

GNSS連續觀測站遠距頻率校正及定位精度分析

連紫猗* 葉大綱** 林信嚴*** 許君詔**** 陳鶴欽*****

論文收件日期：113年03月28日

論文修稿日期：113年05月17日

論文接受日期：113年06月25日

摘 要

為維護基本控制點品質，確保土地測量精度，本研究以GPS共視法（GPS common-view）開發GPS遠距頻率校正技術。利用相位法與電碼法解算13處GNSS觀測站之時間偏差量（phase offset），並以頻率穩定度（frequency stability）與頻率偏移（frequency offset）進行精度驗證，所得到的精度有11站與GPS衛星規格（ 10^{-12} ~ 10^{-11} ）相同，顯示GPS遠距頻率校正技術已可應用於台灣測站，未來將透過遊校（on-site calibration）直接比對進行驗證。惟CIME與WARO兩站之頻率穩定度與衛星規格相差3~5個等級，推斷為其內部石英震盪器異常所致。頻率穩定度及頻率偏移對精密單點定位（Precise Point Positioning, PPP）精度的影響大於對靜態相對定位（Static Relative Positioning），由於靜態相對差分定位消除時錶誤差，使頻率穩定度最差的CIME（ 10^{-7} ）及次差的WARO（ 10^{-8} ）其靜態相對定位精度在平面及高程平均達2.4 mm與6.6 mm；而採精密單點定位時，CIME定位精度在平面及高程僅10.1 mm與29.9 mm，顯示當接收儀頻率誤差大時，採用靜態相對定位對維持土地測量的精度較有利。從解算時間對定位精度的影響來看，靜態相對定位在解算時間2小時以上精度即顯著提升（~66%），24小時平面及高程精度最佳達1.1 mm與2.9 mm；而精密單點定位需大於4小時的解算時間方能提升精度，其24小時平面及高程精度最佳為1.9 mm與2.9 mm。

關鍵詞：定位精度、頻率偏移、時間偏差量、頻率穩定度、遠距頻率校正

* 博士級研究員，台北大學不動產與城鄉環境學系。

** 通訊作者，教授，國立臺北大學不動產與城鄉環境學系，TEL：(02)86741111#67430，
E-mail：bigsteel@mail.ntpu.edu.tw。

*** 研究員，中華電信研究院。

**** 技士，內政部國土測繪中心。

***** 科長，內政部國土測繪中心。

Analysis of Remote Frequency Calibration and Positioning Precision at GNSS Stations

Tzu-Yi Lien*, Ta-Kang Yeh**, Shinn-Yan Lin***,
Chun-Shao Hsu****, He-Chin Chen*****

ABSTRACT

This study aims to maintain the quality of basic control points and ensure land survey precision by devising GPS remote frequency calibration techniques. This study calculates time offset for 13 GNSS observation stations using both the phase method and the code method. The precision is validated through assessments of frequency stability and frequency offset. The resulting precision aligns with that of GPS satellite specifications ($10^{-12} \sim 10^{-11}$), affirming the applicability of GPS remote frequency calibration techniques to stations in Taiwan. In the future, it will be verified directly through on-site calibration. Notably, the frequency stability of the GNSS observation stations located at CIME and WARO exhibit considerable discrepancies, which is 3 to 5 orders higher than satellite specifications, thereby implying abnormalities within their internal quartz oscillators. The impact of frequency stability and frequency offset on precise point positioning (PPP) precision is greater than that on static relative positioning precision. Since static relative positioning eliminates the clock error, the positioning precision of WARO and CIME with the worst frequency stability ($10^{-8} \sim 10^{-7}$) is still good (horizontal 2.4 mm and vertical 6.6 mm). It shows that static relative positioning is more beneficial to maintain the precision of land survey than PPP when the frequency error is large. The precision of static relative positioning is significantly improved ($\sim 66\%$) when the time period of data is 2 hours. Computing of 24 hours data can reach the positioning precision to 1.1 mm and 2.9 mm in horizontal and vertical, respectively. However, the precision of PPP is improved when the time period of data is 4 hours. The positioning precision in horizontal and vertical are up to 1.9 mm and 2.9 mm, respectively, when computing by 24 hours data.

Key words: Frequency Offset, Frequency Stability, GPS Positioning Precision, Remote Frequency Calibration, Phase Offset

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

** Corresponding author, Professor, Department of Real Estate and Built Environment, National Taipei University, TEL: +886-2-86741111#67430, E-mail: bigsteel@mail.ntpu.edu.tw.

*** Researcher, Chunghwa Telecom Laboratories.

**** Assistant Technical Specialist, National Land Surveying and Mapping Center, Ministry of the Interior.

***** Division Chief, National Land Surveying and Mapping Center, Ministry of the Interior.

一、前言

隨著GNSS訊號的現代化及定位精度的提升，加上大地測量型GNSS接收儀價格大幅下降，使國內許多政府機關及學術單位紛紛建立GNSS連續觀測站，包括：中央研究院地球科學研究所、經濟部地質調查及礦業管理中心、交通部中央氣象署、經濟部水利署、內政部地政司及國土測繪中心；數量已超過400座，廣泛的應用在測繪、板塊、斷層、地震、氣象及地層下陷等領域。

隨著蓬勃發展的網際網路及無線數據通訊傳輸技術，即時動態定位測量已是國際測繪科技與定位技術之主流，國土測繪中心自西元2004年採虛擬基準站即時動態定位技術，於西元2008年完成建置「全國性e-GPS衛星定位基準站即時動態定位系統」與測試分析作業，並於西元2014年更新臺灣本島地區連續觀測站接收儀，且更名為「全國性e-GNSS衛星定位基準站即時動態定位系統」，結合雙星衛星定位、線上坐標轉換等核心技術讓系統在使用上更為便利。後又於西元2019年正式開放臺灣本島地區全星系定位服務，並建立衛星觀測資料品質自動檢核機制，整體系統運用與資料供應層面上更即時性及高精度。國土測繪中心的e-GNSS即時動態定位系統，截至西元2024年1月30日止累計註冊會員數為1,569個，有效會員數為1,289個，已廣為國內的產官學界使用。由於GNSS連續觀測站資料的使用，已從學術界逐步深化至業界，如何確保這些GNSS連續觀測站所提供的資料可靠度，建立一套GNSS資料品質監控系統是相當重要的。

衛星追蹤站觀測資料的品質將影響定位精度 (Yeh et. al., 2012)，影響範圍涵蓋板塊運動研究、斷層調查、地震觀測、水氣求定、地層下陷監測以及國土測繪中心所提供的e-GNSS服務。Yeh et. al. (2008) 研究指出GPS觀測資料品質以接收儀內部頻率穩定度的影響最大，其次為週波脫落，再來為多路徑效應。Mikoś et. al. (2023a) 研究國際全球導航衛星系統服務 (International GNSS Service, IGS) 下的GNSS接收儀所配備的不同時鐘，發現氫鐘 (hydrogen masers) 提供最高的頻率穩定度，最低的則是內部鐘。而光學時鐘比原子鐘更穩定 (Boldbaatar et. al., 2023)。國內包括國家度量衡標準實驗室、民間校正實驗室及國土測繪中心，雖然已經建立GNSS接收儀的靜態及動態校正系統，且通過全國認證基金會 (Taiwan Accreditation Foundation, TAF) 的認證。但由於GNSS連續觀測站並不適合將儀器拆卸下來送回實驗室進行校正，若採遊校 (攜帶原子鐘至各站進行頻率比對) 曠日廢時，故目前國內的GNSS連續觀測站僅於設站時進行校正追溯，後續以自動化監控e-GNSS基準站觀測資料品質，藉由接收下來的觀測資料進行初步GNSS訊號品質檢

核，針對衛星數、衛星幾何分布因子、訊雜比、多路徑效應進行管制（Yeh et. al., 2008），為目前採用的e-GNSS系統品保方案。

有別於遊校比對，國際上採用遠距頻率校正技術已行之有年（Allan and Weiss, 1980; Defraigne and Bruyninx, 2001; Ray and Senior, 2005; Lin et. al., 2010; Lin and Jiang, 2017; Defraigne and Petit, 2015），透過GPS衛星訊號作為參考訊號源，進行兩測站之時頻比對，即共視法，每顆GPS衛星都發射包含其位置以及內部時鐘與共同系統時間偏移量的訊號，因此每個地面接收儀可以對衛星的時鐘或參考到與接收儀連接的本地時鐘的共同系統時間進行訊號傳播時間測量，之後通過交換測量數據來計算兩個測站之間的時間差。Yeh et. al.（2008）採用14種大地型GPS接收儀分析頻率誤差對定位精度的影響，發現頻率穩定度的影響最大，因頻率偏移對定位的誤差已在GPS解算過程中消除，而頻率穩定度屬於時錶誤差的一階項，較不易改正。Yeh et. al.（2013）由遠距頻率校正結果發現，相較於頻率偏移，頻率穩定度對長基線定位精度的影響較高。由於在多星系（multi-GNSS）的服務下，需處理系統間的時間偏差（Mikoś et. al., 2023b），因此本研究僅針對GPS衛星進行探討。

為維護基本控制點品質，本研究透過未差分的GPS相位資料計算接收儀頻率偏差，開發GPS遠距頻率校正技術，並探討頻率誤差對於短、中、長距離靜態相對定位及精密單點定位精度之影響。如此，即能在觀測資料接收的早期，針對各GNSS連續觀測站的資料品質進行管制，藉由GNSS連續觀測站遠距頻率校正技術之建立，當儀器發生故障或環境發生變化時，能早期發現問題儘早處理異常狀況，藉以確保各GNSS連續觀測站所提供的資料是可靠的，讓使用者對於資料的使用上更具信心。

二、資料蒐集

為進行GPS遠距頻率校正技術之計算以及精度驗證，本研究以中華電信研究院管理之楊梅TWTF站為參考主站，並選擇13處短、中、長不同基線距離、不同型號接收儀、GPS鐘或外接鉤鐘的GNSS觀測站，測站分布如圖1所示，測站資訊列如表1。

在資料解算時間選擇上，因冬季環境干擾因素較小，電離層及對流層誤差較小，解算精度較佳，因此本研究選擇西元2023年1月1日到1月7日之觀測成果進行計算。

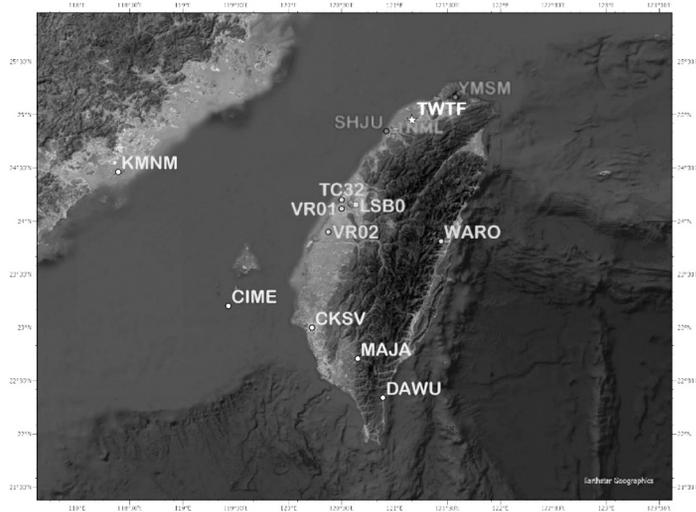


圖1 GNSS測站分布圖

表1 GNSS觀測站

基線距離	站名	點號	接收儀廠牌型號	建置機關
主站	楊梅	TWTF	SEPT POLARX4TR 外接國家標準時頻訊號	中華電信研究院 (IGS站)
短 (27 km ~ 48 km)	陽明山	YMSM	Trimble Alloy	內政部地政司
	南寮	SHJU	Trimble NetR9	國土測繪中心
	工研院	TNML	Trimble NetR9 外接鉤鐘	工業技術研究院 (IGS站)
中 (107 km ~ 142 km)	麗水派出所 (烏日)	TC32	Trimble Alloy	臺中市政府地政局
	二林	VR02	Trimble NetR9	國土測繪中心
	和美	VR01	Leica GR50	國土測繪中心
	萬榮	WARO	Topcon Net-G3A	國土測繪中心
	測繪中心	LSB0	Trimble NetR9 外接鉤鐘	國土測繪中心
長 (238 km ~ 292 km)	成大測量	CKSV	Trimble Alloy	國土測繪中心 (IGS站)
	金門	KMNM	Trimble Alloy	國土測繪中心 (IGS站)
	大武	DAWU	Trimble NetR9	國土測繪中心
	瑪家	MAJA	Leica GR50	國土測繪中心
	七美	CIME	Topcon NET-G3A	國土測繪中心

資料來源：內政部國土測繪中心，e-GNSS即時動態定位系統入口網站，瀏覽日期西元2024年1月30日。

三、研究方法

本研究利用14處GNSS觀測站（含參考主站TWTF）開發GPS遠距頻率校正技術，透過GPS共視法與國家時間與頻率標準實驗室（即參考主站TWTF）之標準時間進行比對，分別利用GPS未差分相位資料（相位法），以及國際度量衡局（Bureau International des Poids et Mesures, BIPM）建議的電碼計算方法計算GNSS接收儀時間偏移量，再以頻率偏移及頻率穩定度進行精度驗證。每個測站的觀測時間為西元2023年1月1日至1月7日，觀測時間間隔為5分鐘（300秒）。

（一）GPS 共視法比對解算時間偏移量

本研究開發之GPS遠距頻率校正技術採用GPS共視法方式。在進行國際時頻比對時，利用同步衛星及導航衛星可建立不同的時頻比對技術；以導航衛星而言，GPS為主要代表系統，在使用GPS進行實驗室間遠端時頻比對時，通常採用共視法以提高精確度。GPS共視法是利用GPS衛星之訊號作為共視法之參考訊號源，進行相隔兩地實驗室時頻之比對，如圖2所示。

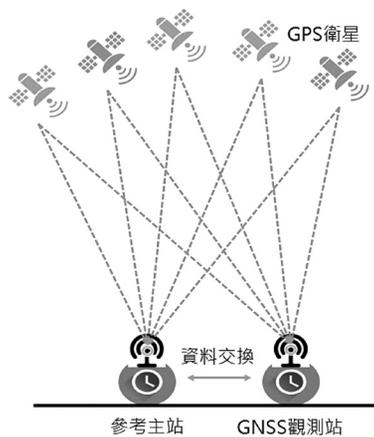


圖2 GPS共視法示意圖

本研究在共視法架構下，藉由中華電信研究院國家時間及頻率標準實驗室維持的TWTF站當作頻率參考站（參考主站，clock A），當參考站及GNSS觀測站（clock B）進行時頻比對時，實驗室通過接收機接收來自相同衛星的訊號，並將解算的結果與實驗室參考站相比，再經資料交換，計算TWTF站的鐘差減去GNSS觀

測站的鐘差 (clock B)，可分析出參考站與GNSS觀測站間的時間差，即為GNSS觀測站的時間偏移量 (或稱相位差, phase offset)，可用以下算式呈現：

$$[(\text{clock B})-\text{GPS time}] - [(\text{clock A})-\text{GPS time}] \dots\dots\dots (1)$$

即在t時刻時[(clock B)-(clock A)]可得到GNSS觀測站的時間偏移量。計算時間偏移量的方式分別採相位法以及電碼法：

1. 相位法

相位法是透過未差分的GPS相位資料推求接收儀時錶誤差 (Yeh et. al., 2013)，其計算公式為：

$$\begin{aligned} \Phi_i^k = & |\bar{\rho}^k(t - \omega_i^k) - \bar{\rho}_i(t)| - c \cdot (\delta_0^k + \delta^k(t)) \\ & - I_i^k + T_i^k + c \cdot (\delta_{i0} + \delta_i(t)) + \lambda N_i^k + \varepsilon_i^k \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

其中：

- Φ_i^k ：相位觀測量 (meter)
- $\bar{\rho}^k(t - \omega_i^k)$ ：衛星k在移動時間 $(t - \omega_i^k)$ 時的位置向量 (meter)
- ω_i^k ：訊號傳遞時間 (second)
- $\bar{\rho}_i(t)$ ：觀測站i在接收時刻t時的位置向量 (meter)
- c ：光速 (m/sec)
- δ_0^k ：衛星k的硬體延遲 (second)
- $\delta^k(t)$ ：在t時刻的衛星時錶誤差 (second)
- I_i^k ：電離層延遲 (meter)
- T_i^k ：對流層延遲 (meter)
- δ_{i0} ：接收儀i的硬體延遲 (second)
- $\delta_i(t)$ ：在t時刻的接收儀時錶誤差 (second)
- λ ：波長 (meter)
- N_i^k ：初始週波未定值 (cycle)
- ε_i^k ：相位隨機誤差 (meter)

計算時採用瑞士伯恩大學天文研究所研發的Bernese軟體進行計算。為了求得較準確的接收儀時頻訊息，解算前除了對於相位資料進行週波脫落偵測及平滑化處理外，於參數預估程式解算未知值的過程中，再利用輸出的殘差反覆消除雜訊較大的觀測時段及衛星，即可求得較準確的接收儀內部時間偏移量。

2. 電碼法

GPS電碼時頻傳送技術用於國際時頻比對上已行之有年，早期是以C/A電碼觀測量為基礎產生時間同步訊號，世界各國實驗室使用BIPM所制定的衛星追蹤時刻表鎖定特定衛星以達成實驗室間衛星共視，利用此共視技術可降低衛星端所產生的誤差，使兩實驗室間時間比對誤差約為3 ~ 10奈秒。近年來，利用雙頻GPS接收機解算P1及P2電碼，P1/P2電碼的線性組合得到電離層延遲的估測值以消除信號通過大氣層時所產生的誤差使GPS電碼傳時技術的精確度提高到奈秒，約有85%的TAI (International Atomic Time, 國際原子時) 鏈路採用此方式進行各國國家標準實驗室間的時頻比對。計算上假設地面天線之精密位置已知，透過GPS接收機產生之P1/P2虛擬距離 (pseudorange) 及星曆檔 (navigation message)，以疊代法計算可以得出GPS衛星P1/P2電碼實際發出時間，修正衛星電碼偏差、相對論效應、大氣延遲等效應後，可得出衛星時間與GPS接收機內部參考時鐘之時間差，其計算公式為：

$$P_i^k = |\vec{\rho}^k(t - \omega_i^k) - \vec{\rho}_i(t)| - c \cdot (\delta_0^k + \delta^k(t)) + I_i^k + T_i^k + c \cdot (\delta_{i0} + \delta_i(t)) + e_i^k \dots\dots\dots (3)$$

其中：

P_i^k ：虛擬距離觀測量 (meter)

e_i^k ：虛擬距離的多路徑效應及隨機誤差 (meter)

(二) 頻率穩定度與頻率偏移進行精度驗證

1. 頻率穩定度

實際上由於振盪器的頻率會不斷老化飄移，傳統以平均值為基準計算之標準差於計算區間增大時會逐漸發散，無法用以評估振盪器頻率品質，通常以美國時頻統計專家David Allan (Allan and Weiss, 1980) 所定義的Overlap Allan Deviation進行評估。本研究在計算頻率穩定度時即採用Overlap Allan Deviation方法計算，並取最短平均區間進行比較，其計算公式為：

$$\sigma_y(\tau) = \left[\frac{1}{2(N-2m)\tau^2} \sum_{k=1}^{N-2m} [x_{k+2m} - 2x_{k+m} + x_k]^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

其中：

x_k ：每一時間節點的偏移量 (相位差)

τ ：取樣時間

N ：時間節點數

m ：取樣組數

x_r 即為由相位法與電碼法所計算出的時間偏移量。由於BIPM與IGS皆使用間距300秒之rinex觀測檔計算，因此本研究參考國際慣例，取樣區間同樣採用300秒。

2. 頻率偏移

頻率偏移的定義是 $(f_0 - f)/f_0$ ，其中 f_0 為參考件頻率， f 為待測件頻率。除了直接量取頻率比較外，若可取得一段時間內參考件與待測件之相對相位差（phase offset），也可用取相位差相對取樣時間的線性擬合（linear fit）來做平均。本研究再以相位法或電碼法取得參考站與待測站之相對相位差後，使用時頻量測常用軟體Stable32 (<http://www.stable32.com/>) 計算頻率偏移及頻率穩定度。

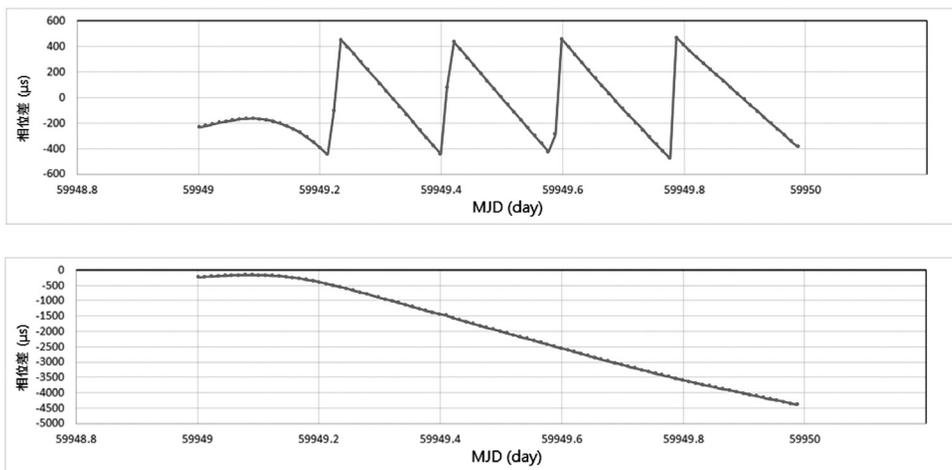


圖3 WARO相位差（上）及修正跨相點後之相位差（下）

在以電碼法取得之相位差計算頻率偏移時，因GPS電碼是碼率（chip rate）為1.023 Mchip/s，互相正交之偽隨機噪聲碼（PRN），碼訊約每1毫秒會重複一次，當接收儀內部震盪器頻率偏移過大時，往往於短時間內接收儀時間與衛星時間差就超過1 ms，此時解算衛星與接收儀內部之相位差並不會持續擴大，而是跳回約1 ms，再持續擴大，且一直重複，此現象我們稱為跨相。我們有於CIME、WARO兩站觀測到此現象，為求真實接收儀內部震盪器之頻率偏差，我們將CIMIE、WARO跨相點的相位差以Stable32軟體修正後再計算實際頻率偏移。圖2顯示修正前後的相位差，橫軸以簡化儒略日（Modified Julian Day, MJD）呈現，為WARO MJD59949（2023

年1月5日) 當日以電碼法得出之相位差(圖3上)及修正跨相點後之相位差(圖3下)。

四、遠距頻率校正結果

(一) 時間偏移量

本研究以相位法與電碼法分別計算13處GNSS觀測站接收儀的時間偏移量(相位差), 其中11處皆落在衛星時間偏移量30~50 ns的規格範圍內, 然同樣都是Topcon Net-G3A的CIME與WARO兩站, 其時間偏移量達500000 ns(電碼法), 如圖4所示, 斜率超出衛星時間偏移量的規格過大, 而若斜率大, 其週波脫落值應亦大。

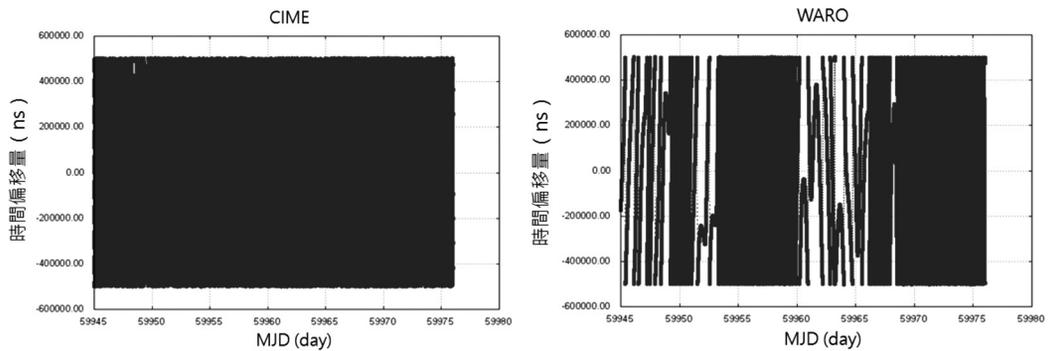


圖4 CIME (左) 與WARO (右) 之時間偏移量

CIME站觀測資料數與週波脫落數的比值Observation/ cycle slips (o/slps) 為45, WARO o/slps = 831, 可知CIME站每45筆資料有1筆週波脫落, 大於WARO站。應進一步確認是否為石英震盪器損壞, 或是頻率沒有鎖GPS所造成, 如果鎖定GPS後, 按雙頻接收機的性能, 時間偏差在幾十ns以內算合理, 若偏差量太大則代表接收儀出現異常, 一般先懷疑是內部震盪器失鎖, 而看頻率偏移的結果(如後所述)也是如此; 如果是溫控型石英震盪器, 頻率偏移大約在 10^{-8} ~ 10^{-9} 左右。若是溫度補償型, 大約在 10^{-6} 左右 (free run下)。

(二) 頻率穩定度以及頻率偏移

各站於2023/1/1~1/7的平均頻率穩定度與頻率偏移如圖5與圖6，由圖可看出接收儀型號為Topcon Net-G3A的CIME與WARO之頻率穩定度與頻率偏移較差分別為 10^{-8} ~ 10^{-6} 與 10^{-7} ~ 10^{-11} 等級，已超出y軸座標範圍數個量級，未達衛星頻率穩定度與頻率偏移應在 $1E-12$ 的規格，其他站的頻率穩定度與頻率偏移由相位法及電碼法計算結果皆相當一致且合理，惟接收儀型號惟Leica GR50的MAJA與VR01兩站之頻率穩定度稍微略差，但仍在規格範圍內。

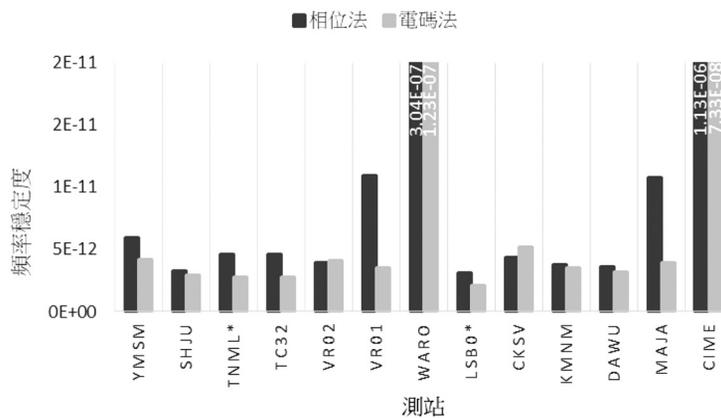


圖5 各站平均頻率穩定度

註：圖中*為外接鉅鐘之測站

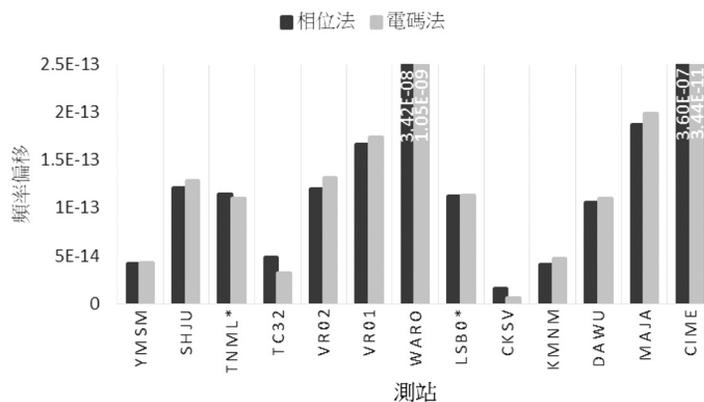


圖6 各站平均頻率偏移

表2 頻率誤差之測站分類

類別	頻率穩定度	頻率偏移	GNSS站
第一類	3.73E-12	7.26E-14	YMSM, TNML, SHJU, TC32, LSB0, VR02, CKSV, KMNM, DAWU
第二類	1.09E-11	1.77E-13	VR01, MAJA
第三類	3.04E-07	-3.42E-08	WARO
第四類	1.13E-06	-3.60E-07	CIME

五、頻率誤差對於定位精度之影響

(一) 頻率誤差對於精密單點定位精度之影響

將GNSS測站資料以精密單點定位方法進行解算，採用112年1月1日至1月7日共七天的資料，考量地籍測量實務上衛星定位測量外業作業時間，將觀測資料分為每日解、8小時解、4小時解（一等衛星控制點）、2小時解（二等衛星控制點）、1小時解（加密衛星控制點）來進行解算，1小時解使用每天第一個小時的資料解算、2小時解使用每天前兩個小時的資料解算、4小時解使用每天前四個小時的資料解算、8小時解使用每天前八個小時的資料解算、每日解使用每天的資料解算。由Bernese 5.2軟體將位置解算完成後，使用臺灣地區大地基準及坐標系統轉換程式將TWD97 (X, Y, Z) 座標轉換為TWD97 (N, E, h) 座標。接著計算各GNSS測站的標準偏差 (σ)。

為評估頻率誤差對精密單點定位精度的影響，我們依據頻率穩定度以及頻率偏移將GNSS站進行分類，如表2，其中頻率穩定度與偏移分別為各類測站的平均值，第一類與第二類的頻率穩定度與偏移在標準範圍內，尤以第一類最佳，第三類與第四類超出標準範圍，以第四類最差。

為了將這四類頻率誤差與精密單點定位精度相比較，分別計算這四類GNSS站的平均定位精度，其中水平向定位精度 (σ_H) 及垂直向定位精度 (σ_V) 計算方式如下：

$$\begin{cases} \sigma_H = \frac{\sum \sqrt{\sigma_N^2 + \sigma_E^2}}{n} \\ \sigma_V = \frac{\sum \sigma_h}{n} \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

其中 n 為該類別之GNSS測站個數， σ_N 為該GNSS站N方向的標準偏差， σ_E 為該GNSS站E方向的標準偏差， σ_h 為該GNSS站h方向的標準偏差；計算結果如表3。

表3 四類頻率誤差與精密單點定位不同解算時間之定位精度

類別	頻率穩定度	頻率偏移	精密單點定位 (mm)				
			1 h	2 h	4 h	8 h	24 h
第一類-H	3.7E-12	7.3E-14	23.5	23.5	5.1	2.5	1.9
第二類-H	1.1E-11	1.8E-13	24.6	24.6	7.0	3.1	1.9
第三類-H	3.0E-07	-3.4E-08	25.5	25.6	3.8	3.7	2.0
第四類-H	1.1E-06	-3.6E-07	84.8	84.8	55.1	39.4	10.1
第一類-V	3.7E-12	7.3E-14	29.7	13.0	8.5	5.2	3.9
第二類-V	1.1E-11	1.8E-13	24.5	13.7	8.0	4.0	5.5
第三類-V	3.0E-07	-3.4E-08	31.3	8.4	8.2	7.0	2.9
第四類-V	1.1E-06	-3.6E-07	160.2	105.5	122.1	34.4	29.9

圖7為精密單點定位精度與頻率誤差比較圖，左邊縱軸為定位精度，右邊縱軸為頻率誤差，橫軸為各類別水平（圖7上）與垂向（圖7下）在不同解算時間的結果，例如圖7上圖之橫軸上的第一類，紅色bar為精密單點定位1小時解算的水平向定位精度（mm）、橘色是2小時、黃色是4小時、綠色是8小時、藍色飾24小時，黑色圓點加實線代表頻率穩定度，灰色米字加虛線代表頻率偏移，圖中頻率偏移以絕對值呈現。為了便於比較，將定位精度的範圍固定在0 mm ~ 40 mm。由圖表中可以得到：

1. 第四類定位精度最差，解算時間24小時的定位精度僅10 mm（水平向）及29.9 mm（高程向）。
2. 第三類雖然頻率穩定度與偏移不在標準範圍，但其水平定位精度在解算時間4小時以上優於5 mm，24小時解算精度達2.0 mm；高程向定位精度稍差，但在24小時解算時精度仍達2.9 mm。
3. 精密單點定位不同時間解算精度，當以1小時解算時，定位精度最差，而隨著解算時間拉長時，定位精度則大幅提升，在水平向與垂直向都有解算時間越長定位精度越高的現象，其中水平向在1小時與2小時解算的精度相同。
4. 以上結果顯示，當頻率穩定度及頻率偏移分別在3.0E-07及3.4E-08、且解算時間4小時以上時，不影響精密單點定位精度；而當頻率穩定度及頻率偏移在1.1E-06及3.6E-07時，則精密單點定位精度結果不佳。

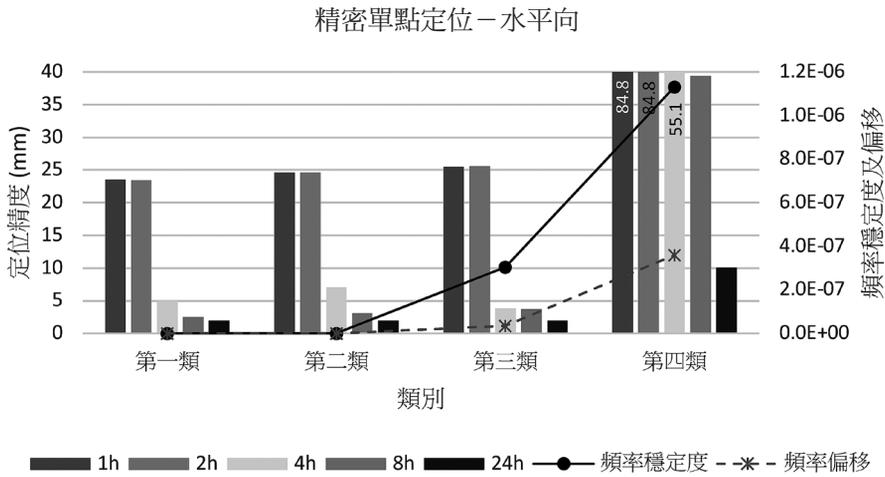


圖7 精密單點定位精度與頻率誤差 (上)

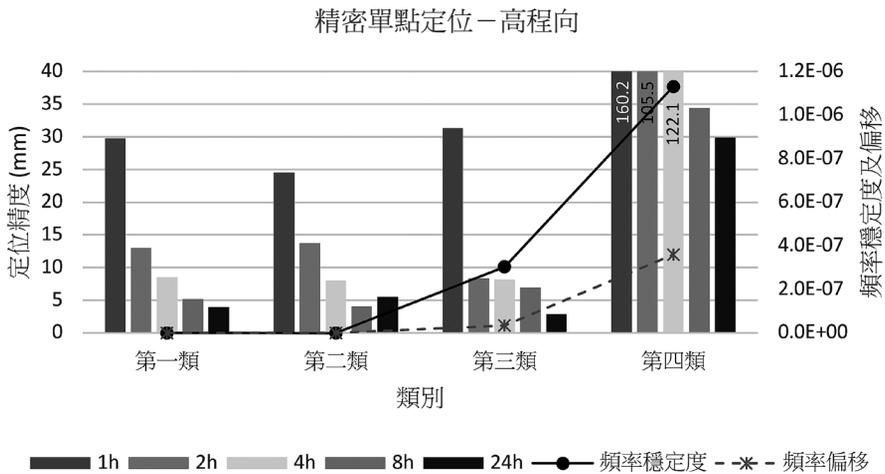


圖7 精密單點定位精度與頻率誤差 (下)

(二) 頻率誤差對於靜態相對定位精度之影響

以靜態相對定位方法解算GNSS測站資料，運用靜態相對定位，固定TWTF主站以基線解算的方式，計算其他GNSS站的坐標。資料時間及解算時間跟精密單點定位方法相同，112/1/1~1/7共七天，分為1、2、4、8、24小時解算每日資料，同樣進行座標轉換並計算各站標準偏差，接著評估頻率誤差對靜態相對定位精度的影響。使用前述依據頻率穩定度以及頻率偏移將GNSS站進行分類的結果，再依據不同基線長度（相對於楊梅TWTF站）將各類再分為短、中、長距離，以比對不同距

離的頻率誤差對靜態相對定位精度的影響，分類如表4所示，結果列於表5。

表4 頻率誤差與短中長距離之測站分類

基線長度	類別	GNSS站
短距離	第一類	YMSM, TNML, SHJU
中距離	第一類	TC32, LSB0, VR02
	第二類	VR01
	第三類	WARO
長距離	第一類	CKSV, KMNM, DAWU
	第二類	MAJA
	第四類	CIME

表5 短中長距離四類頻率誤差與靜態相對定位不同解算時間之定位精度

基線	類別	頻率穩定度	頻率偏移	靜態相對定位 (mm)				
				1 h	2 h	4 h	8 h	24 h
短距離	第一類-H	4.6E-12	9.3E-14	5.2	3.1	2.0	1.9	1.1
	第一類-V	4.6E-12	9.3E-14	19.5	8.0	8.0	4.5	2.8
中距離	第一類-H	3.9E-12	9.4E-14	17.9	5.3	2.8	2.5	1.4
	第二類-H	1.1E-11	1.7E-13	20.7	11.7	5.7	2.1	1.2
	第三類-H	3.0E-07	-3.4E-08	10.5	4.0	3.2	3.6	1.8
	第一類-V	3.9E-12	9.4E-14	27.3	15.2	8.2	6.4	4.1
	第二類-V	1.1E-11	1.7E-13	23.9	15.6	6.5	6.1	5.1
	第三類-V	3.0E-07	-3.4E-08	37.6	14.9	8.8	9.3	3.6
長距離	第一類-H	3.9E-12	5.5E-14	6.5	3.3	2.5	2.9	1.3
	第二類-H	1.1E-11	1.9E-13	18.4	10.6	5.1	2.7	1.3
	第四類-H	1.1E-06	-3.6E-07	13.7	4.6	1.6	1.9	N/A
	第一類-V	3.9E-12	5.5E-14	14.4	11.0	9.3	9.5	4.1
	第二類-V	1.1E-11	1.9E-13	15.1	11.3	9.9	9.4	5.7
	第四類-V	1.1E-06	-3.6E-07	13.3	17.2	5.5	7.8	N/A

圖8至圖10分別為短、中、長距離靜態相對定位精度與頻率誤差比較圖，各圖左右縱軸範圍皆一致（與圖7之精密單點定位精度與頻率誤差的縱軸範圍相同）。由圖中可以看到：

1. 短距離的部分只有第一類頻率穩定度及偏移較佳的測站，此類定位精度良好，且隨著解算時間增加，其定位精度也提高，24小時解算之精度達1.1 mm（水平）與2.9 mm（高程）。
2. 中距離的部分有第一、二、三類，解算時間2小時以上時，精度即大幅提高。第三類雖然頻率穩定度與偏移不在標準範圍，但其定位精度仍良好。中距離在24小時解算之精度達1.2 mm ~ 1.8 mm（水平）與3.6 mm ~ 5.1 mm（高程）。
3. 長距離的部分有第一、二、四類，與中距離一樣在解算時間2小時以上精度就大幅提升。而第四類雖然頻率穩定度與偏移很差，但其定位精度仍然不錯。長距離在24小時解算之精度達1.3 mm（水平）與4.1 mm ~ 5.7 mm（高程）。

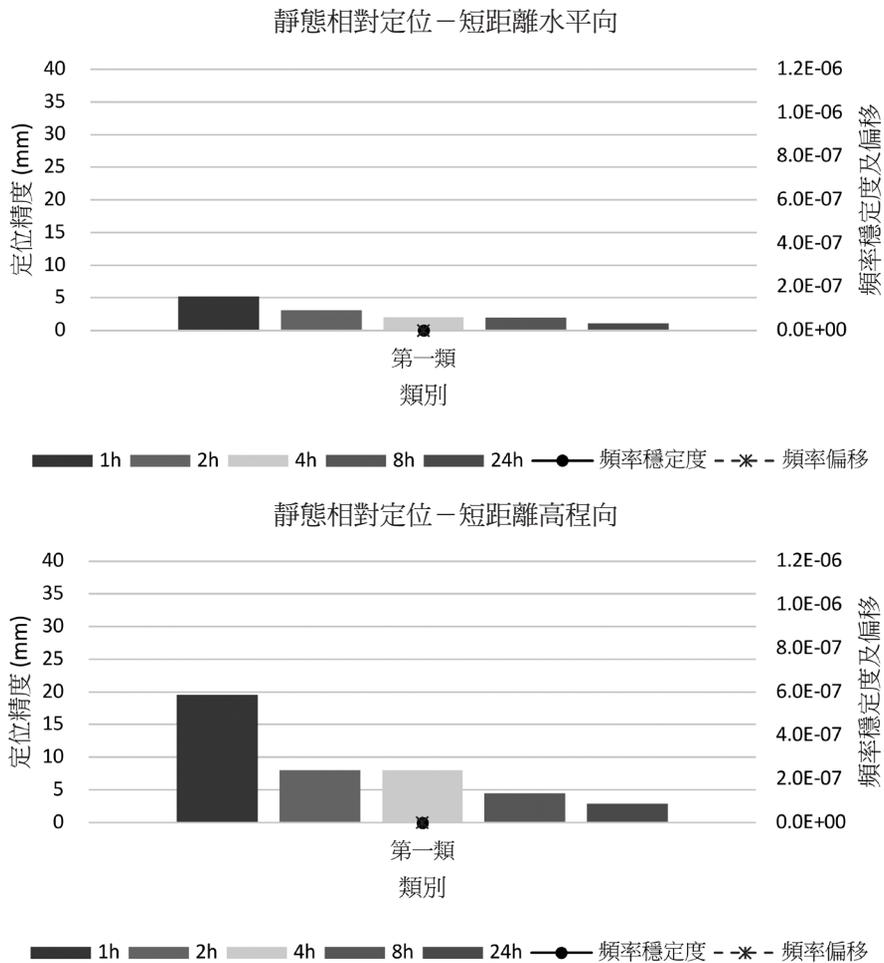


圖8 短距離靜態相對定位精度與頻率誤差（下）

4. 靜態相對定位法因使用差分定位消除時錶誤差，所以雖然第三、四類頻率誤差較大，卻不影響其定位精度的表現。由以上結果顯示，頻率誤差在頻率穩定度 $1.1E-06$ 以及頻率偏移 $3.6E-07$ 時，仍不影響靜態相對定位精度。
5. 第四類僅有CIME一站，以Bernese使用靜態相對定位解算24小時位置坐標無法解算成功，應為CIME站的觀測資料在UTC時間9~24時較差，以致於加入更多觀測資料之後反而無法求解。

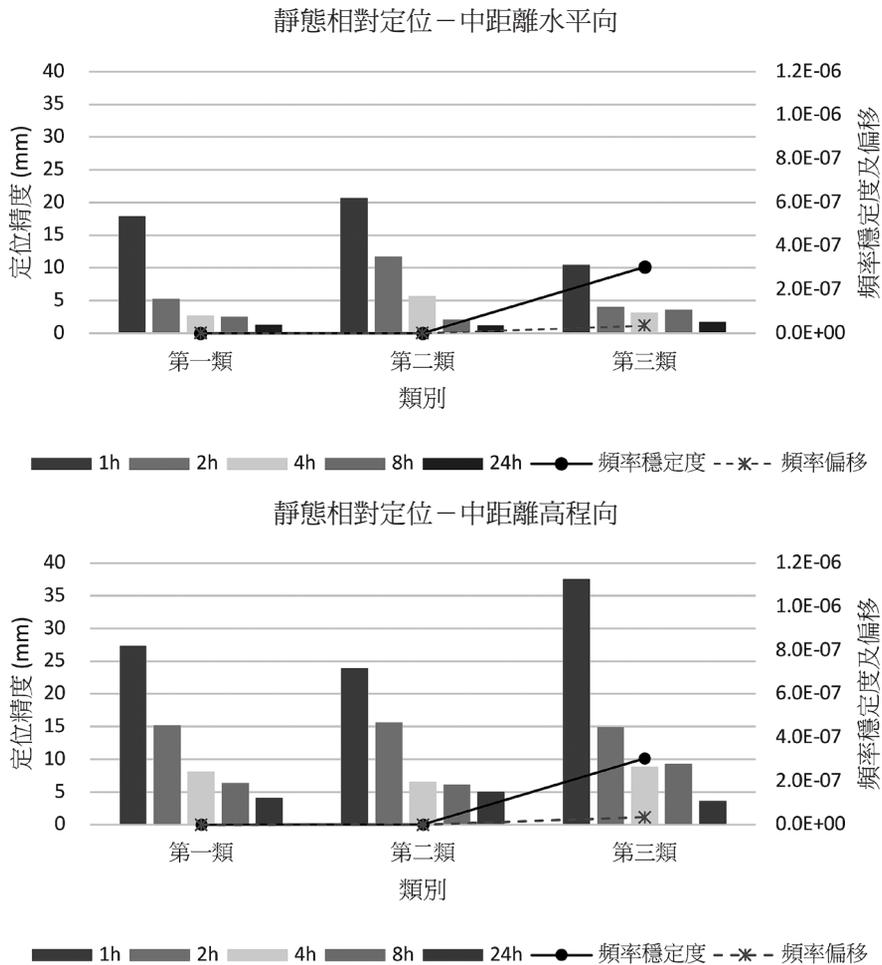


圖9 中距離靜態相對定位精度與頻率誤差

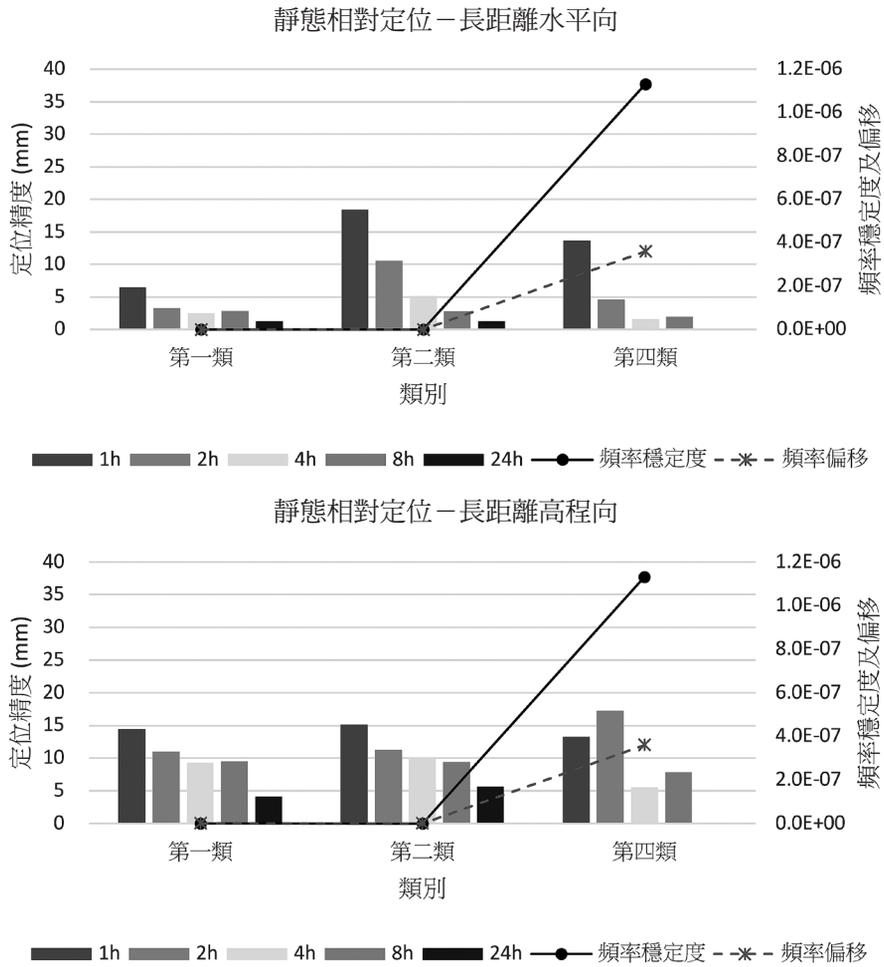


圖10 長距離靜態相對定位精度與頻率誤差

六、結 論

本研究透過未差分的GPS相位資料計算接收儀頻率偏差，開發GPS遠距頻率校正之技術，並探討頻率誤差對於短距離、中距離、長距離靜態相對定位及精密單點定位精度之影響。採用共視法研究GPS遠距頻率校正技術，分別利用相位法與電碼法解算13處GNSS觀測站之時間偏差量，並以頻率穩定度與頻率偏移進行精度驗證，所得到的精度與GPS衛星規格相同，其中時間偏差量規格在正負30~50 ns、頻率穩定度與頻率偏移規格在1E-12，表示開發之GPS遠距頻率校正技術已成熟可供使用。利用相位法與電碼法解算CIME與WARO之GNSS觀測站的時間偏差量、頻率

穩定度與頻率偏移時，發現其數值較衛星規格相差甚遠，衛星時間偏移量的規格應該在正負30~50 ns，但CIME與WARO其時間偏移量達正負500000 ns（電碼法），兩站型號同為Topcon Net-G3A，推斷為其內部石英震盪器異常所致。頻率誤差（頻率穩定度及頻率偏移）對精密單點定位精度的影響大於靜態相對定位精度的影響，係由於靜態相對差分定位消除時錶誤差之故，使頻率穩定度及頻率偏移最差的第三類（WARO）及第四類（CIME）其靜態相對定位精度仍良好，由本研究（使用13個測站）結果得出：使用精密單點定位時，頻率誤差的可用量級在頻率穩定度低於 $3.0E-07$ 以及頻率偏移低於 $3.4E-08$ 時；而採靜態相對定位時，頻率誤差的可用量級在頻率穩定度低於 $1.1E-06$ 以及頻率偏移低於 $3.6E-07$ 時。從解算時間對定位精度的影響來看，精密單點定位在解算時間4小時以上精度才大幅提升，而靜態相對定位在解算時間2小時以上精度即大幅提升。綜合以上結果顯示，當接收儀頻率誤差大時，採用靜態相對定位對土地測量精度的影響甚微。本研究所建立的頻率校正作業方式及成果呈現其有效性，未來可以此為範本，建立一套eGNSS基準站遠距校正或查核之作業方式，提升作業效率並確保成果品質。

本研究採用共視法分析頻率誤差時，僅使用GPS衛星，然而近年來GNSS衛星已為大眾廣泛使用，未來將持續探討多星系的遠距頻率校正議題。此外，在地籍測量常用的RTK定位模式，由於國土測繪中心e-GNSS為短時間、即時的解算結果，推估其定位精度將受頻率誤差影響較大，未來將做進一步探討。

七、致 謝

本研究承蒙內政部國土測繪中心計畫案（NLSC-112-31）以及科技部計畫案（MOST 111-2622-E-305-001）提供經費以及觀測資料，使本研究得以順利完成，特此申謝。

參考文獻

內政部國土測繪中心，2024，e-GNSS 即時動態定位系統入口網站：<https://egnss.nlsc.gov.tw/content.aspx?i=20150625102426570>，瀏覽日期西元 2024 年 1 月 30 日。
National Land Surveying and Mapping Center, Ministry of the Interior, 2024, e-GNSS Real-Time Kinematic (RTK) Positioning System Portal, Viewed on 2024.01.30.

- Allan, D. W. and M. A. Weiss, 1980, Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite, 34th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphia, PA, USA, 1980, pp. 334-346.
- Boldbaatar, E., D. Grant, S. Choy, S. Zaminpardaz and L. Holden, 2023, Evaluating Optical Clock Performance for GNSS Positioning, *Sensors*, 23(13), 5998.
- Defraigne, P. and C. Bruyninx, 2001, Time Transfer for TAI using a geodetic receiver, An Example with the Ashtech ZXII-T, *GPS Solutions*, 5(2), 43-50.
- Defraigne, P. and G. Petit, 2015, CGGTTS-Version 2E: an extended standard for GNSS Time Transfer, *Metrologia*, 52(6), G1.
- Lin, S. Y., W. H. Tseng, H. T. Lin, Y. J. Huang and K. M. Feng, 2010, Long-term inconsistency between TWSTFT and GPS time transfer results in PTB-TL and NICT-TL time links, In: EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum, IEEE, p. 1-4.
- Lin, S. Y. and Z. Jiang, 2017, GPS all in view time comparison using multi-receiver ensemble. In: 2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), IEEE, p. 362-365.
- Mikoś, M., K. Kazmierski and K. Sońnica, 2023a, Characteristics of the IGS receiver clock performance from multi-GNSS PPP solutions, *GPS Solutions*, 27(1), 55.
- Mikoś, M., K. Kazmierski, T. Hadas and K. Sońnica, 2023b, Multi-GNSS PPP solutions with different handling of system-specific receiver clock parameters and inter-system biases, *GPS Solutions*, 27(3), 137.
- Ray, J. and K. Senior, 2005, Geodetic techniques for time and frequency comparisons using GPS phase and code measurements, *Metrologia*, 42(4), 215.
- Yeh, T. K., Y. A. Liou, C. S. Wang and C. S. Chen, 2008, Identifying the degraded environment and bad receivers setting by using the GPS data quality indices, *Metrologia*, 45(5), 562.
- Yeh, T. K., Y. D. Chung, C. T. Wu, C. S. Wang, K. Zhang and C. H. Chen, 2012, Identifying the relationship between GPS data quality and positioning precision: case study on IGS tracking stations, *Journal of Surveying Engineering*, 138(3), 136-142.
- Yeh, T. K., C. H. Chen, G. Xu, C. S. Wang and K. H. Chen, 2013, The impact on the positioning accuracy of the frequency reference of a GPS receiver, *Surveys in geophysics*, 34, 73-87.