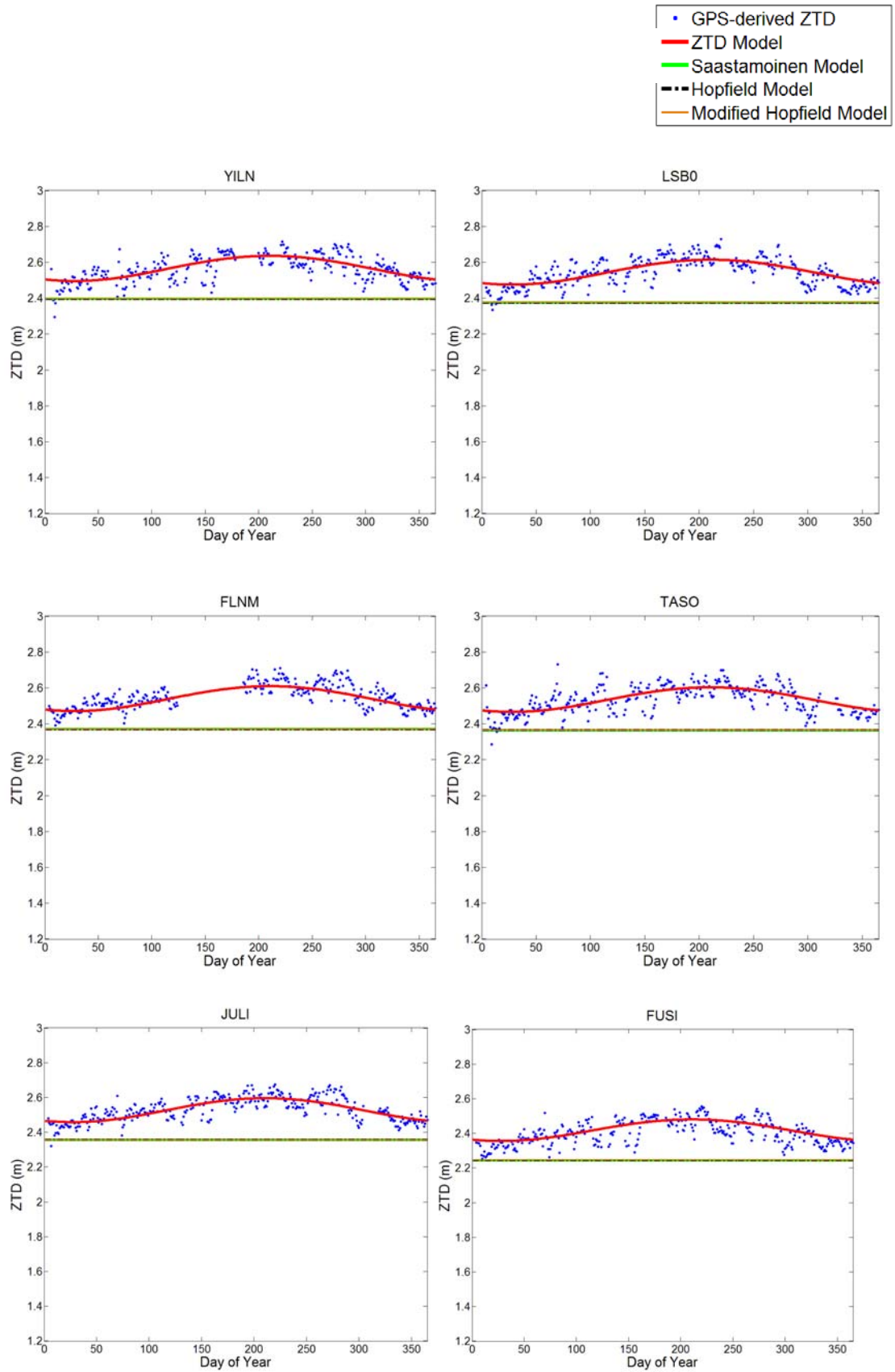


圖 5.12 檢核站上各種對流層延遲修正模式與 PPP 估計之 ZTD 比較圖

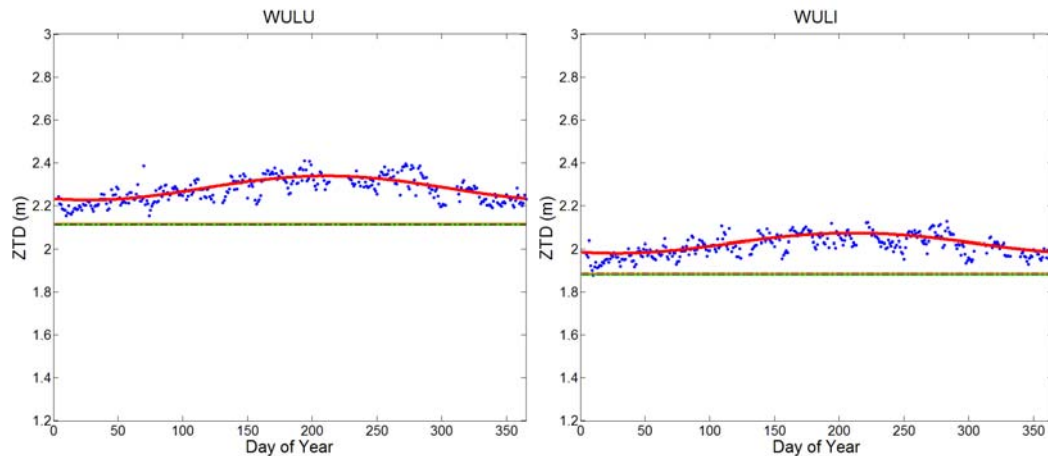


圖 5.13 檢核站上各種對流層延遲修正模式與 PPP 估計之 ZTD 比較圖

如圖 5.11~5.13 所示，由於全球模式是採用標準大氣模式之氣象參數作為輸入值，使得 ZTD 在任何時刻皆為定值，但由於氣象參數是由大地水準面轉換至測站高度，各檢核站之間由於測站高度不同 ZTD 也不相同。但是與 PPP 所估計之 ZTD 相比較，全球模式無法反映出台灣本島區域 ZTD 季節變化。

台灣區域性對流層延遲修正模式建立時考慮了氣象參數在時空中之變化，圖 5.11~5.13 中各檢核站使用區域性模式計算之 ZTD 隨時間變化而不同，ZTD 最高值主要在夏季。台灣區域性對流層延遲修正模式可反映 ZTD 之季節變化，其變化趨勢也與 PPP 所估計之 ZTD 較為一致。由圖 5.11-5.13 中及第二章所示各全球模式之間差異並不大，差異大約在幾個毫米以內。台灣區域性對流層延遲修正模式與全球模式之平均差值約為 20 公分。

§ 5.7 利用台灣區域性對流層延遲修正模式與全球模式之單點定位精度比較

由 § 5.6 所述，台灣區域性對流層延遲修正模式與全球模式之差值最大可達 20 公分，因此使用電碼觀測量進行單點定位時，採用不同對流層延遲修正模式將會導致定位精度之差異。

本計畫利用兩個位於不同高度上衛星觀測資料進行單點定位並且評估其成果與真實坐標之差異，所估計的測站分別為 CKSV (測量系館)以及 YUSN (玉山北峰)，觀測時間為 2009 年 7 月。真實坐標定位成果如下表：

表 5.4 CKSV 站使用不同對流層改正模式進行單點定位成果比較

CKSV (測量系館) 2009/7/14				
定位誤差		無改正模式	Modified Hopfield 模式	臺灣區域性模式
E	Mean(m)	-0.279	-0.225	-0.219
	RMS(±m)	1.976	1.723	1.699
N	Mean(m)	0.090	0.012	-0.004
	RMS(±m)	1.610	1.268	1.261
U	Mean(m)	7.227	1.309	0.640
	RMS(±m)	9.340	4.529	4.342

表 5.5 YUSN 站使用不同對流層改正模式進行單點定位成果比較

YUSN (玉山北峰) 2009/7/17				
定位誤差		無改正模式	Modified Hopfield 模式	臺灣區域性模式
E	Mean(m)	-0.279	-0.236	-0.235
	RMS(±m)	2.112	2.087	2.076
N	Mean(m)	0.450	0.313	0.314
	RMS(±m)	2.961	2.483	2.493
U	Mean(m)	4.334	0.432	0.165
	RMS(±m)	7.343	5.496	5.495

由表 5.4 以及表 5.5 所示，使用不同的對流層改正模式進行單點定位與真實坐標比較，可分成三種情況比較，分別為無改正模式、Modified Hopfield 模式以及臺灣區域性模式。定位誤差代表不同情況下與坐標真值的平均差值以及 RMS 值，各種不同情況下主要是造成在高程方向上之差異，其定位誤差中坐標真值平均差值皆不同，相較於使用 Modified Hopfield 模式，使用臺灣區域性模式得到的平均差值最小，約為 0.165 m。使用臺灣區域性對流層延遲修正模式進行定位

所得的高程坐標較接近真值，CKSV 與 YUSN 站之定位誤差平均值(表 5.4 及表 5.5 中 mean 值)皆降低了約 50%，CKSV 站定位誤差平均值由 1.309 m 降至 0.640 m，YUSN 站由 0.432 m 降至 0.165 m。

§ 5.8 e-GPS 站天頂對流層監測技術之可能科學應用

本研究擬針對四種降雨實例進行絕對 ZWD 值估算與分析，此四例分別為 2008 年梅雨季、2008 年辛樂克颱風、2009 年梅雨季及 2009 年莫拉克颱風。

§5.8.1 實驗資料與資料處理流程

本研究擬針對四種降雨例子來進行分析，表 5.6 所示為所引用的資料時間分布。

表 5.6 四個例子的資料時間

	GPS	氣象資料(含雨量)
2008 年梅雨季	2008/06/12~2008/06/19	2008/06/12~2008/06/19
2008 年辛樂克颱風	2008/09/11~2008/09/18	2008/09/11~2008/09/18
2009 年梅雨季	2009/06/11~2009/06/18	2009/06/11~2009/06/18
2009 年莫拉克颱風	2009/08/05~2009/08/12	2009/08/05~2009/08/12

GPS 資料來源皆來自於內政部國土測繪中心所建置的 e-GPS 電子基準站，資料取樣頻率皆為 30 秒；氣象資料由中央氣象局所下載，資料取樣頻率為 1 小時。GPS 資料分別在台灣北、中、南及東部地區各取一站為測試站，表 5.7 為四個案例所採樣的的基準站，其分布位置如圖 5.14 所示。圖 5.15 與圖 5.16 分別為辛樂克颱風和莫拉克颱風的路徑圖。

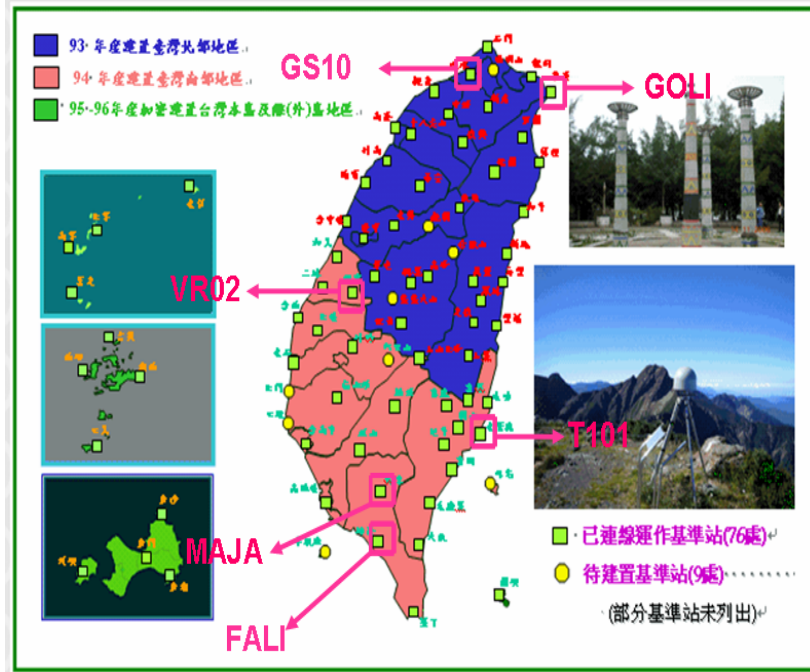


圖 5.14 GPS 站位置分佈圖

表 5.7 四個案例所採用基準站的空間資訊

2008 年梅雨季	GS10(淡水)、VR02(田中)、FALI(枋寮)及 T101(東管處)		
2008 年辛樂克颱風	GS10(淡水)、VR02(田中)、FALI(枋寮)及 T101(東管處)		
2009 年梅雨季	GOLI(貢寮)、VR02(田中)、MAJA(瑪家)及 T101(東管處)		
2009 年莫拉克颱風	GOLI(貢寮)、VR02(田中)、MAJA(瑪家)及 T101(東管處)		
	經度(度)	緯度(度)	橢球高(公尺)
GS10(淡水站)	121.461553	25.146545	52.1234
VR02(田中站)	120.373487	23.899940	42.5818
FALI(枋寮站)	120.593606	22.365256	41.6524
T101(東管處)	121.323625	23.020338	110.296
GOLI(貢寮站)	121.987432	25.020394	45.9308
MAJA(瑪家站)	120.652060	22.707649	211.764

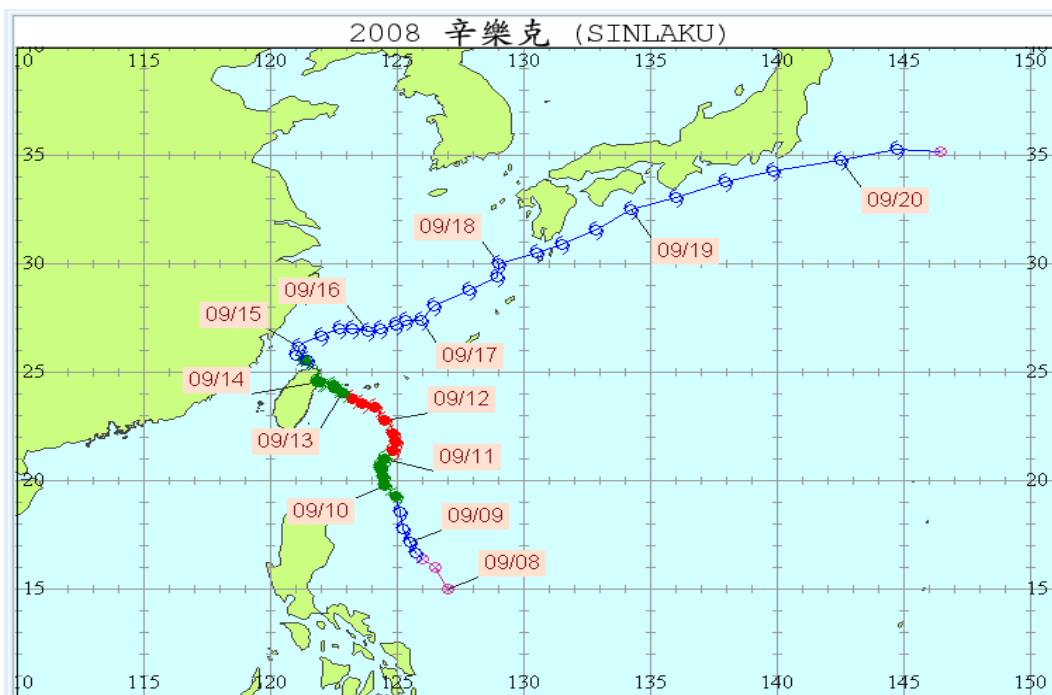


圖 5.15 辛樂克颱風路徑圖(摘自中央氣象局)

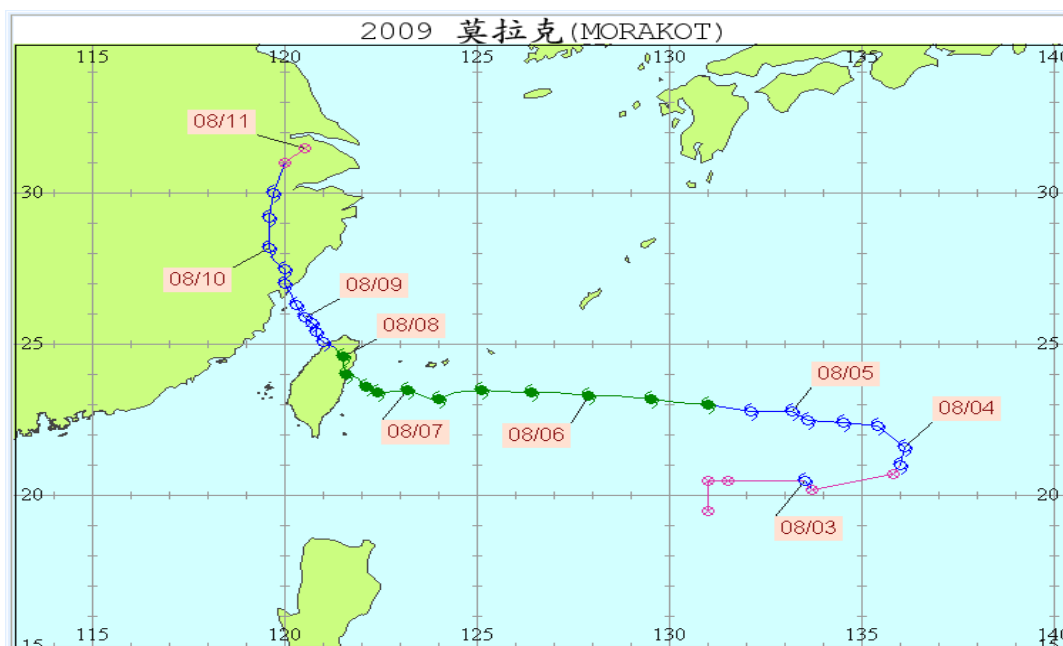


圖 5.16 莫拉克颱風路徑圖(摘自中央氣象局)

本研究的資料處理流程如圖 5.17 所示，吾人透過精密單點定位解算軟體配合精密星曆產品可得到絕對天頂對流層 ZTD；再利用中央氣象局所得到的地面氣象觀測資料（包含溫度、溼度、壓力及雨量），經由空間內插至 GPS 站，透過 Saastamoinen Model 估算天頂對流層 ZHD，兩者相減即可得到 GPS 站的天頂對流層 ZWD；同時吾人可從氣象資料將雨量資料擷取出來，並將雨量資料與 ZWD 進行比對以提供未來氣量領域之專家進行更進一步分析與判釋。

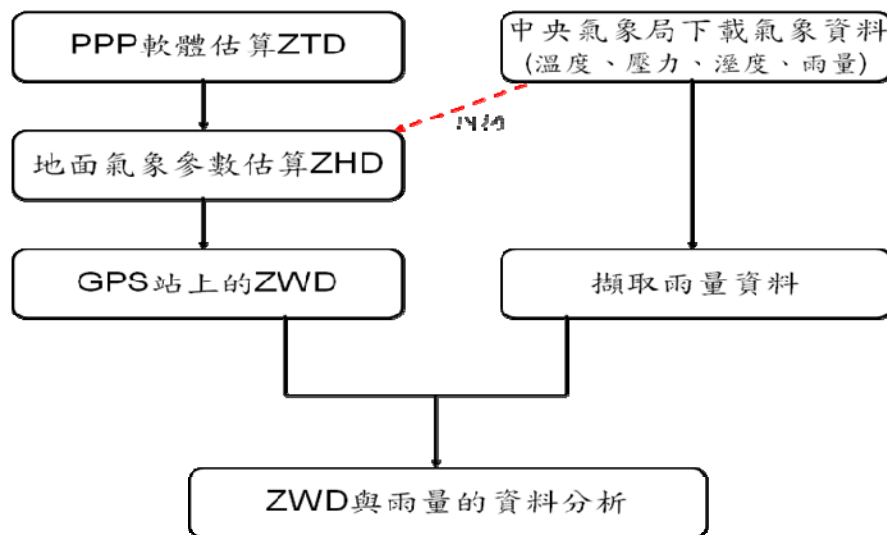


圖 5.17 本研究資料處理流程圖

■ 實驗案例 1：辛樂克颱風

本研究在辛樂克和莫拉克颱風期間所使用的 GPS 參考站分別為淡水站 (GS10)、田中站 (VR02)、枋寮站 (FALI) 及東管處 (T101)，其位置坐標可透過表 x.2 及圖 x.1 所示：

圖 5.18(a) 至圖 5.18(d) 為四個 GPS 參考站於辛樂克颱風期間的 ZWD 與雨量時間序列圖；基本上，四個參考站的雨量資料與 ZWD 的趨勢非常接近，在溼延遲量上升的時候，緊接著雨水也隨之落下。

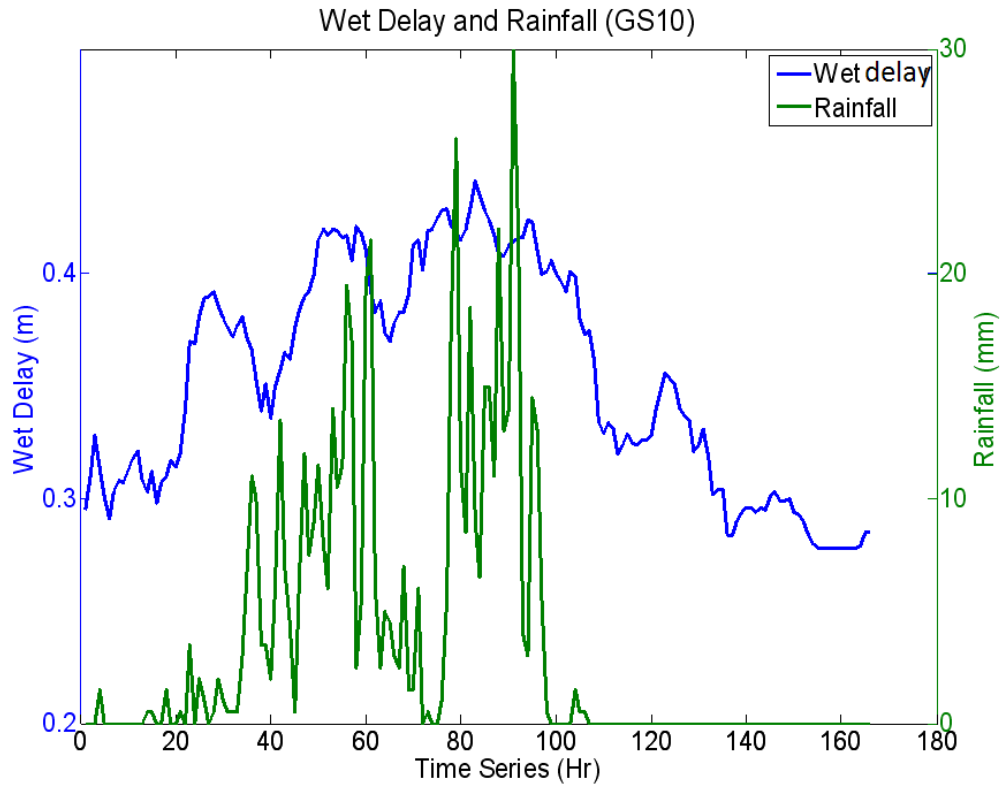


圖 5.18(a) 淡水站在辛樂克颱風期間的 ZWD 與雨量時間序列圖

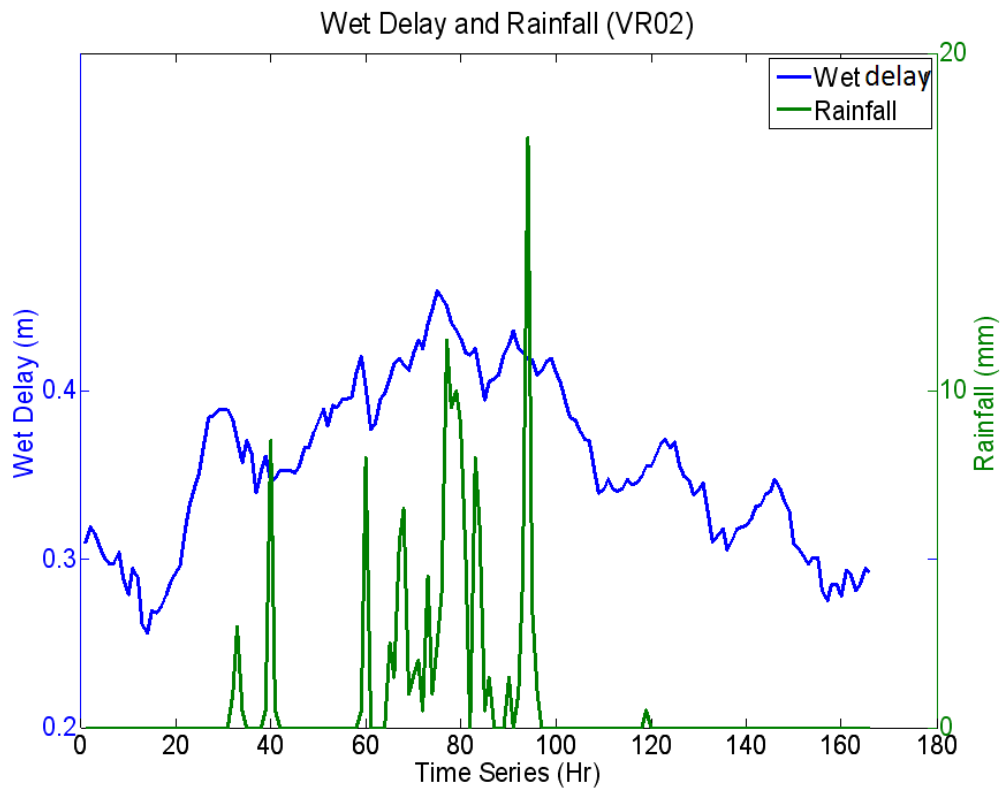


圖 5.18(b) 田中站在辛樂克颱風期間的 ZWD 與雨量時間序列圖

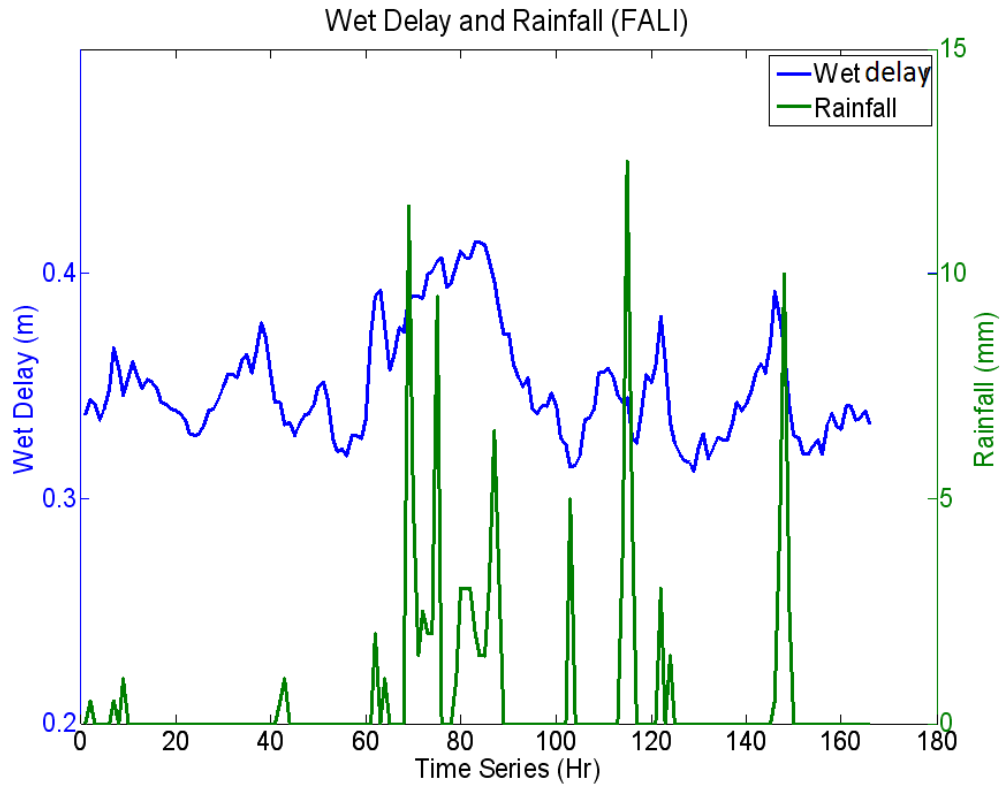


圖 5.18(c) 枋寮站在辛樂克颱風期間的 ZWD 與雨量時間序列圖

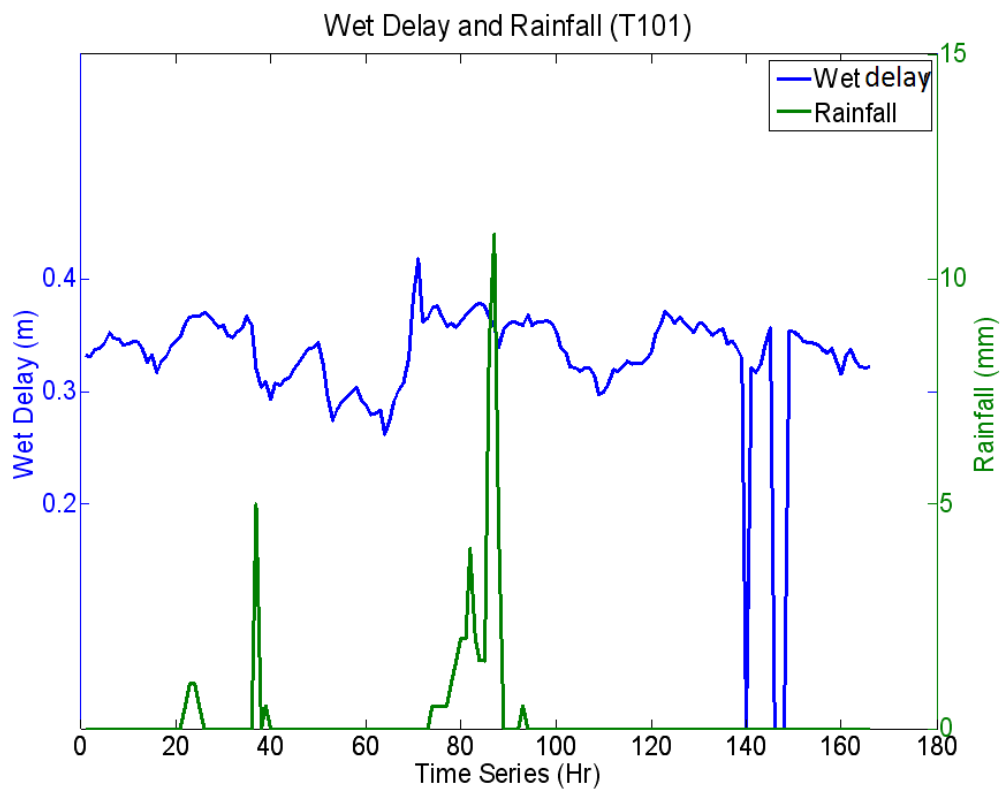


圖 5.18(d) 東管處在辛樂克颱風期間的 ZWD 與雨量時間序列圖

■ 實驗案例 2：莫拉克颱風

圖 5.19(a) 至圖 5.19(d) 為四個 GPS 參考站於莫拉克颱風期間的 ZWD 與雨量時間序列圖；在淡水站雨量資料的兩個峰值與溼延遲量較無明顯的關係，但是 80-120 小時的雨量與溼延遲量有明顯的時間延遲；田中站的雨量與溼延遲量亦有明顯相同的趨勢；而枋寮站與東管處幾乎沒有時間延遲，這亦表示溼延遲量上升時，在極短時間內即降下雨水。

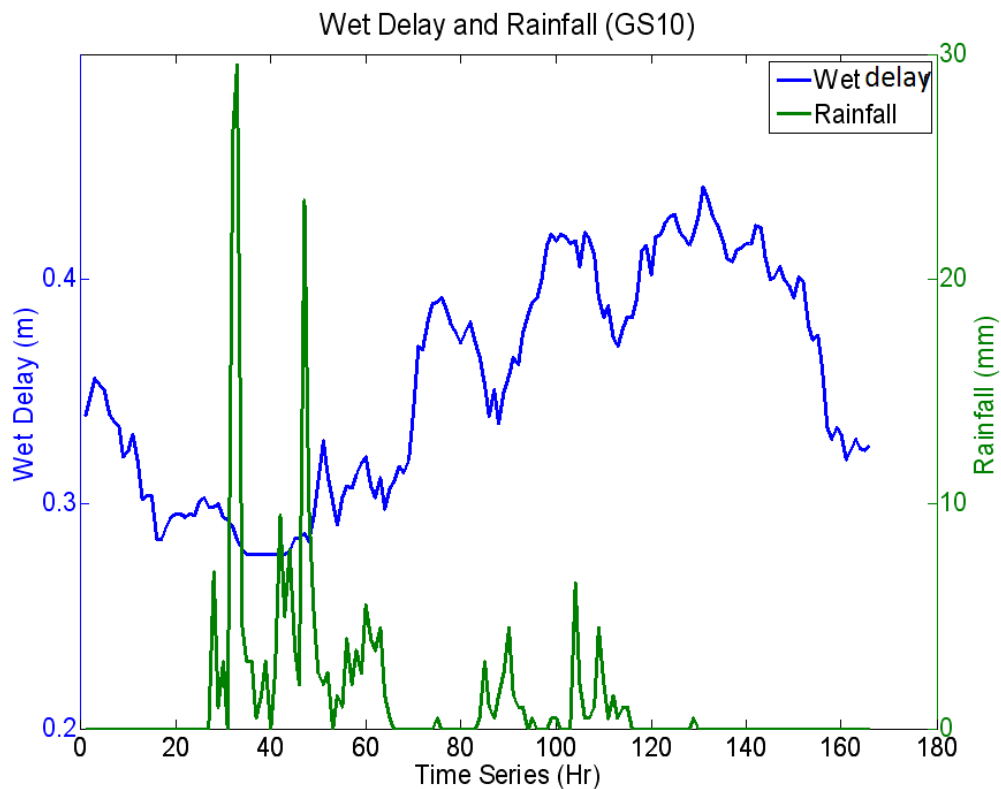


圖 5.19(a) 淡水站在莫拉克颱風期間的 ZWD 與雨量時間序列圖

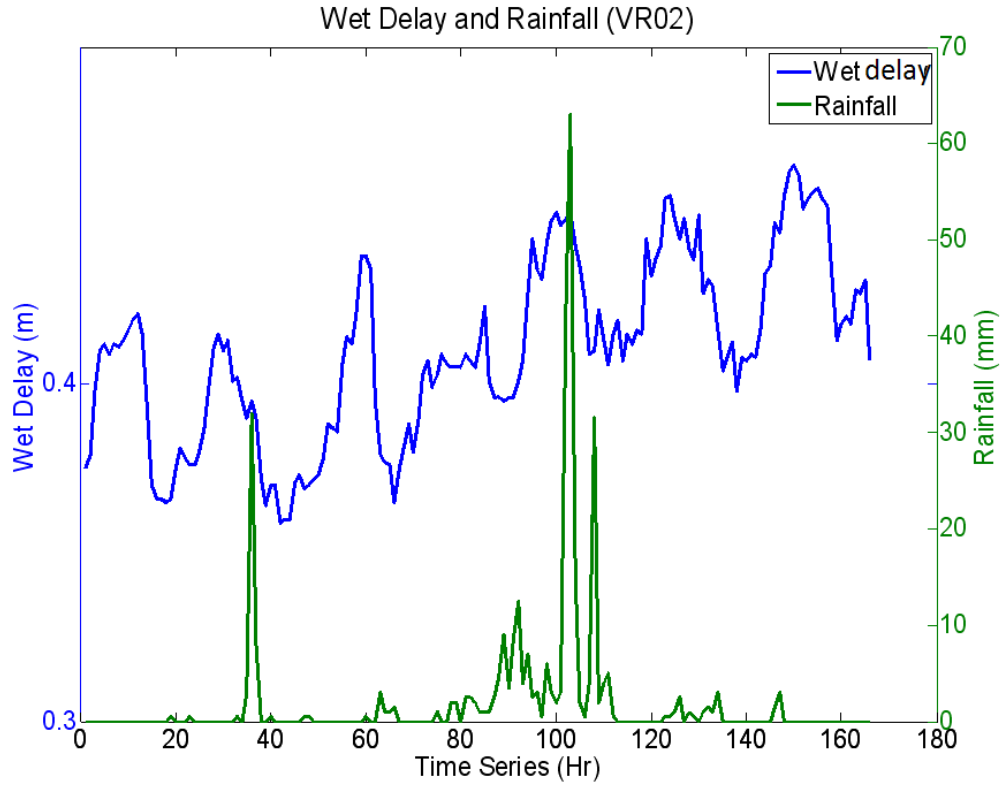


圖 5.19(b) 田中站在莫拉克颱風期間的 ZWD 與雨量時間序列圖

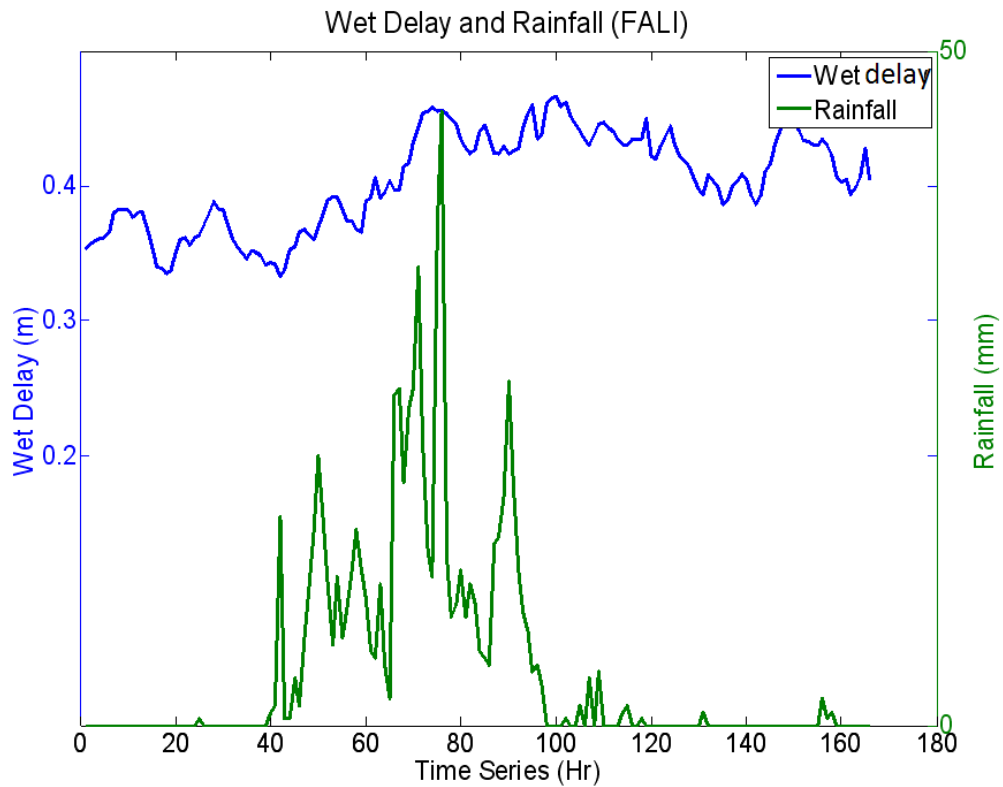


圖 5.19(c) 枋寮站在莫拉克颱風期間的 ZWD 與雨量時間序列圖

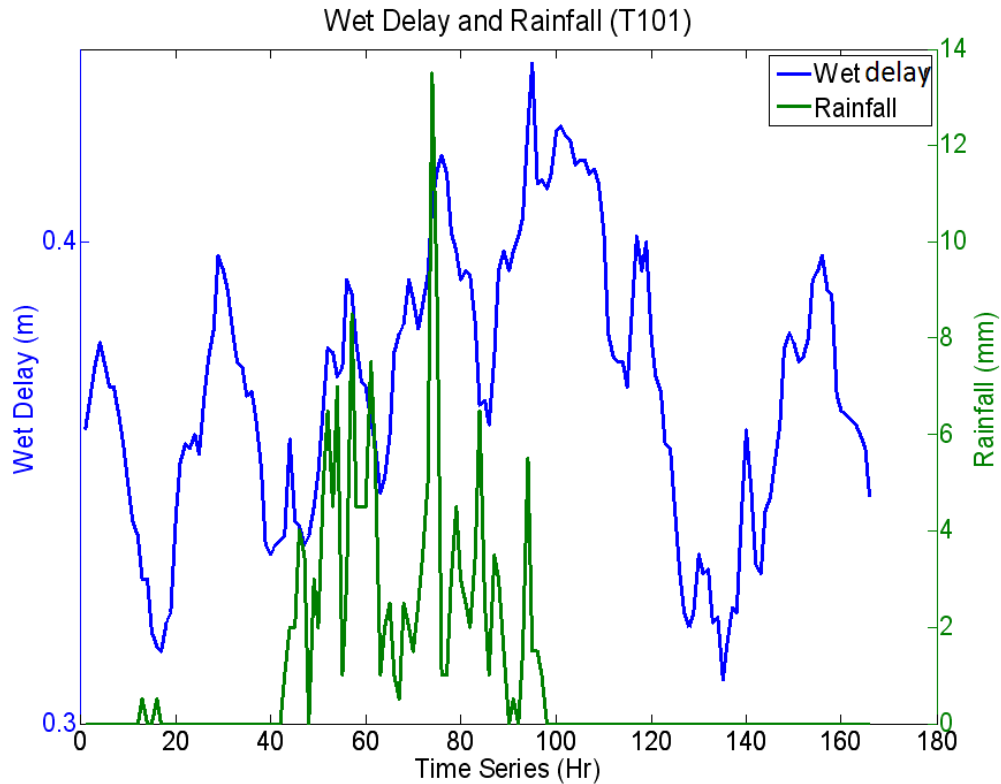


圖 5.19(d) 東管處在莫拉克颱風期間的 ZWD 與雨量時間序列圖

■ 實驗案例 3：2008 年梅雨季(2008/06/12~2008/06/19)

本研究在 2008 年梅雨和 2009 年梅雨期間所使用的 GPS 參考站分別為貢寮站 (GOLI)、田中站 (VR02)、瑪家站 (MAJA) 及東管處 (T101)，其位置坐標可透過表 5.7 及圖 5.14 所示：

圖 5.20(a) 至圖 5.20(d) 為四個 GPS 參考站於 2008 梅雨期間的 ZWD 與雨量時間序列圖；貢寮站降雨時間較少，但出現的兩個雨量資料峰值皆出現在溼延遲量峰值之後；田中站降雨時間也較少，最大的峰值也出現在溼延遲量峰值之後；瑪家站降雨時間較多，雨量的峰值位置與溼延遲量的峰值也很接近；而東管處亦有此趨勢。

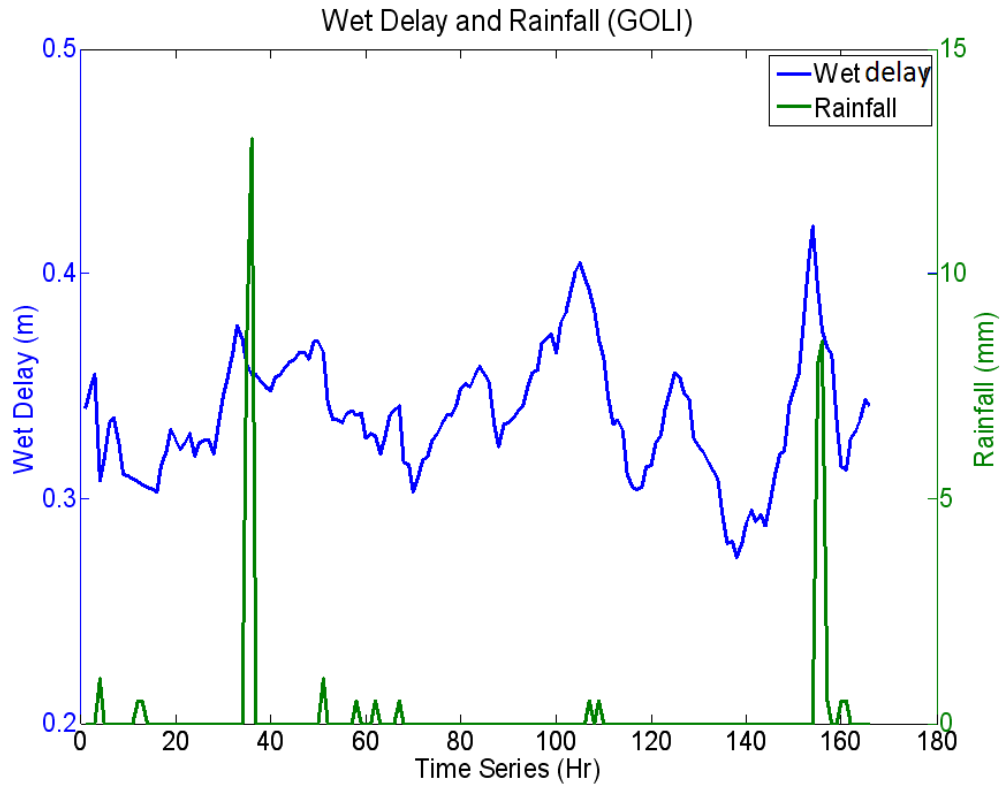


圖 5.20(a) 貢寮站在 2008 梅雨期間的 ZWD 與雨量時間序列圖

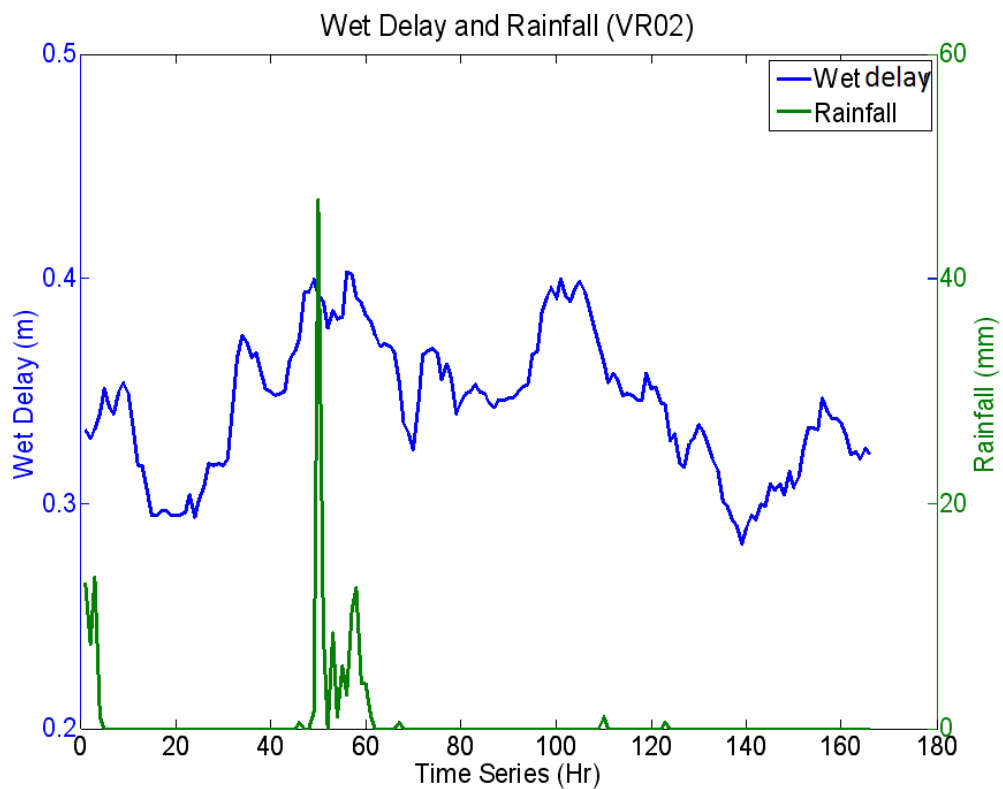


圖 5.20(b) 田中站在 2008 梅雨期間的 ZWD 與雨量時間序列圖

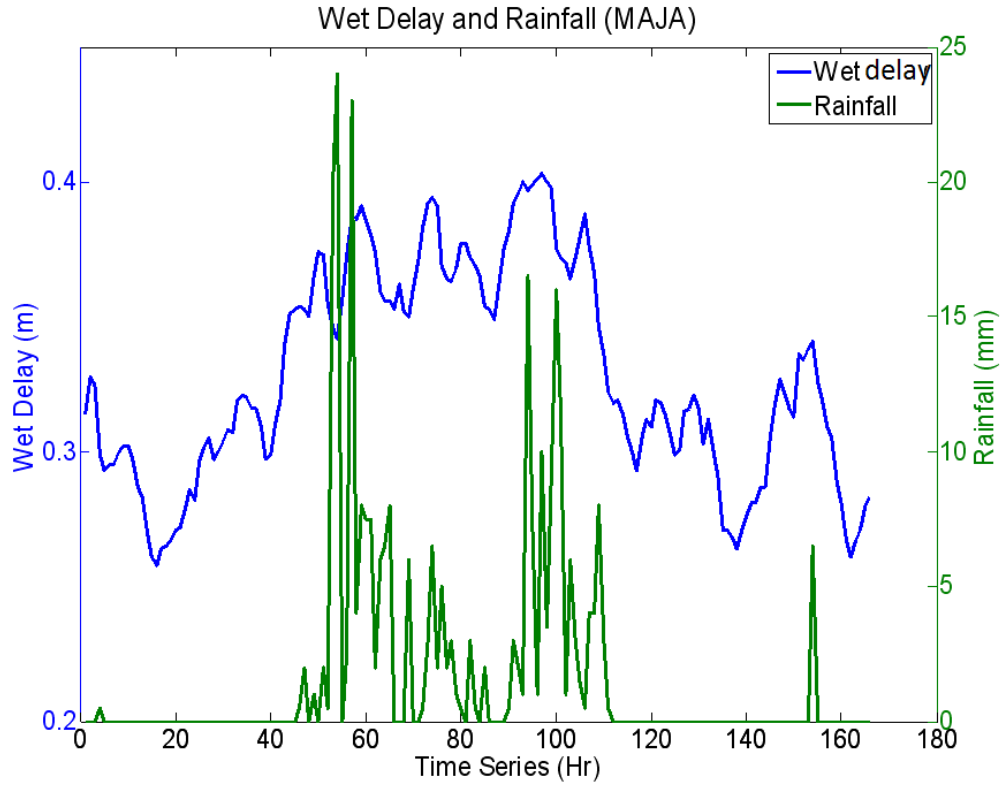


圖 5.20(c) 瑪家站在 2008 梅雨期間的 ZWD 與雨量時間序列圖

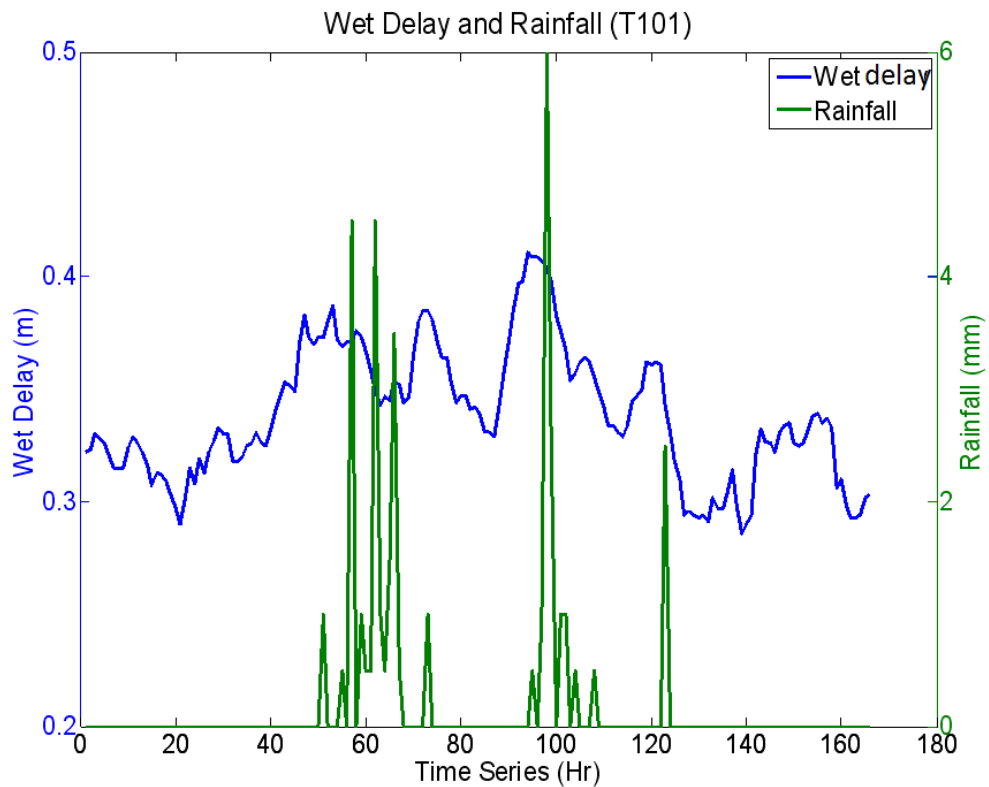


圖 5.20(d) 東管處在 2008 梅雨期間的 ZWD 與雨量時間序列圖

■ 實驗案例 4：2009 年梅雨季 (2009/06/11~2008/06/18)

圖 5.21(a) 至圖 5.21(d) 為四個 GPS 參考站於 2009 梅雨期間的 ZWD 與雨量時間序列圖；貢寮站在雨量資料與濕延遲資料的時間點近乎是重合的；田中站降雨時間較少，但趨勢亦跟貢寮站是一樣的；瑪家站與東管處的溼延遲量與雨量資料的時間點非常接近。整體而言，此案例的雨量與溼延遲量近乎於重合，且每日溼延遲量變化的週期峰值恰好與雨水降下的時間點幾乎一致。

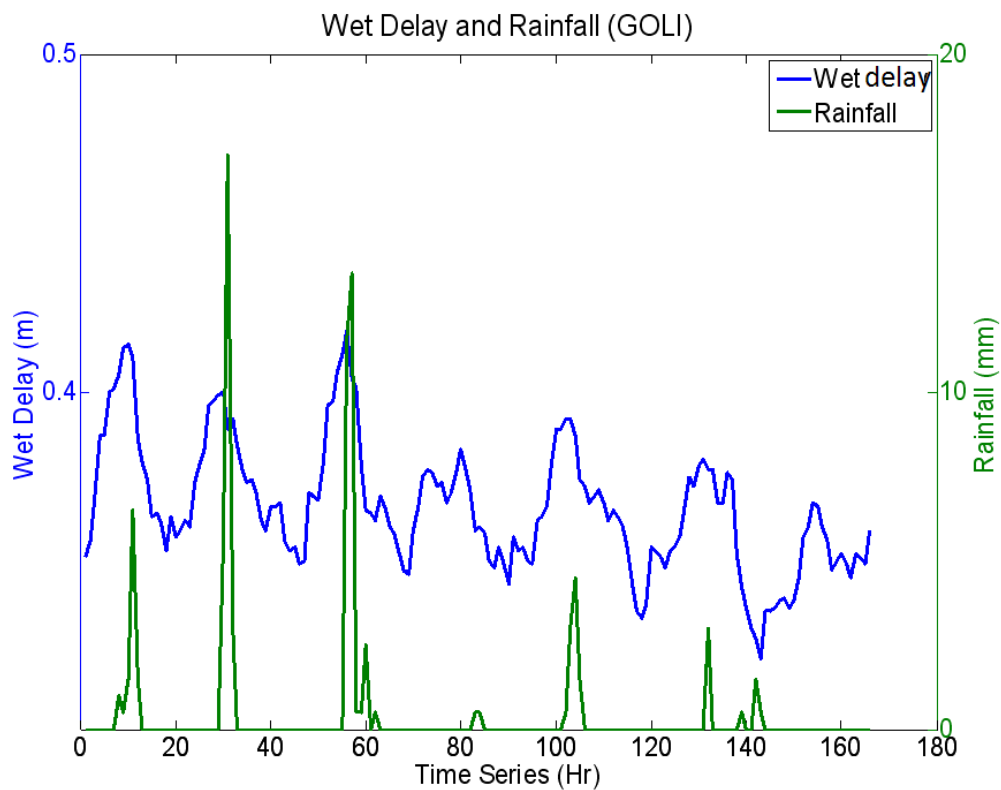


圖 5.21(a) 貢寮站在 2009 梅雨期間的 ZWD 與雨量時間序列圖

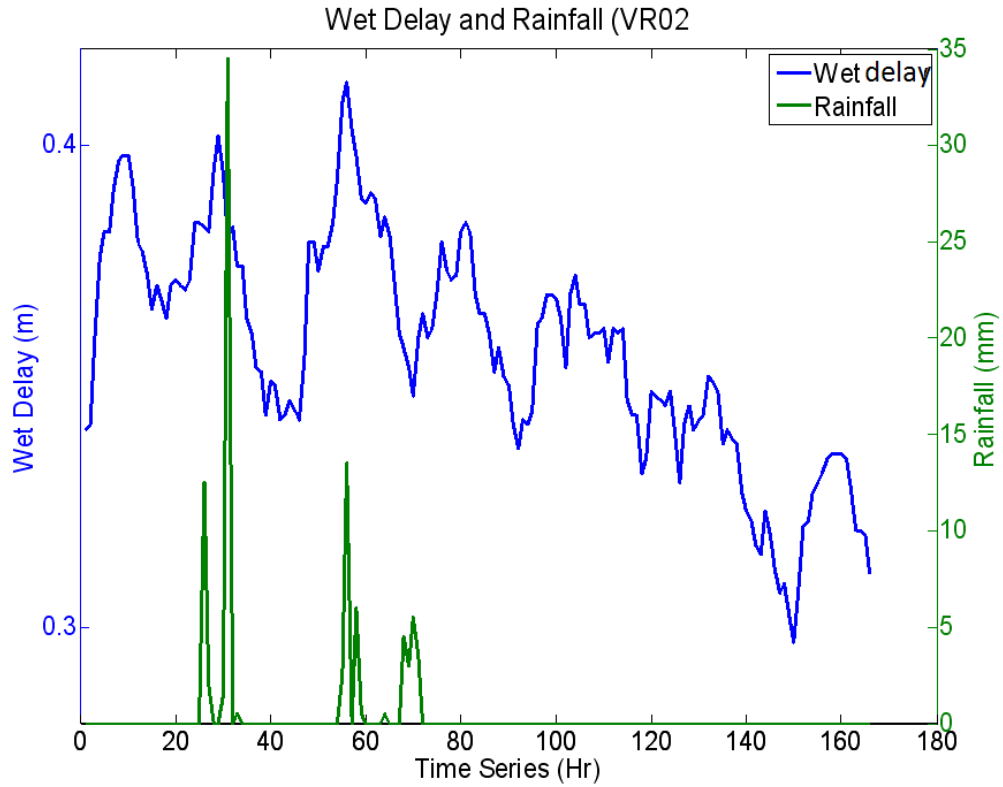


圖 5.21(b) 田中站在 2009 梅雨期間的 ZWD 與雨量時間序列圖

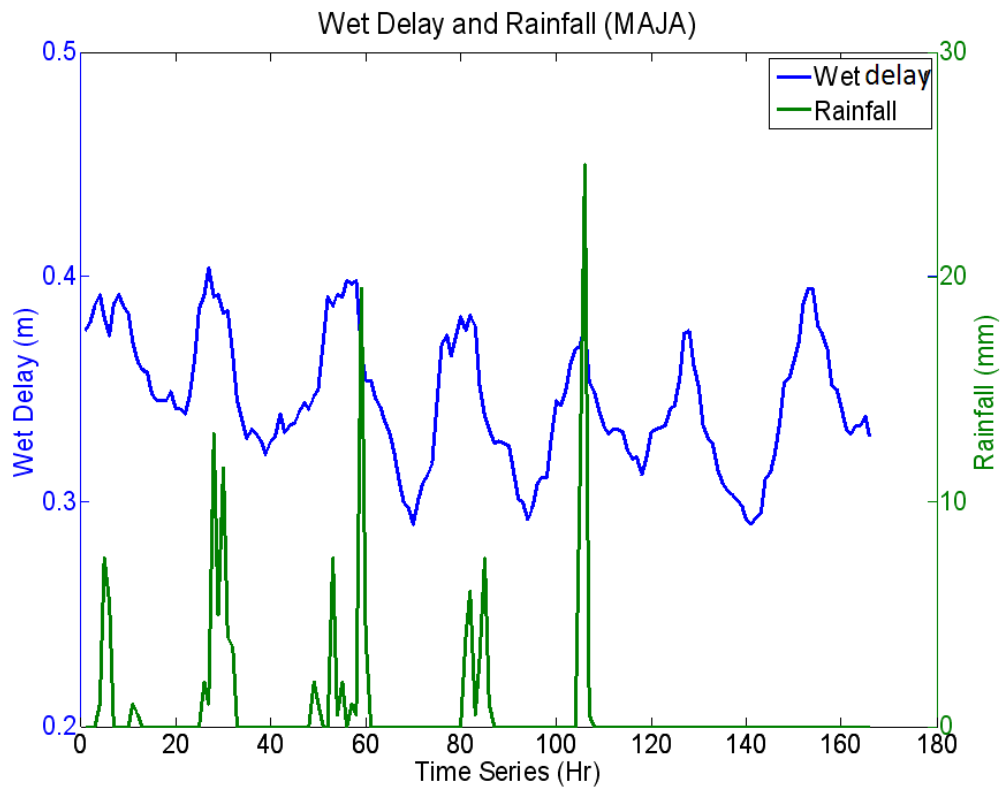


圖 5.21(c) 瑪家站在 2009 梅雨期間的 ZWD 與雨量時間序列圖

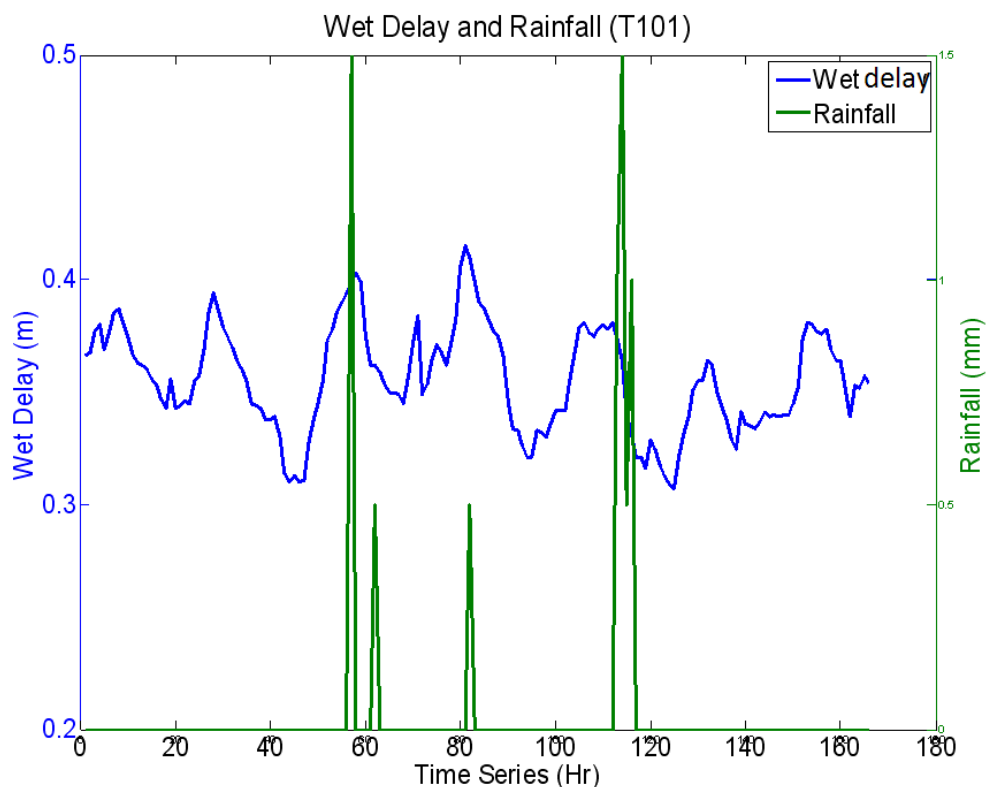


圖 5.21(d) 瑪家站在 2009 梅雨期間的 ZWD 與雨量時間序列圖

上述之實驗結果顯示 PPP 所推導出之絕對 ZWD 值與降雨量分布之時間序列存在一些值得深入探討之相關性，唯這些現象的判釋超出本研究之範疇，這有待氣象領域專家針對相關課題進行深入研究，期能對颱風與梅雨季節的超大降雨事件提供預警上的輔助資訊，如此在科學與民生之需求上皆有一定之助益。

第六章 辦理科技計畫成果發表會與教育訓練以及提 送論文

§ 6.1 辦理科技計畫成果發表會及教育訓練

本計畫並已於 99 年 3 月 31 日於成功大學測量及空間資訊學系系館經緯廳舉辦辦理 ”內政部國土測繪中心 2010 測繪科技計畫成果發表暨研討會”，本次報名參加人員達 270 人次，其活動說明、議程表詳表 6.1~6.2，當日專題研討盛況如圖 6.1 所示。

表 6.1 測繪科技計畫成果發表暨研討會說明



內政部國土測繪中心

2010 測繪科技計畫成果發表暨研討會

會議目的：
測繪科技日新月異，本次研討會將國內外發展衛星定位技術、空載光達技術、精密重力測量及衛星影像製圖等新的測繪技術與成果作交流與推廣，藉由引進新的測繪科技，提升國土測繪的精度與效率，有助於構建完整三維空間資訊，提供政府部門施政參考及活化發展空間資訊測繪產業前景等目標。

日期：2010年3月31日(星期三) **指導單位：**內政部
地點：國立成功大學測量及空間資訊學系 經緯廳 **主辦單位：**內政部國土測繪中心
執行單位：國立成功大學

《 議 程 表 》

時間	議程	議題	主講人	主持人
08:30-09:20	報到			
09:20-09:40	開幕及長官貴賓致詞			
09:40-10:20	專題研討	測量車攝影測量系統之率定及驗證	成功大學 曾義星 教授	劉正倫 副主任
10:20-10:40	茶敘 / 交流 / 成果展示區導覽			
10:40-11:20	專題研討	運用無人飛行載具(UAV)快速偵測國土空間資訊	經緯衛星資訊股份有限公司 羅正方 博士	成功大學 曾義星 教授
11:20-12:00		PPP+e-GPS觀測網之對流層濕延遲估算法與科學應用	成功大學 江凱偉 教授	
12:00-13:30	午餐時間			
13:30-14:10	專題研討	高程現代化作業	中央研究院 劉啟清 博士	成功大學 楊名 教授
14:10-14:50		Local and global vertical datum connections	交通大學 黃金維 教授	
14:50-15:10	茶敘 / 交流 / 成果展示區導覽			
15:10-15:50	專題研討	整合多時期SAR影像之監測實例	中央大學 吳 奕 教授	交通大學 黃金維 教授
15:50-16:30		三維建物模型與應用	中央大學 蔣良健 教授	
16:30-17:00	綜合座談			
			林燕山 主任、楊名 系主任	




報名方式：網路報名、傳真報名、現場報名(會議參加名額以200名為限，會議當日如論文集數量不足，恕不另行補發)

聯絡人：郭俐慧、陳敏玉、李嘉玲 小姐

地址：701臺南市大學路1號 國立成功大學 衛星資訊研究中心(成功校區 綜合大樓)

電話：(06)238-3399 轉 210、212、213

傳真：(06)209-9733

電子信箱：gnss2010@sgrc.ncku.edu.tw

網路報名：<http://www.sgrc.ncku.edu.tw/gnss/>

報名日期：2010/03/01 - 2010/03/26

《 敬請張貼 · 歡迎參加 》

本研討會免報名費 · 可申請公務人員終身學習護照時數及技師積分

表 6.2 測繪科技成果發表暨研討會議程表

時間	議程	議 題	主 講 人	主 持 人
08:30-09:20	報 到			
09:20-09:40	開幕及長官貴賓致詞			
09:40-10:20	專題 研討	測量車攝影測量系統之率定 及驗證	成功大學 曾義星教授	劉正倫 副主任
10:20-10:40	茶敘 / 交流 / 成果展示區導覽			
10:40-11:20	專題 研討	運用無人飛行載具(UAV) 快速偵蒐國土空間資訊	經緯衛星資訊股份有 限公司 羅正方博士	成功大學 曾義星 教授
11:20-12:00		PPP+e-GPS 觀測網之對流 層濕延遲估算技術與科學應 用	成功大學 江凱偉教授	
12:00-13:30	午 餐 時 間			
13:30-14:10	專題 研討	台灣高程現代化作業	中興測量公司 總顧問 劉啓清博士	成功大學 楊名 教授
14:10-14:50		台灣區域性與全球性的高程 基準連結	交通大學 黃金維教授	
14:50-15:10	茶敘 / 交流 / 成果展示區導覽			
15:10-15:50	專題 研討	整合多時期 SAR 影像之監 測實例	中央大學 吳 究 教授	交通大學 黃金維 教授
15:50-16:30		三維建物模塑與應用	中央大學 陳良健 教授	
16:30-17:00	綜 合 座 談		林主任燕山、楊系主任名	

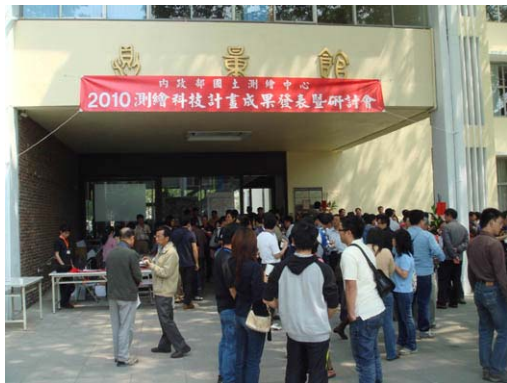


圖 6.1 測繪科技成果發表暨研討會專題研討及系統展示現況

此外本校已於 99 年 5 月 3 號發函請 貴中心 同意於 99 年 6 月 3~4 日假台南國成功大學 測量及空間資訊學系 2 樓空間資訊教室舉辦辦理一次 20 人次的教育訓練，其課程表如表 9.3，教育訓練上課情形如圖 6-2 所示。

表 6.3 發展臺灣區域性對流層延遲估算模式先期研究作業研習班課程配當表

日期 時間	99 年 6 月 3 日 (星期四)	99 年 6 月 4 日 (星期五)
09:00 ┆ 10:00	/	PPP 天頂對流層延遲估計軟體操作 講師：成功大學江凱偉 助理教授 助教：彭微之 碩士生
10:00 ┆ 11:00		地面氣象資料分析與空間推估 講師：成功大學李孟穎 研究助理教授 助教：吳曉雯 碩士生
11:00 ┆ 12:00		結合 e-GPS 站觀測量與地面氣象資料之計算分析 講師：成功大學李孟穎 研究助理教授 助教：吳曉雯 碩士生
12:00 ┆ 13:00		午 餐
13:00 ┆ 14:00	報 到	臺灣區域性對流層模式之介紹 講師：成功大學李孟穎 研究助理教授 助教：吳曉雯 碩士生
14:00 ┆ 15:00	PPP 定位原理及近期發展 講師：成功大學江凱偉 助理教授	e-GPS 站對流層延遲監測技術評估分析與科學應用 講師：成功大學江凱偉 助理教授 助教：彭微之 碩士生
15:00 ┆ 16:00	PPP 動態定位解算數學模式 講師：成功大學江凱偉 助理教授	臺灣區域性對流層模式與全球模式之比較分析 講師：成功大學楊名 教授
16:00 ┆ 17:00	全球對流層模式發展現況及應用 講師：成功大學江凱偉 助理教授 助教：彭微之 碩士生	/



圖 6.2 教育訓練上課情形

§ 6.2 參與國內外學術會議及提送論文

本計畫於本年度執行期間相關成員所參與之學術活動與發表之文章整理如表 6.4，提送論文摘要詳附錄三

表 6.4 參與國內外學術會議及提送期刊論文情況

項次	會議或期刊名稱	論文名稱	作者	備註
1	ION GNSS 2010 Meeting, 美國奧勒岡州波特蘭 (Portland, Oregon, USA) 提送: 2010.03.01 接受: 2010.05.01 刊登: 2010.09.21	<i>Time Frequency Analysis of Tropospheric Wet Delay Series Monitored by GPS Network PPP Technique During Extreme Rainfalls</i>	彭微之、 彭錕垚、 江凱偉	EI 論文
2	第 28 屆空間資訊研討會, 台灣中壢 提送: 2009.06.22 接受: 2009.06.29 刊登: 2009.07.24	利用精密單點定位技術結合 GPS 網探討氣象事件: 以辛樂克颱風和梅雨為例	彭微之、 葉燕樺、 江凱偉	
3	第 28 屆空間資訊研討會, 台灣中壢 提送: 2009.06.22 接受: 2009.06.29 刊登: 2009.07.24	利用精密單點定位估計絕對天頂對流層延遲量與可降水量之研究	吳曉雯、 楊名、 江凱偉	
4	投稿至 Survey Review 提送: 2010.07.05	Analysis of the Absolute Tropospheric Wet Delay Series Estimated by GPS Network PPP Technique and	江凱偉、 彭微之、 張秀雯、 蔡孟倫	審核中 (SCI 論文)

		Accumulated Precipitation During Extreme Rainfalls		
--	--	---	--	--

第七章 結論與建議

1. 已成功開發一個利用精密單點定位 (PPP) 方法計算絕對天頂對流層延遲的軟體。
2. 經與陽明山、北港站水汽輻射計 (WVR) 觀測得到之絕對天頂對流層濕延遲 (ZWD) 比較，本計畫開發之 PPP 計算軟體約可達到 1.5~1.6 cm 的天頂方向對流層延遲觀測精度。
3. 完成分析處理 2009 年全年台灣本島 179 個中央氣象局地面氣象站觀測資料，估計各 e-GPS 站之絕對天頂對流層乾延遲 (ZHD)。
4. 檢核點精度檢驗結果顯示，天頂對流層 ZHD 估值與檢核點之實際觀測值之差異在 mm 等級，整體平均精度 (RMS 值) 為 $\pm 0.23\text{cm}$ 。
5. 使用 PPP 技術完成分析處理 2009 年台灣本島 e-GPS 站連續之觀測資料。處理的資料為全年 365 天的觀測資料，且每日處理站數均超過 50 站。在獲得各 e-GPS 站絕對天頂對流層總延遲(ZTD) 估值之後，減去由氣象資料推估所得之 ZHD，即可獲得各站的 ZWD 估值。
6. 已成功發展出一個臺灣區域性對流層延遲修正模式，可應用於台灣地區之 GPS 衛星定位解算，包含台灣本島以及外島，外島地區包含澎湖、金門、馬祖、綠島以及蘭嶼。由於外島地區並未透過檢核點進行精度檢核，因此本計畫精度檢核所描述的精度分析成果僅針對本島地區。

7. 此區域性對流層延遲模式是以 Modified Hopfield 模型為基礎，與國土測繪中心目前採用之 Trimble GPSNet 核心軟體的內建對流層延遲修正模型相同，因此兩者具有很高的相容性。
8. 利用此區域性模式計算全台均勻分布的 14 個檢核點之 ZTD，並且與檢核點之 e-GPS 真實觀測值進行精度比較，整體平均精度 (RMS 值) 為 ± 4.77 cm。
9. 比較台灣區域性對流層延遲修正模式與三種全球模式在 14 個檢核點之模式值，區域與全球模式之平均差值約為 20 cm，且區域性模式正確反映出台灣各地 ZTD 之季節變化，其變化趨勢與檢核點之 e-GPS 真實觀測值一致。
10. 在導航單點定位成果精度評估方面，使用台灣區域性對流層延遲修正模式主要會造成高程方向成果之差異；使用區域性修正模式進行定位所得的高程坐標較為接近真值，每日平均高程值之誤差約可減少 50%。
11. 本計畫所發展出的臺灣區域性對流層延遲修正模式，是基於 2009 年的 e-GPS 站觀測資料。未來若需要增加模式的可靠度與代表性，可適度增加觀測資料的時間長度。

參考文獻

1. 劉明揚 (2001), 大氣測計學, 國立編譯館。
2. 汪俊寰、史天元 (2000), ”以全球定位系統估算大氣濕延遲量”, 測量工程, 第四十二卷, 第三期, pp. 3-16.
3. 劉說安 (2006), 94 年度衛星追蹤站水氣微波輻射儀建置工作期末報告, 內政部。
4. 楊名、江凱偉 (2009), 97 年度全球導航衛星系統(GNSS)資料聯合處理技術期末報告, 內政部國土測繪中心。
5. 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。
6. Alan, D., and Shardlow, P., (1995). The Global Positioning System as a Passive Integrated Atmospheric Water Vapor Sensing Device, Proceedings SPIE, Vol. 2582, pp.166-177.
7. Agterberg, F. P., (2007). Georges Matheron: Founder of spatial statistics, Earth Sciences History, Vol. 23, no. 2, pp. 205-334.
8. Awange, J.L., and Grafarend, E.W., (2005). Solving algebraic computational problems in geodesy and geoinformatics, New York, Springer.
9. Black, H.D., and Eisner, A., (1984). Correcting Satellite Doppler Data for Tropospheric Effects, Journal of Geophysical Research, Vol. 89, no. D2, pp. 2616-2626.
10. Bevis, M., Businger, S., Herring, T.A., Rocken, C., Anthes, R.A., Ware, R.H., (1992). GPS Meteorology: Remote sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System, Journal of Geophysical Research, Vol. 97, no. D14, pp. 15787-15801.
11. Brocard, E., John, V. O., Buehler, S. A., Von Engel, A., Eriksson, P., Kuhn T., Koenig-Langlo, G., (2006). Understanding the variability of clear-sky outgoing long-wave radiation based on ship-based temperature and water vapour measurements, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 132, no. 621B, pp. 2675-2691.
12. Brunner, F.K., and Welsch, W.M., (1993). Effect of the Troposphere on GPS Measurements, GPS World, Vol. 4, no. 1, pp. 42-51.

13. Businger, S., Chiswell, S.R., Ulmer, W.C., Johnson, R., (1996). Balloons as a Lagrangian Measurement Platform for Atmospheric Research, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, no. D2, pp. 4363-4376.
14. Cai, C., and Gao, Y., (2007). Performance Analysis of Precise Point Positioning Based on Combined GPS and GLONASS, *ION GNSS 20th ITM*, pp.858-865.
15. Chiles, J.P., and Delfiner, P., (1999). *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. Wiley Interscience.
16. Coster, A. J., Niell, A.E., Solheim, F.S., Mendes, V.B., Toor, P.C., Buchmann, K.P., Upham, C.A., (1996). Measurements of Precipitable Water Vapor by GPS, Radiosondes, and a Microwave Water Vapor Radiometer, *Proceedings ION GPS-96*, pp. 625-634.
17. Dach, R., Beutler, G., Bock, H., 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.
18. DBAR 大氣研究資料庫 <http://dbar.as.ntu.edu.tw/>
19. De Haan, S., (2006). National/regional operational procedures of GPS water vapour networks and geodetic international procedures, *Instruments and Observing Methods Report no. 92*, World Meteorological Organization, Netherlands.
20. De Smith, M. J., Goodchild, M. F. and Longley, P., (2007). *Geospatial analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools*, Matador.
21. Deutsch, C.V., and Journel, A.G., (1997). *GSLIB: geostatistical software library and user's guide*, Oxford University Press.
22. Dodson, A. H., Shardlow, P.J., Hubbard, L.C.M., Egegered, G., Jarlemark, P.O.J., (1996). Wet tropospheric effects on precise relative GPS height determination, *Journal of Geodesy*, Vol. 70, no. 4, pp.188–202.
23. Goovaerts, P., (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*, Oxford University Press, Inc.

24. Gutman, S.I., Sahm, S.R., Denjamin, S.G., Smith, T.L., (2004). GPS water vapor observation errors, Eighth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface, Seattle, WA.
25. Hieb, M., (2003). Water vapour rules the greenhouse system. (Downloaded from http://www.grocraft.com/WVFossils/greenhouse_data.html).
26. Herring, T.A., (1992). Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data, Proceedings of the Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, Netherlands, no. 36, pp. 157-164.
27. Hidore, J.J., (1972). A Geography of the Atmosphere, 2nd edition, Iowa, Wm. C. Brown Company Publishers.
28. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Collins, J., (2001). Global Positioning System: Theory and Practice, New York, Springer-Verlag.
29. Hopfield, H.S., (1972). Tropospheric range error parameters-further studies, Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University, Baltimore, MA.
30. Ifadis, I.I., (1986). The Atmospheric Delay of Radio Waves: Modeling the Elevation Dependence on a Global Scale, Technical Report no. 38L, Chalmers U. of Technology, Göteborg, Sweden.
31. Janes, H.W., and Langley, R.B., (1991). Analysis of Tropospheric Delay Prediction Models: Comparisons with Ray-tracing and Implications for GPS Relative Positioning, Bulletin géodésique, Vol. 65, no. 3, pp.151-161.
32. Kitanidis, P. K., (1997). Introduction to Geostatistics. Cambridge University Press.
33. Kouba, J., and Héroux, P., (2001). GPS Precise Point Positioning Using IGS Orbit Products, GPS Solutions, Vol.5, no.2, pp.12-28.
34. Krige, D. G., (1951). A statistical approach to some mine valuation and allied problems on the Witwatersrand, Master's thesis, University of Witwatersrand.

35. Lagrange, J. L., (1760). Essai d'une nouvelle methode pour determiner les maxima et les minima (digital version). In *Miscellanea Taurinensia*, pp. 335–362. Göttinger Digitalisierungszentrum, digitized from the 1760–1761 publication.
36. Lanyi, G., (1984). Tropospheric Delay Effects in Radio Interferometry, The Telecommunications and Data Acquisition Progress Report, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, Vol. 42-78, pp. 152-159.
37. Leick, A., (2004). *GPS Satellite Surveying*, John Wiley & Sons, Inc.
38. Li, P.W., Wang, X.Y., Chen, Y.Q., and Lai, S.T., (2005). Use of GPS singal delay for real-time atmospheric water vapor estimation and rainfall nowcast in Hong Kong, The First International Symposium on Cloud-prone and Rainy Areas Remotes Sensing, University of Hong Kong, HK, China.
39. Liou, Y.A., Teng, Y.T., Van Hove, T., and Liljegren, J., (2001). Comparison of precipitable water observations in the near tropics by GPS, microwave radiometer, and radiosondes. *J. Appl. Meteor*, Vol. 40, no. 1, pp.5-15.
40. Liou, Y.A., and Huang, C.Y., (2000). GPS observations of PW during the passage of a typhoon, *Earth Planets Space*, Vol. 52, No. 10, 709-712.
41. Matheron, G., (1963). Principles of Geostatistics,” *Economic Gelo.*, Vol.58, pp. 1246-1266.
42. Matlab Manual
<http://www.mathworks.com/products/statistics/demos.html?file=/products/demos/shipping/stats/wnlstdemo.html#7>
43. Maybeck, P.S., (1979). *Stochastic Models, Estimation, and Control*, Academic Press Inc., New York.
44. Michelsen, M.W., (1998). GPS Noise Benefits Weather Forecasting. *Earth Observation Magazine*. (Download from: http://www.eonline.com/Common/Archives/1998oct/98oct_michael.html).
45. Misra, P., and Enge, P., (2001). *Global Positioning System Signal, Measurements, and Performance*, Ganga-Jamuna Press, Lincoln, MA.

46. Niell, A. E., (1996). Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, no. B2, pp.3227–3246.
47. Parkinson, B.W., and Spilker, Jr. J., (1996). *Global Positioning System: Theory and Applications Vol. I*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, DC.
48. Ramirez, J. A., Trujillo, E., and Elder, K., (2007). Topographic, Meteorologic, and Canopy Controls on the Scaling Characteristics of the Spatial Distribution of Snow Depth Fields, *Water Resources Research*, doi:10.1029/2006WR005317.
49. Richmond, A. D., (1983). *Solar-Terrestrial Physics: Principles and Theoretical Foundations*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
50. Rocken, C., Ware, R., Van Hove, T., Solheim, F., Alber, C., and Johnson, J., (1993). Sensing Atmospheric Water Vapor with the Global Positioning System, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 20, no. 23, pp. 2631-2634.
51. Rocken, C., Anthes, R.A., Exner, M., Hunt, D., Sokolovskiy, S., Ware, R., Gorbunov, M., Schreiner, W., Feng, D., Herman, B., Kuo, Y.H., and Zou, X., (1997). Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, no. D25, pp. 29849-29866.
52. Saastamoinen, J., (1973). Contributions to the theory of atmospheric refraction. Part II. Refraction corrections in satellite geodesy, *Bulletin géodésique*, Vol. 105, no, 1, pp. 13-34.
53. Seidel, D.J., (1995). Water vapour: distribution and trends (Download from: <http://www.wiley.co.uk/wileychi/egec/pdf/GB085-W.pdf>)
54. Shen, X., and Gao, Y., (2002). Kinematics Processing Analysis of Carrier Phase-based Precise Point Positioning, *Proceedings of FIG XXII International Congress*, Washington, DC.
55. Shrestha, S.M., (2003). Investigations into the Estimation of Tropospheric Delay and Wet Refractivity Using GPS Measurements, Master Thesis, University of Calgary, Alberta, Canada.

56. Skone, S., (2001). Atmospheric Effects on Satellite Navigation system, Proc. ENGO 633 Course Lecture Notes, Calgary, Canada.
57. Schüler, T., (2001). On Ground-based GPS Tropospheric Delay Estimation, dissertation, Munich, Universitaet der Bundeswher.
58. S and TR (2004). Tropopause Height (Download from: https://www.llnl.gov/str/March04/pdfs/03_04.2.pdf).
59. Tao, W., Gao, Y., Zhang, Y., (2007). Real-time Water Vapor Sensing/Measurements with Precise Point Positioning Algorithm and Canadian Geodetic (GPS) Network, ION GNSS 20th ITM, pp. 2890-2897.
60. Xu, G.C., (2003). GPS Theory, Algorithms and Application. Springer-Verlag berkin Heidelberg, New York.
61. Yuan, L.L., Anthes, R.A., Ware, R.H., Rocken, C., Bonner, W.D., Bevis, M.G., Businger, S., (1993). Sensing climate change using the global positioning system, Journal of Geophysical Research, Vol. 98, no. D8, pp. 14925-14937.
62. Zhang, J.H., (1999). Investigations into the Estimation of Residual Tropospheric Delays in a GPS Network, Master Thesis, University of Calgary, Albert, Canada.
63. Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M., Webb, F.H., (1997). Precise Point Positioning For the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks. Journal of Geophysical Research, Vol. 102, no. B3, pp. 5005-5017.

附錄一 期中審查委員意見及修正辦理情形

審查委員	審查意見	期中報告修正情形	期末報告辦理情形
劉教授說安	1. P8, 「水汽影響延遲對於整體而言影響較小, 其值在天頂方向約為 1 至 80 公分」, 請再確認天頂方向的延遲量。	已按照建議修正文字 (P10)	
	2. P9, 最後一段「發展」文字重複, 另外再文章用語上宜保守, 除非本文未來有朝此方面發展之計畫。	已按照建議修正文字	
	3. P17, 「水汽分佈與內容...」, 文字用語請修正。	已按照建議修正文字 (P18)	
	4. P18, 「大氣層需藉由轉換係數先轉換成天頂的水汽含量 (zenithal Integrated Water Vapor, IWV), 轉換係數取自於無線電高空測候器不同地方與其氣候相關資料的回歸分析。」一節, 請修正用語並增加說明回歸分析原理。	已按照建議修正章節內容 (P20)	
	5. P22, 「在對流層與平流層之間有個較扁平的分層, 稱為對流層頂, 在冬天時, 平均高度為 8 公里...」一節, 請確認數據內容。	已按照建議修正文字 (P23)	
	6. P24, 「k1、k2 和 k3 為折射常數」, 請確認翻譯用詞, 並建議提供英文原文。	已按照建議修正文字 (P25)	
	7. P26-27, 「由於對流層上方重量的影響...」一節, 與 P22、31 內容重複, 請修正。	已按照建議修正	
	8. P50, 「對流層延遲主要有兩個延遲誤差影響...」一節, 與 P8 內容重複, 請修正。	已按照建議修正文字	
	9. 考量本案主持人、共同主持人專業及原定工作項目已繁重, 宜專注不宜過於擴張工作範疇	遵照辦理	

陳助理教授國華	1. 本報告內容具體豐富，予以高度肯定。	謝謝肯定		
	2. 建議補充部分內容，如解算時使用的修正模式，WVR 資訊背景，PPP 定位精度，空間推估精度（氣象資料），用以釐清誤差來源，應用此模式於精度提升程度，為何採用 22.5°、122.5° 方位角進行分析等等之銜接敘述，以增加報告可讀性。	已補充說明下列內容： 1. 解算時使用的修正模式(P57~61) 2. PPP 定位精度 (P80~108) 3. WVR 資訊背景 (P135) 4. 空間推估精度(氣象資料) (P148~149) 5. 採用 22.5°、122.5° 方位角分析(P142)		
	3. 未來多系統、現代化之後可有進一步之模擬分析。	已於會場回答，委員已了解。		
	4. 可否評估此模式之預估精度？可預估多久時間之後其成果亦符合需求。	已於會場回答，將於期末報告詳述成果精度評估。	模式精度已詳述於第五章「成果與精度分析」(P147~153)。	
	5. 對流層之週期性隨季節、月、年之變化可有顯著特性，區域變化是否明顯。	已於會場回答，委員已有所了解，將於期末報告中詳述。	對流層之週期性及區域變化相當明顯，已詳述於第五章中 (P150~153)。	
劉副教授明揚	1. 執行單位認真，內容具體並與委辦工作進度符合。	謝謝肯定		
	2. 報告中之名詞、單位應一致，同時部分內容文字有誤，內容亦有數處重複，建議斟酌修改。	已按照建議修正文字內容		
	3. 本計畫開發之對流層延遲估算模式之優點、準確度等有那些突破，建議能詳細分析。	已於會場回答，模式建立完成後，會進行分析，並詳細討論於期末報告中。	已詳述於第五章「成果與精度分析」中 (P147~154)。	
	4. 本計畫氣壓之高度修正採用 Bai and Feng (2003) 公式，因為本公式未考慮大氣之溫度是否適宜，建議可考慮由理想氣體定律導出之氣壓高度修正公式。	已於會場回答，委員已有所了解，會在期末報告中全面改用建議公式。	已依照委員意見全面改採建議公式。	

張教授嘉強	1. 本案執行內容與進度良善，特針對後續工作項目提供以下內容供參考。	謝謝指正	
	2. eGPS 資料涵蓋 1 年，目前是否以 2009 年為資料年份，其氣候異常之現象能否代表本案推估模型之適用性，請於考量。	2009 年氣候異常之現象無法代表推估模型之適用性，文字說明已補充於 5.2 節中(P138)。	
	3. 本案開發臺灣區域模式所採用函數模型擬對應之參考樣本為何？模式係分別提供乾溼分量或以總量模型為主？請予考量。	本案所產生之區域性對流層模式參考 Modified Hopfield 模型，並且將乾、濕分量分別進行模式化。文字說明已補充於 4.4 節中(P133~134)。	
	4. 未來針對本案模式與 3 種全球模式之差異分析係以延遲量為對象，抑或以定位精度之反應之反映為對象？請予考量。	由於建立模式之資料來自於 e-GPS 站天頂對流層延遲量，因此未來與全球模式之差異分析將以延遲量為比較對象，並詳述於期末報告中。	已詳述延遲量差異分析與單點定位精度分析於第五章「成果與精度分析」中(P150~154)。
	5. P49 所提 IGS 精密星曆資訊已在近日更新，請予更新。	已按照建議修正表 3.3(P65)	
	6. 本案須於期程內提交國際期刊論文至少一篇，請考量進度適時完成。	謝謝，將於期間內完成。	
王科長成機	1. 本案成大團隊相當用心，超越本案要求的工作量，研究成果值得肯定。	謝謝肯定	
	2. 本案氣象資料之推估是將氣象站資料高度修正至平均海水面，進行空間推估，再高度補償求得 e-GPS 站之氣象資料，如此推估之精度可否分析，與有實測氣象資料之 e-GPS 站比較？如精度不能滿足要求，未來是否有其他因應對策。	已於會場回答，委員已有所了解，將於期末報告詳述。	已詳述氣象資料空間推估乾延遲量精度分析於第 5.3 節中(P147~148)。推估精度已達到要求。
	3. 本案使用之 DTM 是如何得到？請說明。	已於會場說明此 DTM 僅為示意圖，不會實際使用，委員已經了解。	

王科長成機	4. P9 有提到本案可協助強降雨事件之特徵分析，為期中報告尚未有相關研究成果，期末報告請稍加著墨。	已於會場回答，委員已有所了解，會在期末報告詳述。	已詳述於第 5.8 節中(P156~169)。	
	5. P91 所提，PPP 推估之 ZTD 與 WVR 比較平均差異為 7.51mm 精度為 14.05mm，此精度之敘述應是差異的 RMS，請修正。	已按照建議修正文字內容(P137)		
劉課長至忠	1. 本案處理資料量多，建議期中報告應於適當地點敘明如何計算分析？產生何種成果？各階段中間產物及輸入、輸出資料為何？是否達到預期目標等等，以利閱讀。	已按照建議修正，研究資料分析流程主要可分成三部分資料來源，分別為中央氣象局原始氣壓資料、e-GPS 站天頂對流層延遲量以及探空儀原始資料，已將其詳細內容及步驟描述新增於 4.2 節 (P124~126)。		
	2. 本案所產生之區域性對流層模式可提供本中心辦理中之發展廣域差分定位系統使用，請預為規劃模式銜接問題，另對於所採用模式與文中所提 3 種全球模式何者為參考模型？是否一定須要實測氣象資料？未來如何處理請補充說明。	本案所產生之對流層模式將會參考國際上廣泛通用之 Modified Hopfield 模型，因此可提供廣域差分定位系統使用，且不需要輸入實測氣象資料。補充說明敘述已加入於 4.4 節中(P134)。		
朱簡任技正金水	1. 本案所發展模式是否適用於外島地區？請於報告中補充說明。	本案所發展的模式並不適用於外島地區，其詳細內容已按照建議補充於(P134)		
	2. P12，工作進度月份建議用實際的月份。請修正。	已按照建議修正內容(P14)		
	3. P13，所規劃的成果發表會時間點，請加入正確時間。	已按照建議修正 P14、P153 之內容		
	4. P37，文中所提「電子基準站」請於報告全文中統一用語。	已按照建議統一稱為 e-GPS 站		
	5. P46，§3.2.1 節第一項誤差應為「接收儀時錶差」而非「衛星時錶差」，請更正。	已按照建議修正 (P57)		

	6. P65, 表 3.5 中所提「GPS 機收儀」應為「GPS 接收儀」請更正。	已按照建議修正 (P75)	
業務單位	1. P24, L5, 「電離層」是中性的 的大氣層, 是否為「對流層」。	已按照建議修正 P(25)	
	2. P34, L7, 受限於「基」已知 「準」站, 請修正。	已按照建議修正 (P34)	
	3. P42, 公式 3.1 之 cdl 符號未 說明。	已按照建議修正 (P42)	
	4. P45, 參考文獻應為(楊名、 江凱偉, 2009), 請更正。	已按照建議修正	
	5. P46, L2: 衛星天線「象為」 中心, 請更正。	已按照建議修正 (P57)	
	6. P48, §3.2.2 「精密星曆」建 議更正為「軌道誤差」。	已按照建議修正 (P61)	
	7. P93, 5.2 節, 是否對所處理 各站列表(可置於附錄)及 處理天數, 是否有各站 1-8 月之延遲量的彙整表?	將於期末報告中整理出 1-12 月間所處理各站之名稱以及所處理天數之彙整表。並將各站成果以電子檔型式交於甲方。	已將完整之彙整表電子檔寄交業務單位。
	8. P101, 5.6 節, Step4, 已知 e-GPS 「正高」? 目前本中心 e-GPS 系統並無提供正高 資料。	已於 P.146 補充說明由 e-GPS 站之正高是由已知橢球高減去內政部台灣地區大地起伏模式值而得。	
	9. 有關成果發表會辦理議程 及地點請成大儘速規劃, 並 正式發函通知本中心。	已於會場回答, 並已 99 年 1 月 28 日正式發函, 函請國土測繪中心惠予同意。	已於 99 年 3 月 31 日辦理完竣。

附錄二 期末審查委員意見及修正辦理情形

審查委員	審查意見	期末報告修正情形
劉教授說安	1. 成大團隊業依規定完成本計劃，內容相當豐富，簡報作得很好。	謝謝劉委員肯定
	2. 部分錯別字或不一致在業務單位報告中有呈現，列舉數項須留意： a. P19，地基（in-situ）是否應為（ground-based）。 b. P143，微波「幅」射計，應為「輻」。	已按照建議修正文字內容（P19）。 已按照建議修正錯別字。
	3. 論述偏差宜修正： c. P10，第三段，「前者對於 GPS 定位誤差影響非常大」，存在邏輯問題，大氣乾延遲大，不代表對定位影響大，文字用語請修正。 d. P25，L4，「GPS 訊號頻率與電離層相關」，存在邏輯問題，兩者應是不相關，文字用語請修正。	已按照建議修正文字內容(P10)。 已按照建議修正文字內容(P25)
	4. 使用 GPS 估算 PW 相當準確，但 PW 與降雨量關係複雜，不易定兩者間關係。	已於現場提出補充說明。
洪副教授本善	2. P33，Niell(1996)映射函數於北緯 43。—75。擁有較佳精度，請補充說明低緯度的使用精度相對差異多少，尤其強調臺灣地區為何？	已於現場提出補充說明，委員已有所了解。該參考文獻中並未提供明確之數量級比較。
	3. P34，表 2.1 及 2.2 內之乾、濕分量係數的數學符號建議修改為 ahydro、bhydro、chydro 及 awet、bwet、cwet，以與 P33 公式（2.17）及（2.18）呼應。	已按照建議修正

洪副教授本善	<p>4. 寫作格式建議：</p> <p>a. P21, 本文內同一句話文字有兩份參考文獻得引證時，年代早的文獻置於前（先後排序）。</p> <p>b. P44, 倒數 L9, 公式 (BIF) 多一個下標 1, 請刪除。</p> <p>c. P61, L3, 請確認修正文字「r` 的質量點 p 與月球間的 1/r`」距離。</p> <p>d. P61, L6, 多打「方程式」請刪除。</p> <p>e. P122, 倒數第二段 L2, 「ordinary kriging」, 名字請大寫 (Kriging)。</p>	已按照建議修正文字內容(P123)。
張教授嘉強	<p>1. 本案所開發 PPP 計算程式軟體，有無需要提供 GPS 靜態或動態資料型態之功能，輸出選項能否提供坐標成果精度、接收儀時錶誤差及相位起始未定值之成果顯示數值或圖形。</p>	已於現場提出口頭補充說明，委員已有所了解。
	<p>2. 本案所建立之臺灣地區對流層延遲模式在 PPP 模式下之運作成效已見，但其是否可配合 GPSnet 格式進行運作之考量為何？</p>	已按照建議修正
	<p>3. 報告書表 3.7「浮標」用詞建議改為「移動站」或「定位測試點」。表 3.8 之度、分、秒建議更改為一般科學符號。表 3.9（及類似評估精度之表格）所使用之單位建議由「公尺」改為「公分」以利閱讀。</p>	已按照建議修正
王科長成機	<p>1. 本案成大團隊相當用心，成果亦相當豐碩且有正面的成果，值得肯定。</p>	謝謝肯定
	<p>2. 報告中 P49、50 之公式部分仍有誤，請檢視修正。</p>	已按照建議修正
	<p>3. 本研究成果「臺灣區域性對流層延遲估算模式」與全球性幾種模式比較，成果都較佳，請研究團隊協助應用於國土測繪中心所使用之 GPSnet 軟體中。</p>	依建議辦理

王 科 長 成 機	4. 本案研究成果佳，對於臺灣地區定位精度提升有所助益，惟此模式僅用一年之資料，建議應可再增加多年的資料，使本案開發之修正模式更臻完美。	已於現場口頭補充說明，委員已有所了解，並建議國土測繪中心擬訂後續計畫辦理。
朱 簡 任 技 正 金 水	1. P176，本案發展之修正模式，可應用於「臺灣本島地區」之 GPS 解算，所發展模式是否適用於外島地區？請於報告中補充說明。	已於會場回答，委員已了解，並且已修正文字內容(P176)。
	2. P177，提及增加模式可靠度與代表性，可增加觀測時間長度到 3 年，請問 3 年如何定義，請補充說明。	已於會場回答，委員已有所了解。並已修正文字內容(P180)。
	3. P175，所發表各篇文章，請將摘要置於報告附錄，另全文電子檔請附於光碟片，以利後續參考。	已按照建議修正
	4. P150，各 e-GPS 檢核點請標註中文站名，以利閱讀。	已按照建議將文字內容修正(P150)
	5. P147，圖 5.6 缺乏圖例說明，請補充更正。	已按照建議修正圖例說明(P148)
	6. 本報告書中「公佈」一詞請修正為「公布」。	已按照建議修正
業 務 單 位	1. 報告書增加中英文摘要及關鍵字。	已按照建議增加中英文摘要與關鍵字
	2. 程式修改部分請於適當位置增加本中心委託開發等文字（關於）。及主畫面部分表單文字中文化。	已按照建議修正
	3. P17，圖 2.1 與說明無法對應。	已按照建議修正
	4. P18，圖 2.3 曲線及圖例模糊。	已按照建議修正

業 務 單 位	5. P20-21, §2.2 標點符號有問題, 幾乎每句話皆句號。	已按照建議修正
	6. P40、42, 圖 2.16、2.17 建議時間點皆更新至 2010.6.30。	已按照建議修正
	7. P80, 建議增加 ITRF2005 投影至 2 度分帶功能 (合約未規定, 建議於保固其內完成)。	已增加此功能。
	8. P89, 表 3.9 之 U 方向精度甚佳? 請補充說明。	已按照建議修正文字與補充說明。
	9. P155, 使用台灣區域改正模式對高程方向的改善明顯, 可否請增加補充加強說明原因。	已補充說明於報告中(P157-158)。
	10.P130, Doy 218–221? 那一個颱風侵襲?	已於 P131 中說明 (莫拉克颱風)。
	11.P160-169, ZWD 與雨量時間序列圖之圖例「Wet dealy」錯誤, 請修正。	已按照建議修正
	12.請於適當增加本研究所發展之臺灣區域對流層模式加入 GPSNet 可行性及策略方法說明。	已依照建議增加策略方法說明於 P144。

附錄三 提送論文摘要

Time Frequency Analysis of Tropospheric Wet delay Series Monitored by GPS Network PPP Technique during Extreme Rainfalls

Wei-Chih Peng, Kun-Yao Peng and Kai-Wei Chiang
Department of Geomatics, National Cheng Kung University,
No. 1, University Road, Tainan 701, Taiwan
Tel: (886)6-237-0876 Fax:(886)6-237-5764
Email: p6697404@mail.ncku.edu.tw

Abstract

Typhoons are the most serious weather system that strike Taiwan annually. They can seriously cause damages of agriculture, industry and human casualties. Historical records show that on the average, there are about 20 typhoons form in this area each year and among them three to four may invade Taiwan. The economical loss could be up to 2 billion NT dollars.

Many meteorological sensors are available for studying the patterns and characteristics of those meteorological events. Conventional atmospheric delay measurements are obtained by using Radiosondes and Water Vapor Radiometer (WVR). Their accuracies are well recognized; however, the price of these instruments is too expensive to operate in extreme weather condition. On the other hand, GPS could work under all weather conditions. Coster et al. compared the performance of WVR, Radiosondes and GPS based tropospheric wet delay estimation, and the test accuracies of GPS estimated TWD agreed with WVR and Radiosondes. However, the spatial resolution of meteorological instruments is too weak to monitor the weather events in the short periods. Recently, many studies have used GPS as an alternative meteorological sensor due to the devastating impact of global climate change. The distributed GPS stations around the earth can serve as a near real-time meteorological sensor network that can be used to detect those potential threats. Continuous and well-distributed measurements of water vapor are

of great interest for numerical weather forecasts, climate research, and atmospheric studies.

Traditionally, Fourier Transform (FT) is used to extract meaningful information from time series in frequency domain. It transforms the signal into the frequency domain but loses time information. When looking into an FT of a signal, it is impossible to know when or where a particular event took place. Being a signal's time-scale analysis method, Wavelet transform (WT) is better than FT due to its high resolution characters, good localization both in time and frequency domain and its capacity of analyzing signal at multi-time scales. In addition, the wavelet analysis also has the ability of finding the discontinuous characters of signals. Usually, the WT is used as a tool to research the topics of multi-time scales analysis. Therefore, this study also utilizes Continuous Wavelet Transform (CWT) to extract meaningful information in both time and frequency domains. It provides Multi-Resolution Analysis (MRA) to overcome the limitations of the FT. MRA provides a superior way to analyze non-stationary signals in comparison to FT and STFT. The CWT can be regarded as a series of band pass filter (high pass filters) whose centre frequency varies with the scale and sampling rates. To investigate the characteristics of extreme rainfall triggered by typhoon, the temporal relationships between GPS PPP estimated ZWD series and accumulated precipitation series are investigated through cross correlation analysis. The cross correlation function measures the dependence of the values of one signal on another signal. Therefore, this study tries to use convolution algorithm to look into the temporal relationship between GPS network PPP derived ZWD and extreme rainfall triggered by typhoons. The cross correlation analysis is applied with GPS PPP estimated ZWD series and accumulated precipitation series collected at those sites during Typhoon Morakot Typhoon Sinlaku to investigate their spatial and temporal relationships. In addition, the time and frequency analysis including FFT and CWT are applied to investigate the characteristics of extreme rainfalls triggered by those typhoons.

This study propose novel procedures facilitate GPS network PPP derived ZWD for investigating the characteristics of extreme rainfall triggered by typhoons, the temporal and spatial relationships between GPS network PPP derived ZWD and rainfall is essential. Since typhoons can move as

fast as 20 km/hr, a time frequency analysis tool coupled with a sensor network that can detect the event taking place within an hour is desired for a small island such as Taiwan. The extreme torrential rains often bring numerous rainfalls so that causes great casualties and economical loss.

The preliminary results by applying cross correlation analysis of GPS PPP estimated ZWD series and accumulated precipitation series collected at those sites during Typhoon Morakot Typhoon Sinlaku illustrate that GPS PPP estimated ZWD series are ahead of accumulated precipitation at those e-GPS sites by 3 to 5 hours in general cases. This time advancement is considered critical for developing near real time warning system for extreme rainfall triggered by typhoons. However, the consistency of this time advancement of GPS PPP estimated ZWD series needs to be investigated thoroughly using more measurements from more sites and typhoons in the future.

The time and frequency analysis of GPS PPP estimated ZWD series and accumulated precipitation series collected at those sites during Typhoon Morakot and Typhoon Sinlaku. The FFT analysis with GPS PPP estimated ZWD series does reveal the existence of certain relatively high frequency responses within the scope of one hour which can not be done through conventional meteorological sensor network. In other words, it is able to catch sudden variation of ZWD which is strongly correlated to accumulated precipitation series. The CWT analyses are capable of providing the time information of the occurrence of certain event. Generally speaking, the well-distributed e-GPS network can be considered as supplemental meteorological sensors to monitor the characteristics of extreme rainfall triggered by typhoon. With improved ultra-rapid products provided by IGS in the near future, or with real-time precise satellite orbit and clock products provided by other institutions, a near real-time GPS network PPP based meteorological sensors can provide useful information for developing early warning systems for extreme rainfalls triggered meteorological events like typhoons, plum rains, and seasonal thunderstorms in this region.

Keywords: GPS meteorology, PPP, Tropospheric delay

利用精密單點定位技術結合 GPS 網探討氣象事件:以辛樂克颱風和梅雨為例

Using GPS Network PPP as Meteorological Sensors in Taiwan: Case Studies of Plum rains and Typhoon Sinlaku

彭微之¹ 葉燕樺¹ 江凱偉²

Wei-Chih Peng Yen-Hua Yeh Kai-Wei Chiang

摘要

本研究利用 e-GPS 站當作觀測網，使用精密單點定位技術求得 GPS 站對流層總延遲量，並與中央氣象局所提供的雨量資料來研究梅雨和辛樂克颱風發生前後的相關性。近年來，GPS 被廣泛應用在氣象研究，吸引許多的學者和學術機構利用 GPS 從事相關的研究，精密單點定位是一種極具潛力的技術。颱風和梅雨是每年影響台灣最重要的氣象事件，每年因為颱風或梅雨的影響，造成農業經濟的損失，亦危及到百姓的財產；儘管如此，颱風和梅雨帶來龐大的雨量，也讓台灣的水庫得以發揮蓄水的功用。本次實驗數據為 2008/9/11~2008/9/17(辛樂克颱風)和 2008/6/1~2008/6/7(梅雨季節期間)的雨量資料和 GPS 觀測資料；實驗流程為求解各測站對流層總延遲量，把對流層總延遲量與雨量資料皆作正規化處理比較，可清楚地比較對流層總延遲量與雨量在空間和時間上的變化；初步結果顯示，許多梅雨以及颱風的特性可由 GPS 網結合精密單點定位技術透過空間與時間分析得到。

關鍵詞:精密單點定位、對流層延遲量、颱風、水氣、降雨量

Abstract

This study aims to collect e-GPS stations and rainfall data provided by Central Weather Bureau to investigate the patterns of typhoon and plum rains in Taiwan. The Precise Point Positioning (PPP) technique is the proven algorithms, which attracts many researchers from GPS related studies. Plum rains and typhoons are regarded as important weather events in the Taiwan. Their impacts bring huge economic loss and plentiful rainfall. They are also the important water resources to fill the reservoirs in Taiwan. The data set applied was collected from Jun 1st 2008 to Jun 7th 2008 during typhoon Sinlaku and from Sep 11th to Sep 17th 2008 in plum rains season. The data processing strategy is to process e-GPS measurements with PPP technique to estimate the zenith tropospheric delay (ZTD). The ZTD value and rainfall data are normalized. The preliminary results show strong correspondences between the variations of ZTD and rainfall. Many characteristics could be identified through spatial-temporal analyses.

Keywords: Precise Point Positioning, Zenith tropospheric delay, Typhoon, Water vapor, Rainfall

-
- 1.國立成功大學測量及空間資訊學系 碩士生
 - 2.國立成功大學測量及空間資訊學系 助理教授

利用精密單點定位估計絕對天頂對流層延遲量與可降水量之研究

Estimation of Absolute Precipitable Water Using Precise Point Positioning Technique

吳曉雯¹² 楊名² 江凱偉³
Hsiao-Wen Wu Ming Yang Kai-Wei Chiang

摘要

當GPS衛星訊號穿越對流層時，因為對流層各層折射率不同，而產生延遲，稱為對流層延遲量。天頂對流層延遲量(Zenith Total Delay)包含由乾空氣引起的天頂乾延遲量(Zenith Hydrostatics Delay)以及濕空氣引起的天頂濕延遲量(Zenith Wet Delay)。利用經驗模式以及精確的氣象因子量測，可以準確地估計天頂乾延遲量到公厘等級。天頂濕延遲量與水氣有關，但其變化快速，較難以估計。天頂濕延遲量的變化反映對流層中水氣含量的變化。可降水量(Precipitable Water)可藉天頂濕延遲量乘上轉換常數而獲得，顯著的天氣變化例如颱風或是強降雨等與可降水量的變化存在相關性。而每年颱風帶來的強風及豪雨對台灣造成不少災害，因此準確的估計可降水量，在氣候變遷研究及災害防範方面皆有幫助。藉由精密產品如衛星星曆以及衛星時錶改正，精密單點定位可以估計絕對的天頂對流層延遲量，而不需架設參考站。本研究使用精密單點定位估計於2008年辛樂克颱風侵台期間各e-GPS站絕對的天頂對流層總延遲量。乾延遲部分可由廣泛分佈的中央氣象局觀測資料內插至e-GPS站後帶入模式計算；而將天頂乾延遲從天頂總延遲量扣除後可以獲得天頂濕延遲量，藉由轉換常數可以將天頂濕延遲量轉換為可降水量。比較e-GPS站可降水量與鄰近雨量站之雨量資料，可發現可降水量在強降雨發生前會快速上升；若降雨停止時，則可降水量會下降。利用本研究方法所得之結果顯示利用精密單點定位方法獲得e-GPS站天頂對流層濕延遲量為可行之方法。

關鍵詞：精密單點定位、地面氣象觀測值內插、絕對對流層濕延遲量、可降水變化

¹ 國立成功大學測量及空間資訊學系 碩士生

² 國立成功大學測量及空間資訊學系 教授兼主任

³ 國立成功大學測量及空間資訊學系 助理教授

Abstract

Because of the different refractive index in each layer, the satellite signals would be delayed while passing through troposphere. The zenith troposphere delay (ZTD) is composed of the zenith hydrostatic delay (ZHD) which caused by the dry air and

zenith wet delay (ZWD) which caused by the water vapor. By using the empirical model and accurate surface meteorological measurements, ZHD could be acquired precisely. Because the quick change of water vapor, the wet delay is hard to model. The change of ZWD reflect amount of liquid water in the atmosphere. The precipitable water (PW) would retrieve from ZWD by multiplying a factor. Relations between the change of PW and the occurrence of significant meteorological event such as heavy rain and typhoon were found. During the passage of typhoon every year in Taiwan, it not only accompanies with heavy precipitation but also causes a lot of damages. With the aid of precise satellite orbit and clock products, using precise point positioning (PPP) would retrieve the absolute ZTD without the reference station. In this study, the un-differenced e-GPS observations during the passage of typhoon in 2008 in Taiwan used to estimate the ZTD. The surface meteorological measurements at e-GPS stations were interpolated from all the surface meteorological stations which were set by the Central Weather Bureau. The measurements at e-GPS station level may be acquired by converting and interpolating meteorological measurements from surface meteorological stations level. Comparing PWV to the measurements of the precipitation at the nearest surface meteorological site, result shows the value of PWV increase suddenly before occurrence of heavy rain. Also, the PWV value decreases after rain stops. The results consist with expectations and reveal that is feasible to estimate the absolute PW by using PPP method.

KEYWORDS : Precise Point Positioning 、 Surface weather measurements interpolation 、 absolute zenith wet delay 、 variation of precipitable water

Analysis of the Absolute Tropospheric Wet Delay Series Estimated by GPS Network PPP Technique and Accumulated Precipitation During Extreme Rainfalls

¹*Kai-Wei Chiang, ¹Wei-Chih Peng, ¹Hsiao-Wen Wu, ¹Meng-Lun Tsai

¹Department of Geomatics, National Cheng-Kung University
No. 1, Ta-Hsueh Road, Tainan City 70101, Taiwan
Email: kwchiang@mail.ncku.edu.tw

ABSTRACT

Typhoons are the most serious weather systems that strike Taiwan annually. There are about four or five typhoons that affect Taiwan every year and bring destructive winds and extreme rainfalls, causing serious damage to agriculture and industry, as well as human casualties. In addition, so called plum rains are a unique climate phenomenon that occur annually only in Eastern Asia, including Taiwan and coastal China, because this region is located in a distinct monsoon area. This study proposes novel procedures to facilitate Global Positioning System (GPS) network Precise Point Positioning (PPP) derived Zenith Wet Delay (ZWD) to investigate the characteristics of extreme rainfall triggered by typhoons and plum rains by analyzing the temporal relationships between GPS network PPP derived ZWD and rainfall. Cross correlation analysis is applied to analyze the GPS PPP estimated ZWD series and accumulated precipitation series collected at several sites across the island during Typhoon Morakot and Typhoon Sinlaku, as well as the plum rains seasons of 2008 and 2009, in order to investigate their temporal relationships.

KEYWORDS: PPP, Extreme rainfalls, GPS meteorology.