

各式 IGS 天線相位中心改正模式影響之研究

黃立信^{1*} 鍾玉南²

¹ 國防大學理工學院環境資訊及工程學系空間科學所副教授
² 國防大學理工學院環境資訊及工程學系空間科學所研究生

摘 要

本研究以 Bernese5.0 軟體利用不同相位中心模式解算國內外追蹤站資料，以 TNML（新竹）為固定站計算其餘追蹤站點位及對流層總延遲，並以 IGS08 參考框架之公告坐標與 CODE 對流層參數進行精度驗證。在坐標精度驗證方面，以 igs01、igs05 及 igs08 相位中心模式求解之基線長，RMS 值以 igs08 模式最小，igs08 模式與 igs01 比較，其 RMS 值在 X、Y、Z 分量上，各自從 14.7mm、32.7mm、11.1mm，提高至 9.4mm、12.0mm、5.2mm；在對流層總延遲驗證方面，以 igs08 和 CODE 模式相較，其 RMS 值可由 13.2mm 改善至 4.4mm，以上分析證實利用不同相位中心改正模式計算，對 GPS 定位精度及對流層總延遲量，確實造成明顯的影響量。

關鍵詞：天線相位中心改正模式、對流層總延遲、IGS（國際 GNSS 服務）參考框架

The Effects of Different IGS Antenna Phase Center Calibration Models

Lih-Shinn Hwang^{1*} and Yu-Nan Chung²

¹ Department of Environmental Information and Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University

² Department of Environmental Information and Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University

ABSTRACT

This research selects TNML point in center of star-net for computing coordinates with Bernese 5.0 software for international tracking stations. The verification of accuracy adopts the coordinates of IGS08 reference frame and the CODE zenith tropospheric total delay. Analysis of accuracy for international tracking stations, compared igs01 with igs08 phase center calibration models, the RMS of X, Y, Z components can be improved from 14.7mm, 32.7mm and 11.1mm, to 9.4mm, 12.0mm and 5.2mm. Analysis of accuracy in zenith tropospheric total delay, compared igs08 with CODE model, the RMS values can be improved from 13.2 to 4.4mm. Summarized with above results shows that the highest accuracy could be achieved by applying igs08 antenna phase center calibration model under IGS08 reference frame. Meanwhile, it was significantly influenced the accuracy of GPS positioning and zenith tropospheric total delay by different antenna phase center calibration models.

Keywords: Antenna Phase Center Calibration, Zenith Tropospheric Total delay, IGS (International GNSS Service) Reference Frame

一、前言

目前國內許多研究利用 GPS 定位技術進行高程方面的應用包括驗潮站之監測、大地起伏差之測量、地層下陷之監測等，但 GPS 高程精度相較於平面精度約略差 2 至 3 倍[1]；要提升 GPS 定位精度必須考慮諸多改正參數，包括衛星軌道誤差、衛星時錶誤差、電離層延遲效應、對流層延遲效應、接收儀時錶誤差、多路徑效應及接收儀天線相位中心誤差等；如基線超過 100 公里以上或使用非差分技術，如精密單點定位 (Precise Point Positioning, PPP)，則須額外考慮衛星相位中心誤差、固體潮改正、海潮負載改正、極移參數、地球自轉參數等[2]。

自 2006 年 11 月 6 日隨著國際地球參考框架 ITRF2005 的更新，IGS 精密星曆之參考框架也更新為 IGS05 參考框架，其框架的更新除了點位坐標的更新外，最重大的改變為天線相位中心改正模式，從相對相位中心改正模式轉換至絕對相位中心改正模式；而 2011 年 4 月 17 日更新為 IGS08 參考框架時，亦對天線相位中心改正模式進行修正與更新[3]，天線相位中心改正的檔案名稱分別為 igs01.ATX、igs05.ATX 及 igs08.ATX，天線相位中心模式的轉變對於 IGS 參考框架及所有 IGS 產品產生影響，包括衛星精密星曆、衛星時錶改正、對流層延遲參數等，因此本研究分別以 IGS 組織所提供的 igs01、igs05 及 igs08 相位中心改正模式解算國際追蹤站與台灣追蹤站資料，利用瑞士伯恩大學所開發的 Bernese 5.0 計算軟體求解點位坐標及對流層延遲參數，探討相位中心改正模式在國際追蹤站全球網形以及台灣追蹤站區域網形對 GPS 定位精度及對流層參數估計的影響。

二、理論基礎

2.1 天線相位中心改正方法介紹

相位中心改正主要分為三種方法，實驗室法 (Anechoic Chamber Measurement)、相對檢校場度量法 (Relative Field Calibration) 及絕對檢校場度量法 (Absolute Field Calibration)，其改正方式分述如下。

2.1.1 實驗室法 (Anechoic chamber measurement)

實驗室法就是在無反射無線電波實驗室設置一個固定天線發射無線電訊號，另有一承載率定天線支撐架，該支撐架可獨立依兩個不同軸向旋轉，同時可在三個方向移動，兩天線之間距離約 1.8m，實驗室法天線校正配置圖如圖 1 所示[4]。率定時，首先在各種不同的方位角上旋轉天線使天頂距由-90 度變化至 90 度，當進行量測時，測試天線盡可能精確地以平均相位中心為旋轉點，並移動旋轉中心，直到相位中心隨仰角的變化 (+Z~-Z) 達到最小且對稱，此平移量即天線參考點與平均相位中心的偏移量。再由所得的記錄值，可獲得相位中的變化量。在實驗室法中，L1 與 L2 訊號須個別率定。

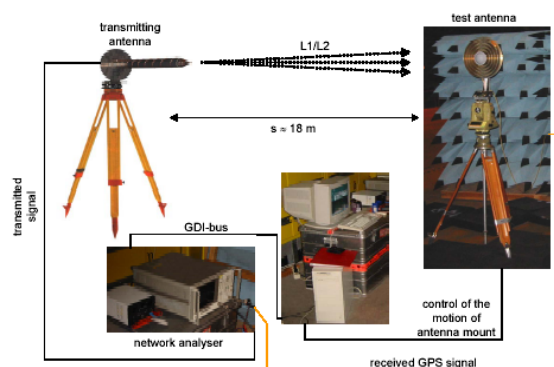


圖 1.實驗室法天線校正配置圖[4]。

2.1.2 相對檢校場度量法 (Relative field calibration)

美國國家大地測量局 (Nation Geodetic Survey, NGS) 以檢校場率定相對天線相位中心之偏移量及變化量[5]，NGS 相位中心率定所

使用之參考天線為 Alan Osborn antenna，天線代號為 AOAD/M_T，其平均 L1、L2 相位中心偏移分別定義為 11.0cm 及 12.8cm，檢校場設置於一平坦之草地上，檢校場地如圖 2 所示，檢校場上設置兩座高 1.8 公尺直徑 6 英吋之水泥樁，樁頂則設置強制定心基座；參考天線整置於北方樁位，而試驗天線整置於南方樁位，兩樁間距為 5 公尺；參考天線及試驗天線皆連結至 Ashtech Z12 接收儀，接收仰角設為 10 度；此外，設置一鈷振盪器為兩接收儀之外部頻率基準。NGS 檢校場地配置圖如圖 3 所示。



圖 2. NGS 檢校場地[5]。

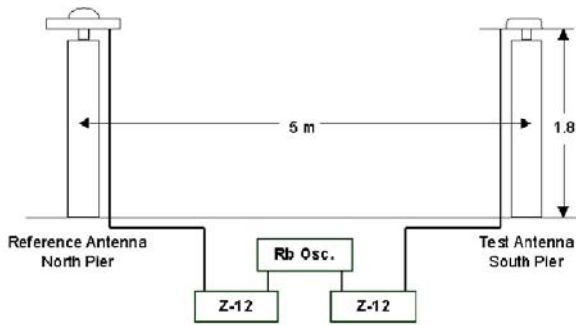


圖 3. NGS 天線相位中心檢校場配置圖[5]。

2.1.3 絕對檢校場度量法 (Absolute Field Calibration)

目前 IGS 所公告 igs05 及 igs08 天線相位中心改正的改正值採用絕對檢校場度量法，由德國的 GEO++ 公司與漢諾威大學的教授 Wübbena 所共同開發，其原理為將校正天線架設於機器手臂上，利用機器手臂快速依不

同方向旋轉來求得該天線與衛星之間在不同高度角與方位角的偏差量[6]，天線校正示意圖如圖 4 所示。該方法利用機器手臂的旋轉能消除多路徑效應及提高衛星的覆蓋範圍能提升校正精度，靜態天線與動態天線衛星接收分布圖如圖 5 及圖 6 所示。



圖 4. 天線校正示意圖[6]。

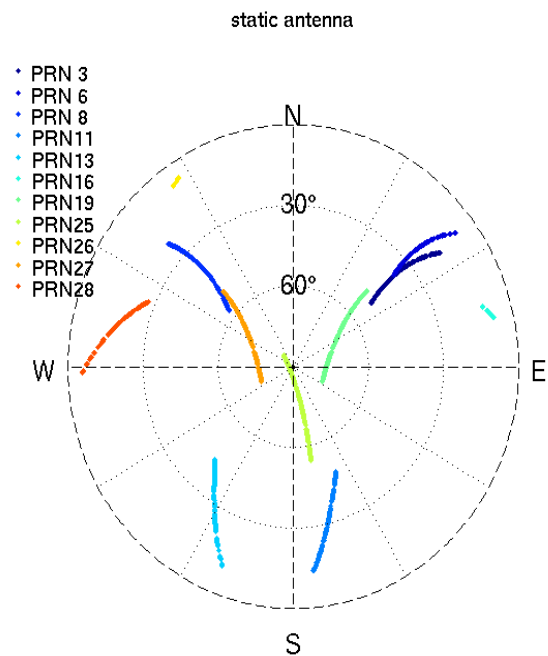


圖 5. 靜態天線衛星接收分布圖[6]。

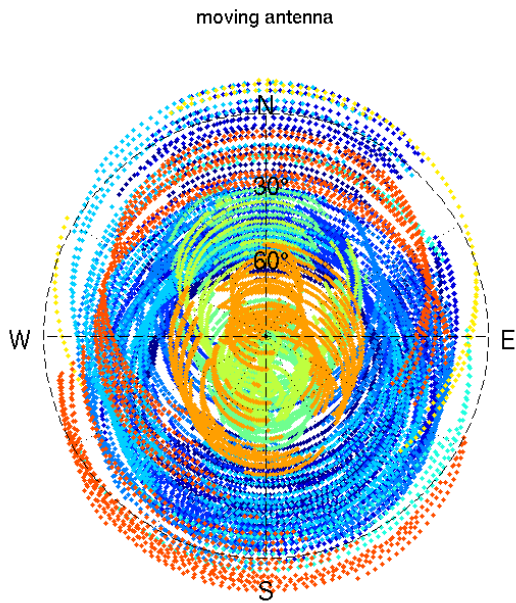


圖 6. 動態天線衛星接收分布圖[6]。

2.2 天線相位中心模式格式介紹

在 2006 年 11 月 5 日之後，IGS 相位中心改正模式從 igs01.ATX 改採 igs05.ATX，igs01.ATX 為 IGS ANTEX (ANTenna Exchange) 標準格式，其內容與 igs01.pcv 檔案相同，此格式由 M. Rothacher 及 R. Schmid 於 2002 年加拿大 Ottawa 的 IGS 研討會中所提出[7]，檔案格式如圖 7 所示，此相位中心改正模式採用 NGS 相對檢校場度量法所獲得的改正值；而

igs05.ATX 採用德國 Geo++ 公司絕對檢校場度量法所獲得的改正值；igs01 模式中接收儀天線只有高度角的改正量，並未考慮方位角的改正量及天線雷達罩的影響，而衛星相位中心的改正以衛星型式對衛星的質量中心到衛星天線相位中心的偏移量 (PCO) 進行改正，不同相位中心模式之比較如表 1 所示[8]。

```

R 1.3 M ANTEX VERSION / SYST
ADAD/M_T PCV TYPE / REPANT
##### COMMENT
igs01.pcv (version from June 2006) converted to ANTEX COMMENT
Ralf Schmid (TUM), email: schmid@bv.tum.de COMMENT
26-JUN-06 COMMENT
##### COMMENT
##### END OF HEADER
.
.
.
BLOCK II START OF ANTENNA
TYPE / SERIAL NO
0 21-APR-04 METH / BY / # / DATE
0.0 DAZI
0.0 14.0 1.0 ZEN1 / ZEN2 / DZEN
2 # OF FREQUENCIES
IGS_01 SINEX CODE
G01 START OF FREQUENCY
279.00 0.00 1023.00 NORTH / EAST / UP
NOAZI 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 ...
G01 END OF FREQUENCY
G02 START OF FREQUENCY
279.00 0.00 1023.00 NORTH / EAST / UP
NOAZI 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 ...
G02 END OF FREQUENCY
END OF ANTENNA
.
.
.
TRM33429.20+GP NONE START OF ANTENNA
FIELD NGS 3 29-AUG-01 METH / BY / # / DATE
0.0 DAZI
0.0 80.0 5.0 ZEN1 / ZEN2 / DZEN
2 # OF FREQUENCIES
IGS_01 SINEX CODE
G01 START OF FREQUENCY
-0.40 -1.00 72.90 NORTH / EAST / UP
NOAZI 0.00 4.80 9.30 13.30 16.60 19.30 21.20 22.30 22.70 22.50 21.80 ...
G01 END OF FREQUENCY
G02 START OF FREQUENCY
-0.40 -1.30 75.00 NORTH / EAST / UP
NOAZI 0.00 0.30 0.90 1.60 2.20 2.90 3.40 3.80 4.00 4.10 3.90 ...
G02 END OF FREQUENCY
END OF ANTENNA
.
.
.

```

圖 7. ANTEX 1.3 檔案格式[7]。

表 1. 不同相位中心模式之比較[8]

改正模式	接收機天線			衛星天線	
	PCO	PCV	Radome	PCO	PCV
igs01.ATX (1996-2006)	相對於參考天線 AOAD/M_T		忽略	區分衛星世代	忽略
igs05.ATX (2006-2011)	每顆接收儀天線 個別改正		採用	每顆衛星 個別改正	區分衛 星世代
igs08.ATX (2011-Now)	更新		更新	更新	不變
	PCO：相位中心偏移量。 PCV：相位中心變化量。 Radome:天線雷達罩。				

2.3 Bernese 軟體天線相位中心改正原理

Bernese 軟體的天線相位中心改正使用下列方程式來進行天線相位中心變化的改正：

$$\Delta\phi(\alpha, z) = \Delta\phi'(\alpha, z) + \Delta r \cdot e \quad (1)$$

其中

$\Delta\phi(\alpha, z)$: 相位中心於方位角及天頂距方向之全部改正量。

α, z : 衛星視線(line of sight)之方位角及天頂距

$\Delta\mathbf{r}$: 天線物理中心及平均相位中心之偏移量向量

\mathbf{e} : 接收器天線到衛星方向之單位向量

$\Delta\phi'(\alpha, z)$: PCV 改正函數。

$\Delta\mathbf{r}$ 向量為定義於唯一值

$$\int_{\alpha=0}^{2\pi} \int_{z=0}^{z_{\max}} \Delta\phi(\alpha, z) \sin z \, dz \, d\alpha = \min \quad (2)$$

Bernese 軟體中，天線相位中心資訊主

要存在於兩個檔案，一個為衛星資訊檔 (Satellite information file) 以及相位中心行為檔，此檔案可由 Bern 大學之 ftp 站下載，天線相位中心檔名分別為 PHAS_COD.I01、PHAS_COD.I05 以及 PHAS_COD.I08，衛星資訊檔名分別為 SATELLIT.I01、SATELLIT.I05 以及 SATELLIT.I08，必須注意天線相位中心檔與衛星資訊檔不可混用，因為衛星相位中心改正的衛星相位偏移量 (Phase Center Offset) 存放於衛星資訊檔，而衛星相位中心改正的衛星相位變化量 (Phase Center Vibration) 存放於天線相位中心檔；igs08 為 igs05 天線相位中心模式的更新，除了 GPS 天線相位中心改正的更新外，衛星天線相位中心的偏移量的計算也有所不同，主要為資料計算採用更長的時間，計算分析中心從 2 個提高至 5 個，採用的參考框架也不同，igs05 與 igs08 比較表如表 2 所示。

表 2. igs05 與 igs08 衛星相位中心偏移量計算差異表

相位中心模式	衛星相位中心偏移量 (Satellite Phase Center Offset)		
	igs05.ATX	igs08.ATX	備註
資料	1994-2004	1994-2007 and 2008-2010 AC SINEX	
參考框架	IGb00	ITRF 2008	
分析中心	GFZ TUM	CODE ESA GFZ MIT NRCan	Unweighted mean value of five ACs

三、研究內容

本研究利用 IGS 公告之 igs01、igs05 及 igs08 等 3 種模式解算點位坐標及對流層參數估計，國際追蹤站成果驗證採用 IGS 於 2011 年 4 月 17 日最新公告之 IGS08 參考框架及 CODE 所提供之對流層參數；國內追蹤站因內政部於 1997 年公布台灣地區大地基準為 TWD97 坐標系統，其國際地球參考框架為 ITRF94，距今已 10 多年之久且每年平均變動

量有數公分之多[9]，所以本研究並不使用公告坐標進行驗證，成果分析以不同相位中心模式的差值進行比較。

3.1 研究資料選定

本研究以 IGS08 參考框架中之核心站新竹 (TNML) 為固定站，分別與國際追蹤站以及台灣追蹤站組成星型網形基線，資料時間段為 2011 年 5 月 14 日至 5 月 20 日共 7 日。

IGS 國際追蹤站點位為 TSKB (日本)、

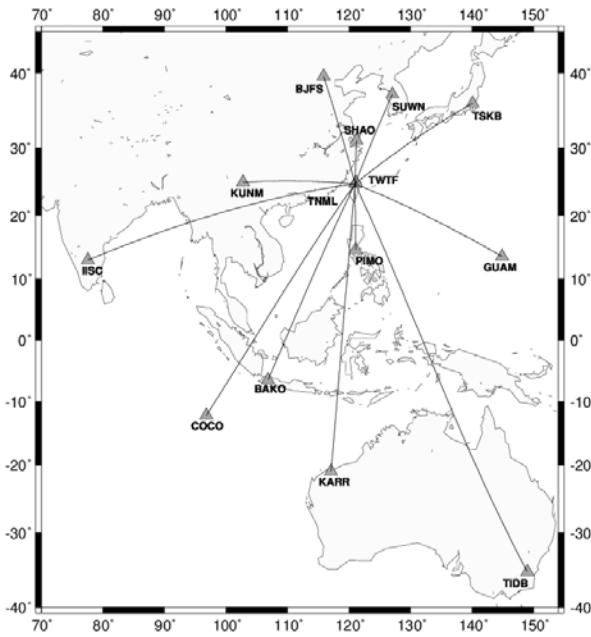


圖 8. IGS 國際追蹤站點位分布圖。

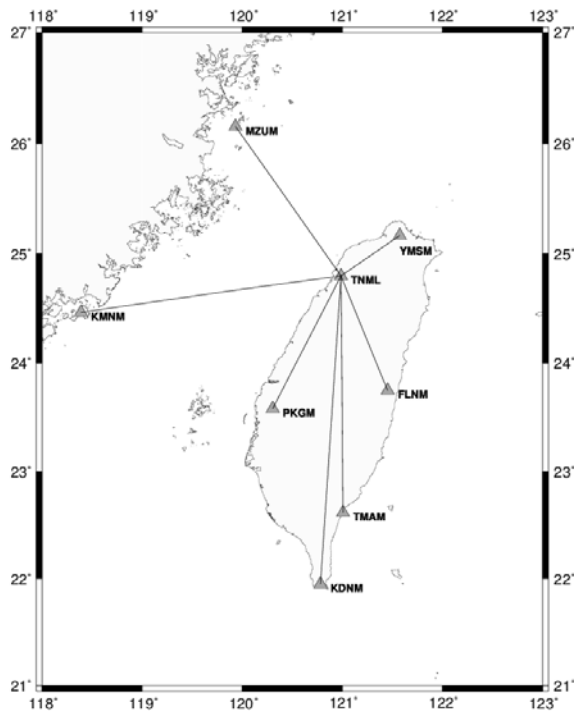


圖 9. 台灣追蹤站分布圖。

SHAO(上海)、TIDB(澳洲)、COCO(澳洲)、KUNM(昆明)、TNML(新竹)、GUAM(關島)、PIMO(菲律賓)、TWTF(桃園)、IISC(印度)、BAKO(印尼)、SUWN(韓國)、KARR(卡拉塔)、BJFS(北京)等 14 個國際

追蹤站，點位分佈如圖 8 所示；國內追蹤站採用點位為 FLNM(鳳林)、KMNM(金門)、MZUM(馬祖)、PKGM(北港)、TMAM(太麻里)、KDNM(墾丁)、YMSM(陽明山)等 7 站，點位分布如圖 9 所示。

本研究國際追蹤站對流層總延遲驗證採用 CODE 提供之全球每日對流層延遲成果，其參數時間間隔為 2 小時，取得方式為透過網路連線至地殼變動資料中心(Crustal Dynamics Data Information System, CDDIS)資料庫，其中除 KUNM(昆明)與 TNML(新竹)兩點位無資料外，共取得 12 站之全球每日對流層改正參數。

3.2 國際地球參考框架

國際地球參考框架由國際地球旋轉組織(International Earth Rotation and Reference System Service, IERS)負責維護、管理及制訂，該組織由國際天文協會(International Astronomical Union, IAU)及國際大地測量學及地球物理學聯合會(International Union of Geodesy and Geophysic, IUGG)組成，其成立於 1987 年，並於 1988 年初開始運作。最初 ITRF 測站之坐標與速度場，是以超長基線干涉測量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)、月球雷射測距(Lunar Laser Ranging, LLR)和衛星雷射測距(Satellite Laser Ranging, SLR)等空間大地測量技術所訂定[7]。

ITRF 為一動態框架，坐標及速度場隨時間變動而進行調整，因此，能真實表達地球實際現況。最初之 ITRF 為 ITRF-0，並陸續發佈 ITRF88、ITRF89、ITRF90、ITRF91、ITRF92、ITRF93、ITRF94、ITRF95、ITRF96、ITRF97、ITRF2000、ITRF2005 及 ITRF2008，上述參考框架均考慮測站受地球變動影響而產生之坐標變化。

IGS 組織從 2000 年開始以 ITRF 參考框架為基礎計算出 IGS 參考框架，並陸續發佈 IGS97、IGS00 及 IGS00 系列，所有 IGS 的產

品均以此框架為基準，2006 年 11 月 5 日之後，國際地球參考框架改採 ITRF2005；此外，IGS 精密星曆之參考框架也更新為 IGS05 參考框架；此框架以 ITRF2005 為基礎，採用全球 132 個追蹤站的連續觀測量所制訂之 IGS05 參考框架。IGS05 與 ITRF2005 經七參數轉換後，兩框架間之轉換差異量平面偏差約 1mm，高程偏差約 10mm，其影響主要為 ITRF2005 採用 igs01 天線相位中心模式，而 IGS05 採用的是 igs05 相位中心模式[11]；2011 年 4 月 17 日，國際地球參考框架改採 ITRF2008，IGS 組織從 ITRF2008 中挑選 232 個穩定且成果良好的測站制定 IGS08 參考框架，ITRF2008 是以 igs05 相位中心改正模式所計算，IGS08 參考框架則為 igs08 相位中心改正模式所計算，ITRF2008 與 IGS08 之間因為天線相位中心的改變造成的影響，IGS 以精密單點定位技術測試轉換天線相位中心模式的影響，測試結果如平面超過 1.2mm 或高程超過 3mm 時，將修正 IGS08 的坐標，最後 IGS08 有 65 個測站進行修正，其餘 167 個測站坐標與 ITRF2008 相同。



圖 10. IGS08 測站分布圖[12]。

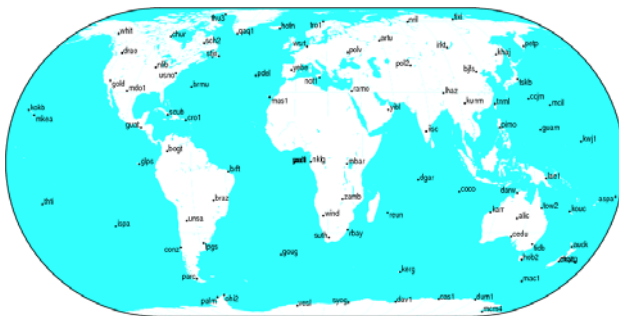


圖 11. IGS08 核心站分布圖[13]。

在 IGS08 中，232 個測站分布並不均勻，

IGS08 測站分布如圖 10 所示，為避免網形分布不均所造成的系統性誤差，IGS 挑選了 91 個分布均勻的測站，稱為 IGS08 核心站(Core Station)，其分布圖如圖 11 所示，以供全球使用者在應用 IGS 資料及產品時，可選擇核心站進行最小約制，而 IGS 公告之每周全球框架點資訊 (Software Independent Exchange Format, SINEX) 也以核心站連接全球網形。

3.3 基線解算策略

本研究基線解算策略分別以三種天線相位中心模式區分為 igs08、igs05、igs01 模式進行解算，參數設定如表 3 所示，坐標參考框架採用 IGS08，因 IGS08 參考框架是以 igs08 相位中心改正模式所計算而得的；而目前最新的 ITRF2008 參考框架則是以 igs05 相位中心改正模式所計算而得的[2]，因此為比較不同相位中心模式之影響，本研究採用 IGS08 參考框架；

CODE 提供原始的對流層延遲資料之間隔為 2 小時，但本文收集之其它比對資料均以 1 小時為標準。對流層延遲效應採 Dry Niell 改正模式為初始模式，並以 Wet Niell 函數作為初始模式之映射函數 (Mapping Function)，所以映射函數每 1 小時附加 1 個修正參數，於數據處理中一併求解[14]。

電離層延遲改正為兩個部分，如次[15]：

在各時段解算整數週波未定值階段，每筆觀測量均引用電離層的修正模式進行改正，藉以分別求解 L1 載波與 L2 載波的整數週波未定值，若順利求解得整數解，則將其值固定，並視為已知量代入二次差觀測方程式中，求解其他待算參數(如坐標參數、對流層附加參數...等)，若未能成功得到整數解，則將未能確定的整數週波未定值視為待求解之參數，並與待求的坐標參數及對流層附加參數一併解算。

在未定值參數解算階段(解算參數包括坐標參數、對流層附加參數以及整數週波未定

值)，採 L3 雙頻無電離層效應之二次差 GPS 載波相位觀測方程式，進行 GPS 觀測資料之參數解算。

表 3. 基線解算模式參數設定

	igs01	igs05	igs08
取樣頻率	30sec		
衛星軌道	igswwwd.sp3		
地球自轉參數	igswwwd.IEP		
電離層改正模式	CODwwwd.ION		
對流層先驗模式	Dry Niell		
映射函數	Wet Niell		
外部氣象資料	無		
測站參考框架	IGS08.CRD		
測站速度場	IGS08.VEL		
截取角	3°		
海潮改正模式	FES2004.BLQ		
天線行為檔	PHAS_COD.I01	PHAS_COD.I05	PHAS_COD.I08
衛星資訊檔	SATELLIT.I01	SATELLIT.I05	SATELLIT.I08

四、研究成果比較與分析

本研究成果比較區分為國際追蹤站精度檢核與不同相位中心模式之差值兩種方式；國際追蹤站精度檢核採用 IGS08 之公告坐標與 CODE 所提供之對流層參數加以驗證，區分為基線長度比較，坐標精度分析、對流層延遲參數驗證，國內追蹤站部分，將 Bernese5.0 所計算的坐標變換至 TWD97 坐標系統上，分析不同相位中心模式對國內追蹤站 E、N 及 h 分量的影響。

4.1 國際追蹤站精度檢核

本研究為驗證不同相位中心模式對精度的影響，採用 IGS08 之公告坐標與本研究計算每日資料所得的坐標進行驗證，利用均方根誤差(Root of Mean Square,RMS)進行檢核

[16]：

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (T_j - Y_j)^2}{N}} \quad (3)$$

式中，

N：觀測數

T_j：第 j 個觀測值

Y_j：第 j 個公告值

4.1.1 基線長檢核精度分析

在利用 GPS 計算台灣地區連續觀測站點位坐標時，須引進 IGS 國際追蹤站聯合解算，為確保 IGS 國際追蹤站解算成果與引用的參考框架成果相符合，基線檢核為 IGS 國際追蹤站解算成果時首要的步驟，當實際基線長與理論之差異小於基線檢核標準（

2mm+0.002ppm×L，L 為基線長度[17]) 時，才能引用該追蹤站點位進行約制網形平差[18]，所以本研究將以基線檢核標準來探討不同天線相位中心模式對基線的影響量；首先於資料解算時固定新竹 (TNML) 點位坐標來計算其餘點位之坐標，根據所獲得的坐標來換算點位之間的實際基線長度。接著，根據 IGS08 參考框架於 2005.0 時刻之公告坐標及速度場，依線性關係推算出各個點位於觀測時刻之理論坐標，進而求得各基線之標準基線長。

本研究以 Bernese 5.0 解算 2011 年 5 月 14 日至 5 月 20 日計 7 日資料，分別利用 igs08、igs05 及 igs01 不同相位中心改正模式求解每日坐標值，經反算基線長與標準基線比較計算得到其 RMS 值，基線檢核統計表如表 4，由表 4 發現由 TNML 與 TSKB 所組成的基線長與標準基線誤差最大，介於 583.4 至 597mm，相較其他基線的 RMS 誤差介於 2.03 與 23.44mm 之間，此基線有誤差過大的情形

，由圖 12 可清楚分辨出誤差過大的問題，原因可能為點位位移、點位錯誤或資料解算錯誤等，IGS08 參考框架於 2011 年 4 月 17 日公告，為目前最新之 IGS 參考框架，而 TSKB 點位位於日本，推斷點位可能遭受日本 311 大地震之影響，為驗證上述推斷，可藉由 IGS 公告之每周全球框架點資訊進行驗證，SINEX 為各分析中心所計算每周全球 IGS 追蹤站點位坐標之標準格式，可提供全球 IGS 使用者最即時之 IGS 解算坐標；經由 SINEX 坐標所反算之基線長如表 5，證實 TSKB 點位位移是受到地震的影響，RMS 值從原本最大的 583.4mm 至 597mm 降到 15.50mm 至 26.11mm，SINEX 坐標反算基線檢核比較如圖 13 所示，經由上述分析比較後得之，在 IGS08 參考框架中 TSKB 點位受地震影響產生位移，其坐標精度已無法使用，將於後續分析中剔除 TSKB 點位。

表 4. IGS08 坐標反算基線檢核 RMS 值比較成果統計表

固定站	國際追蹤站	基線長度 (km)	檢核標準 (mm)	igs08 (mm)	igs05 (mm)	igs01 (mm)
TNML	TWTF	24.85	2.05	1.76	1.78	2.06
TNML	SHAO	698.32	3.40	2.93	2.48	3.46
TNML	PIMO	1123.57	4.25	2.82	3.10	5.33
TNML	SUWN	1495.36	4.99	11.41	14.45	6.51
TNML	BJFS	1705.23	5.41	6.07	4.32	12.19
TNML	KUNM	1830.34	5.66	6.26	4.81	12.19
TNML	TSKB	2203.95	6.41	596.26	595.93	585.47
TNML	GUAM	2772.34	7.54	5.94	10.63	10.24
TNML	BAKO	3729.83	9.46	5.91	8.12	16.59
TNML	IISC	4626.21	11.25	6.35	6.55	21.77
TNML	COCO	4742.66	11.49	5.10	7.95	18.04
TNML	KARR	4947.16	11.89	3.14	8.09	2.65
TNML	TIDB	6892.92	15.79	8.55	17.01	14.88

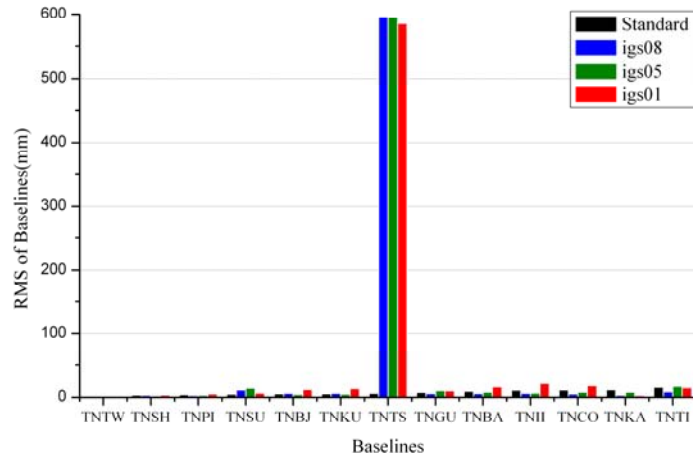


圖 12. IGS08 坐標反算基線檢核 RMS 值比較圖。

表 5. SINEX 坐標反算基線檢核 RMS 值比較統計表

固定站	國際追蹤站	基線長度 (km)	檢核標準 (mm)	igs08 (mm)	igs05 (mm)	igs01 (mm)
TNML	TWTF	24.85	2.05	3.19	3.03	3.13
TNML	SHAO	698.32	3.40	4.37	3.61	4.97
TNML	PIMO	1123.57	4.25	4.74	6.48	3.18
TNML	SUWN	1495.36	4.99	4.89	2.43	9.74
TNML	BJFS	1705.23	5.41	5.01	3.48	11.06
TNML	KUNM	1830.34	5.66	3.50	2.89	10.31
TNML	TSKB	2203.95	6.41	15.33	15.95	26.06
TNML	GUAM	2772.34	7.54	4.01	7.94	13.25
TNML	BAKO	3729.83	9.46	6.15	8.68	15.96
TNML	IISC	4626.21	11.25	7.99	6.76	23.94
TNML	COCO	4742.66	11.49	5.21	10.03	15.84
TNML	KARR	4947.16	11.89	3.80	10.05	2.95
TNML	TIDB	6892.92	15.79	12.31	20.93	11.74

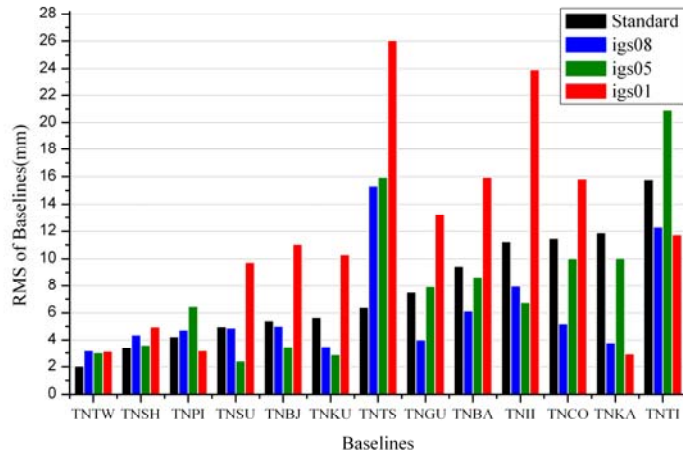


圖 13. SINEX 坐標反算基線檢核 RMS 值比較圖。

4.1.2 坐標精度分析

在坐標精度檢核方面，以不同相位中心模式所解算之坐標分別以直角坐標系的 X、Y 及 Z 分量以及大地坐標系的橢球高進行分析比較；以 igs08、igs05 及 igs01 不同相位中心模式求解成果，在 X 分量上平均 RMS 值分別為 9.4mm、12.1mm 及 14.7mm；在 Y 分量上，RMS 值分別為 12.0mm、14.3mm 及 32.7mm；在 Z 分量上，RMS 值分別為 5.2mm、7.3mm 及 11.1mm，直角坐標 RMS 值成果統計表如表 6，各點位在不同相位中心模式中的直角坐標 RMS 值如圖 14、15 及 16 所示。由上述各項分析顯示，在直角坐標中以 igs08 相位中心模式求解的精度最高。

表 6. 直角坐標系 RMS 值成果比較統計表

軸向	$\Delta X(\text{mm})$		$\Delta Y(\text{mm})$		$\Delta Z(\text{mm})$	
	最大	平均	最大	平均	最大	平均
igs08	19.8	9.4	22.2	12.0	8.2	5.2
igs05	41.0	12.1	40.0	14.3	12.9	7.3
igs01	32.9	14.7	66.4	32.7	27.2	11.1

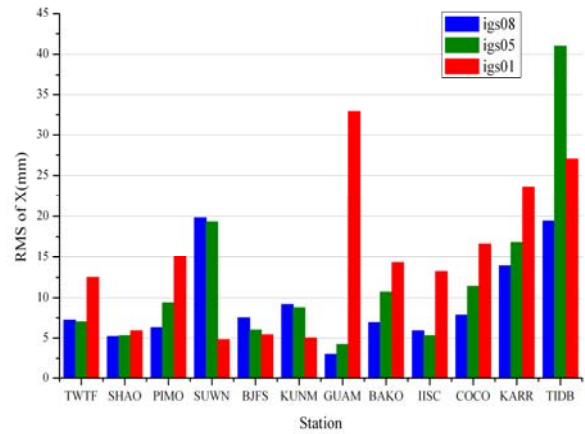


圖 14. 不同相位中心模式 ΔX 之 RMS 值。

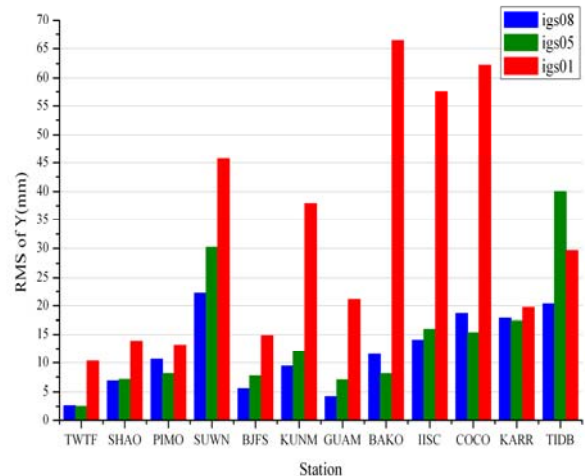


圖 15. 不同相位中心模式 ΔY 之 RMS 值。

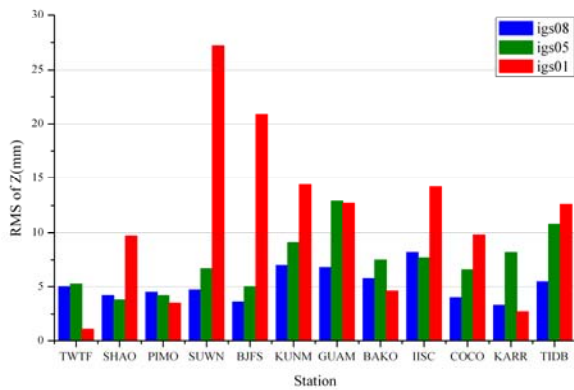


圖 16. 不同相位中心模式 ΔZ 之 RMS 值。

在大地坐標系中的橢球高，RMS 平均分別為 11.8mm、13.1mm 及 37.5mm，各點位在不同模式中的橢球高 RMS 值如圖 17 所示。由上述各項分析顯示，相位中心模式在橢球高的影響量比平面大，在 igs01 模式中，與 IGS08 公告值相比，平均值為 37.5mm，最大值為 66.6mm，驗證若採用較舊的相位中心模式會造成橢球高解算上較大的誤差（如表 7）。

表 7. 橢球高之 RMS 值成果比較統計表

模式	橢球高 Δh (mm)	
	最大	平均
igs08	20.1	11.8
igs05	30.0	13.1
igs01	66.6	37.5

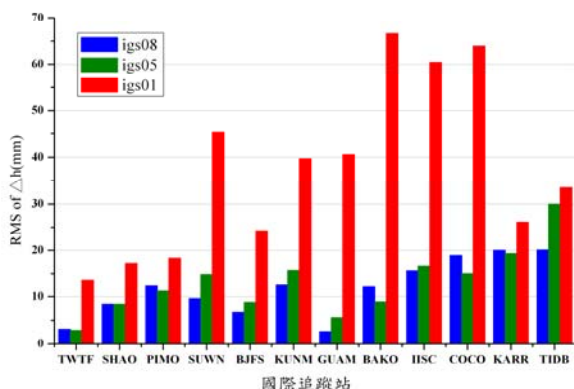


圖 17. 不同相位中心模式橢球高之 RMS 值。

4.1.3 對流層延遲量分析比較

各測站於資料取樣時間內分別採 igs01、igs05 及 igs08 三種模式估計所得之的對流層參數估計成果以 TWTF 站為例，在 igs08 模式所得之對流層總延遲量與 CODE 對流層參數最為接近，其較差值最大為 17.8mm，RMS 值為 5.2mm；在 igs05 模式所得之對流層總延遲量，其較差值最大為 14.1mm，RMS 值為 5.3mm；在 igs01 模式所得之對流層總延遲量，其較差值最大為 29.2mm，RMS 值為 10.8mm 成果如圖 18 所示。

在所有測站對流層總延遲量的 RMS 值分析中，igs08 的模式與 CODE 對流層參數精度最高，RMS 最小值為 4.4mm，最大值為 13.2mm；igs05 次之，其 RMS 最小值為 4.6mm，最大值為 13.9mm，igs01 最差，RMS 最小值為 10.8mm，最大值為 35.5mm，RMS 比較圖如圖 19 所示，由圖 19 可明顯看出對流層總延遲量的 RMS 以 igs08 的模式精度最高，證明天線相位中心改正模式會影響對流層參數估計；另一方面，在圖 18 中的測站順序由左至右依基線長度遞增，基線長從 25 公里至 6893 公里之間，我們可以發現 RMS 值會隨著基線長增加而有上升的趨勢，尤其在 igs01 的模式中特別明顯，所以對流層參數估計的精度會隨著基線的增長而變低；在對流層參數估計中的映射函數中，測站的高程會影響參數的決定，因此，我們將圖 18 中的測站依測站的橢球高重新排列，測站的橢球高介於 -35 公尺至 843 公尺之間，如圖 19 所示，由圖中發現對流層總延遲量的精度並不會依橢球高的高低而產生降低或偏高，總結以上分析結果，以 igs08 天線相位中心模式精度求解對流層參數與 CODE 相近，而其他兩種模式確實會降低對流層參數估計的精度；而對流層參數估計也會隨著測站間的基線增長而有精度降低的趨勢。

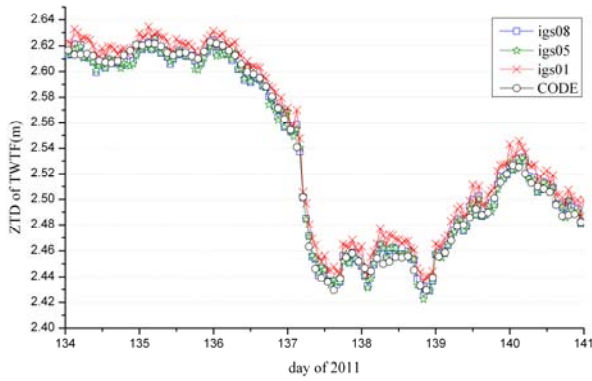


圖 18. 不同相位中心模式求解 TWTF 站之對流層總延遲量。

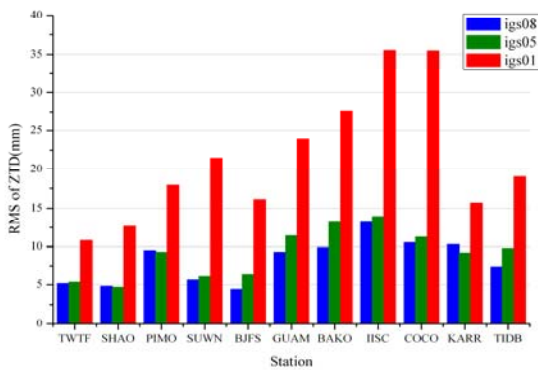


圖 19. 不同相位中心模式求解對流層總延遲量 RMS 比較 (依基線長排列)。

4.2 台灣追蹤站之 TWD97 影響量分析

在國內追蹤站方面，透過內政部地政司衛星測量中心提供之坐標轉換程式進行坐標轉換，將 Bernese 所計算的坐標由空間直角坐標系(X, Y, Z) 轉換至 TWD97 (E, N, h) 坐標系統，藉此比較相位中心模式之間的改變在 E、N 及 h 三個分量的差值。

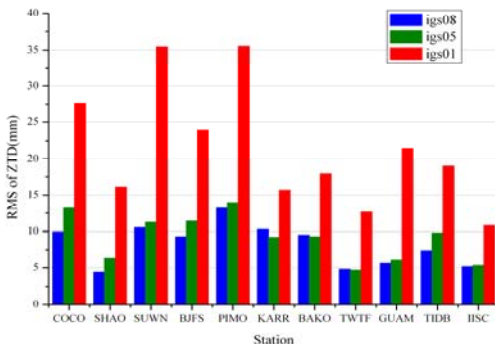


圖 20. 不同相位中心模式求解對流層總延遲量

RMS 比較 (依橢球高排列)。

在台灣追蹤站的分析中，以比較不同模式之間對台灣區域造成的影響，以新竹為星型網形共組成 7 條基線，基線長從 72 公里至 316 公里，屬於中短基線網形，不同相位模式之 TWD97 較差絕對值平均如

表8 所示，在 E 分量上，igs 08 與 igs 05 模式之間，其差值絕對值平均介於 0.2 至 1.1mm 之間，而 igs05 與 igs 01 模式之間，其差值絕對值平均介於 0.3 至 0.4mm 之間，影響量不明顯；在 N 分量上，igs 08 與 igs 05 模式之間其差值絕對值平均介於 1.8 至 3.4mm 之間，而 igs 05 與 igs 01 模式之間，其差值絕對值平均介於 0.4 至 1.3mm；在 h 分量上，igs 08 與 igs 05 模式之間，其差值絕對值平均介於 3.7 至 4.5mm 之間，igs 05 與 igs 01 模式之間，其差值絕對值平均介於 3.3 至 7.3mm。

在台灣追蹤站中，在 E 分量的影響較不明顯，E 分量差值絕對值平均比較圖如圖21；在 N 分量上，igs08 與 igs05 之間的影响量較 igs05 與 igs01 之間為大，N 分量差值絕對值平均比較圖如圖22，研判可能為天線相位中心的更新所致；在 h 分量上，並沒有在 N 分量上明顯的差異如圖 23，但仍可看出 igs08 與 igs05 之間的影响量相較 igs05 與 igs01 之間較為一致，顯示以絕對相位中心改正的方法在高程的影響趨近一致。

表 8. 不同相位模式之 TWD97 差值絕對值平均統計表

Station	Baseline(km)	E 分量(mm)		N 分量(mm)		h 分量(mm)	
		igs08-05	igs05-01	igs08-05	igs05-01	igs08-05	igs05-01
YMSM	72	1.1	0.3	1.8	0.6	3.7	3.3
FLNM	126	0.6	0.4	3.2	0.4	4.1	4.4
PKGGM	152	0.6	0.4	3.3	0.7	3.8	3.4
MZUM	184	0.6	0.4	2.7	1.3	3.8	7.3
TMAM	242	0.2	0.3	3.4	0.5	3.8	4.0
KMNM	266	0.3	0.4	2.8	1.0	4.5	5.9
KDNM	316	0.8	0.3	2.0	0.7	3.0	5.7

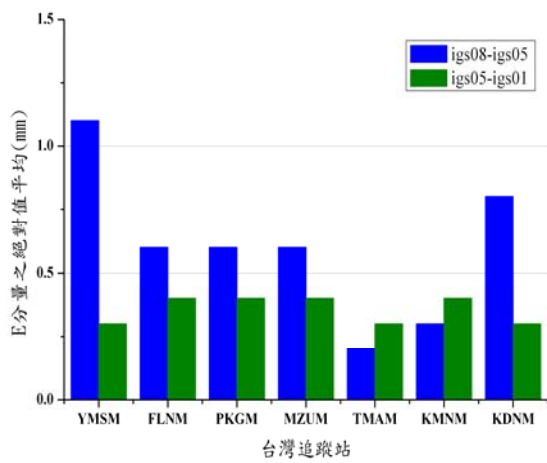


圖 21. 台灣追蹤站 E 分量比較圖。

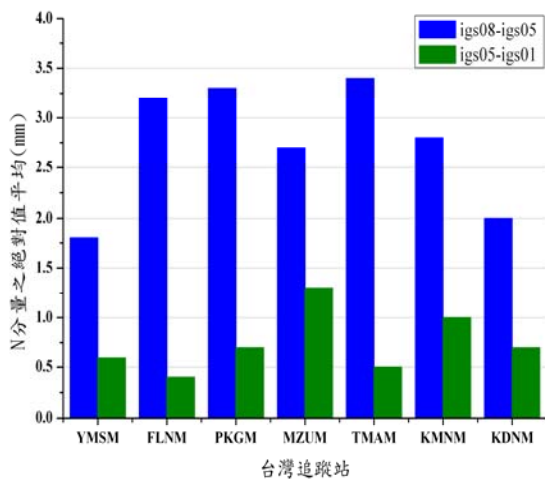


圖 22. 台灣追蹤站 N 分量比較圖。

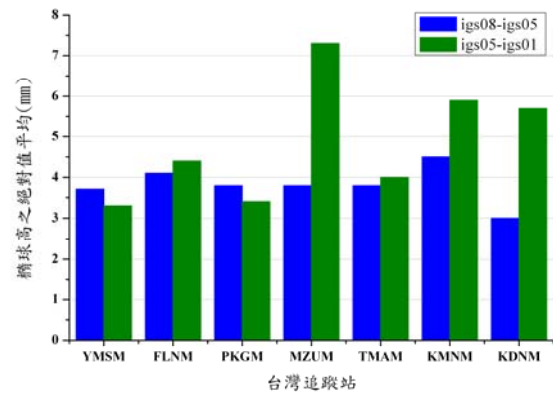


圖 23. 台灣追蹤站 h 分量比較圖。

對流層總延遲量中 (如表 9)，igs 08 與 igs 05 模式之間，其差值絕對值平均介於 1.5 至 2.0mm 之間，而 igs 05 與 igs 01 模式之間，其差值絕對值平均介於 8.5 至 9.9mm 之間；在對流層總延遲參數估計中顯示，igs05 與 igs01 之間的影响較 igs08 與 igs05 模式之間大，如圖 24 所示。

表 9. 不同相位模式之對流層總延遲差值絕對值平均

Station	Baseline (km)	igs08-igs05 (mm)	igs05-igs01 (mm)
YMSM	72	1.5	8.5
FLNM	126	2.0	9.1
PKGGM	152	2.0	8.7
MZUM	184	1.9	9.9
TMAM	242	2.0	9.0
KMNM	266	2.0	9.4
KDNM	316	1.5	9.8

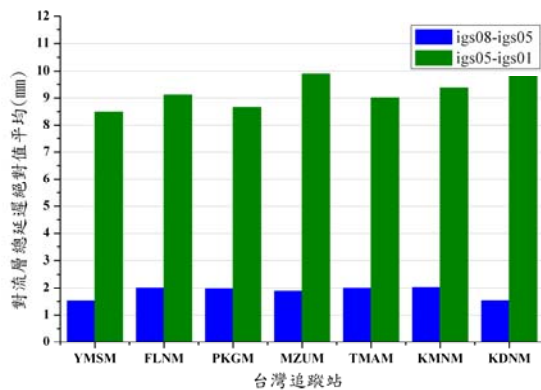


圖 24. 台灣追蹤站對流層總延遲差值絕對值平均比較圖。

五、結論

相位中心模式是高精度 GPS 資料解算時重要的誤差改正參數，若未隨著 IGS 參考框架的改變而轉換相位中心模式，對於 GPS 解算成果有重大的影響，本研究藉由不同相位中心模式解算國內外追蹤站，具體分析對於坐標精度與對流層參數估計的影響，由前述各章節所得之成果，可歸納以下幾點結論：

(1)在坐標精度分析中以 igs08、igs05 及 igs01 不同相位中心模式求解成果之 RMS 值以 igs08 模式精度最高，與 igs01 模式比較，在 X 分量上從 14.7mm 提高至 9.4mm；在 Y 分量上從 32.7mm 提高至 12.0mm；在 Z 分量上，從 11.1mm 提高至 5.2mm，驗證隨著 IGS08 參考框架更新，天線相位中心必須一致才能獲得最高的精度。

(2)相位中心改正模式的影響量對於 GPS 高程精度影響最大，研究結果以 igs08、igs05 及 igs01 解算的橢球高 RMS 值為 11.8mm、13.1mm 及 37.5mm。所以以 GPS 進行高程研究時，天線相位中心模式的引用，必須詳加注意。

(3)對流層總延遲參數估計為 GPS 高程精度誤差主要來源之一，在所有測站對流層總延遲量的 RMS 值分析中，igs08 模式的 RMS 最小值為 4.4mm，最大值為 13.2mm，igs01 最差，RMS 最小值為 10.8mm，最大值為 35.5mm，驗證 igs08 相位中心模式在對流層

總延遲參數估計中精度最高。

(4)在最新公告之 IGS08 參考框架中，本研究經過基線檢核確認，日本 311 地震影響 IGS08 參考框架的坐標精度，TSKB（日本）點位受地震影響，基線長度誤差近 60 公分，如引入 IGS 追蹤站聯合解算時，必須注意引用的點位，以免造成平差成果精度下降。

參考文獻

- [1] 陳春盛，對流層模式改良及高精度 GPS 高程之研究，國科會專題研究報告，1995。
- [2] Kouba, J. "A Guide to Using International GNSS Service (IGS) Products", Geodetic Survey Division, 2009.
- [3] Rebischung, P., Griffiths, J., Ray, J., Schmid, R., Collilieux, X., Garayt, B., "IGS08: the IGS realization of ITRF", GPS Solutions, 2011.
- [4] Görres, B., Campbell, J., Becker, M., Sieme, M., "Absolute calibration of GPS antennas: Laboratory results and comparison with field and robot techniques", GPS Solutions, Vol. 10, No2, pp. 136-145, 2006.
- [5] Mader, G., "GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey", GPS Solutions, Vol. 3, No1, pp. 50-58, 1999.
- [6] Wübbena, G., Schmitz, M., Menge, F., Boder, V., and Seeber, G., "Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time," Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Salt Lake City, pp. 2512-2522, USA, 2000.
- [7] Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., and Meindl, M., Bernese GPS Software Version 5.0, University Bern of Astronomical Institute, 2007.
- [8] Schmid, R., Steigenberger, P., Dach, R., Schmitz, M., Dilssner, F., Hugentobler, U., "Interaction of the IGS reprocessing and the IGS antenna phase center model" Fall Meeting of American Geophysical Union, 2009.
- [9] 黃水亮，利用 GPS 建立台灣地區海潮負載模型之研究，國防大學理工學院環資系空間科學所碩士論文，2009。
- [10] 李征航、黃勁松，GPS 測量與數據處理，武漢，武漢大學出版社，第 176 頁，2005。

- [11] <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2006/msg00170.html>。
- [12] <http://igscb.jpl.nasa.gov/network/refframe.html>。
- [13] http://igscb.jpl.nasa.gov/network/refframe_core.html。
- [14] Dach, R., Hugentobler, U., and Walser, P., Bernese GPS Software Version 5.0 Tutorial Processing Example Introductory Course Terminal Session, Astronomical Institute, University of Bern, 2011.
- [15] 陳國華，整合 TWVD2001 水準及 GPS 資料改進台灣區域性大地水準面模式以應用於 GPS 高程測量，國立成功大學測量及空間資訊學系博士論文，第 44-45，97-98 頁，2004。
- [16] Deakin, R.E., Kildea, D.G., “A Note on Standard Deviation and RMS.,” The Australian Surveyor, Vol.44, No.1, pp. 74-79, 1999.
- [17] Heflin, M., Bertiger, W., Blewitt, G., Freedman, A., Hurst, K., Lichten, S., Lindqwister, U., Vigue, Y., Webb, F., Yunck, T., Zumberge, J., “Global geodesy using GPS without fiducial sites,“ Geophys. Res. Lett, 1992.
- [18] 蔡旻穎，台灣 GPS 連續觀測站坐標時間序列分析方法研究，國立成功大學地球科學研究所碩士論文，2007。