

GPS/Galileo 單頻即時動態定位效能分析

A Feasibility Study of GPS/Galileo Single-frequency RTK Positioning

沈力洋¹

楊名²

陳鶴欽³

摘要

GPS 即時動態定位 (Real-Time Kinematic, RTK) 是目前最廣泛被應用在測量工程中的衛星定位技術，相較於傳統雙頻 RTK，單頻接收儀的週波值解算效率明顯較差，使得實務應用仍有困難。然而在不久的未來情況將有所改變，歐洲的導航衛星系統 Galileo 於 2013 年即將加入運作，預期將有更強的衛星幾何及觀測數量以加速單頻 RTK 的解算效率，更重要的是單頻接收儀在儀器價格上將有其優勢，因此是極具潛力的 RTK 設備。為降低基線距離限制，研究中將配合台灣 e-GPS 系統之虛擬參考站 (Virtual Reference Station, VRS) 技術進行 RTK，藉由整天 24 小時真實單頻接收儀觀測量與模擬產生的 GPS/Galileo 觀測量來驗證單頻 RTK 之效能。實驗將 RTK 系統分成三種組合：(1) GPS/Galileo 雙系統單頻：L1/E1；(2) GPS 單系統雙頻：L1/L2；(3) GPS 單系統單頻：L1。成果顯示出未來的 GPS/Galileo 整合系統單頻 RTK 週波值解算效益將是最高，不僅優於現行的 GPS 單、雙頻，在定位精度方面也顯示整合系統單頻 RTK 之 3-D RMS 為三種系統中最好。隨著多系統 GNSS 時代的到來，研究成果指出未來使用 GPS/Galileo 單頻接收儀施測之效益與精度將會超越傳統的 GPS 雙頻接收儀，配合現行 e-GPS 系統，將是台灣 RTK 使用者最有效、最經濟之定位模式。

關鍵詞：即時動態定位、全球導航衛星系統、虛擬參考站、單頻、e-GPS

Abstract

Real-Time Kinematic (RTK) positioning is the most widely used GNSS technique in surveying engineering. The single-frequency receivers have the cost advantage, but single-frequency RTK lacks enough measurements for quick and reliable carrier phase ambiguity resolution. This situation is about to change. The European Galileo constellation is scheduled to be completed by 2013 and it will be interoperable with the existing GPS system. This combined system (GPS/Galileo) will provide twice as many satellites as today's GPS, and thus it should substantially promote the application of single-frequency RTK. This research is aiming at exploring future single-frequency RTK performance associated with the GPS/Galileo combined system and Taiwan e-GPS

¹ 國立成功大學測量及空間資訊學系碩士

² 國立成功大學測量及空間資訊學系教授

³ 內政部國土測繪中心技正

system, as compared with today's GPS dual-frequency RTK. The performance of integer phase ambiguity resolution was assessed with 24-h actual GPS data and simulated GPS/Galileo data in three different scenarios: (1) single-frequency GPS/Galileo (GPS L1/Galileo E1), (2) dual-frequency GPS (GPS L1/L2), and (3) single-frequency GPS (GPS L1). Comparison results show that, among the three scenarios, the best ambiguity resolution performance is achieved with single-frequency GPS/Galileo and also have the best 3-D RMS. This indicates that the future dual-system RTK can be practically built with low-cost single-frequency receivers. It should have a great impact on many engineering applications.

Keyword: RTK, GNSS, VRS, Single-frequency, e-GPS

一、前言

衛星定位的測量技術發展至今已成熟，人們對於高精度且快速定位的需求日趨增加，故即時動態定位 (Real-Time Kinematic, RTK) 儼然成為最廣泛應用的衛星測量技術。一般來說，現行雙頻接收儀的定位精度高，各儀器廠商莫不把全力投注於開發擁有雙頻、多種電碼組合的儀器上，使得目前 RTK 雙頻接收儀仍屬高價測量產品。相反地，就單頻與雙頻接收儀價格而言，後者價格約為前者 20%，價差超過一萬美金，然而單頻接收儀雖有低價的優勢，但僅有電碼 (C/A code) 觀測量或 L1 載波相位觀測量，在測量應用上並無法如雙頻觀測量組成各類的線性組合 (寬巷、無電離層等)，造成週波值解算效率上的明顯差異 (吳錫賢, 1996)，故無法被大量推廣應用。但隨著全球導航衛星系統 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 時代的到來，未來歐盟的 GNSS - Galileo 系統加入運作後，其觀測量將與原來 GPS 觀測量完全相容，整合的雙系統 (GPS/Galileo) 在週波值求解效率以及定位精度與可靠度

上，都將有一定程度的進步 (McDonald, 2002)。

未來的現代化 GPS 與 Galileo 系統都將各自擁有三種民用訊號，如表 1 所示，系統整合後 GPS/Galileo 雙系統將會有單頻、雙頻、三頻多種 RTK 組合，研究也表示未來在三頻觀測下 RTK 求解成功率及定位精都將是最高，且受基線距離之影響較小 (Landau *et al.* 2004)。然而在短基線時，由於衛星顆數與觀測頻率之增加，欲估算之週波值數目相對增加，故整數週波值搜尋的時間 (Time To Fix Ambiguities, TTFA) 也花費越長，使 RTK 效能會有所折扣 (Feng, 2005)。因此，儘管發展多系統多頻率的衛星定位測量技術已為近期之研究重點，但具有低成本且高精度的 L1 (=E1) 單頻 GNSS 接收儀將是極具潛力的 RTK 測量設備，其優勢除了價格外，當 GPS/Galileo 整合系統完全運作後，兩倍以上的可視衛星及優秀的衛星幾何將彌補單頻觀測之缺點，且所求解的估計參數數目將與傳統單系統雙頻 (GPS L1/L2) 相同，預期能達到與現行系統相當甚至更有效之定位效益。

表1 現代化 GPS 與 Galileo 民用訊號

	<i>GPS</i>	<i>Galileo</i>
使用訊號與頻率 (民用)	L1 : 1575.42 (MHz)	E1 : 1575.42 (MHz)
	L2 : 1227.60 (MHz)	E5b : 1207.14 (MHz)
	L5 : 1176.45 (MHz)	E5a : 1176.45 (MHz)

即時動態定位之基礎建立於差分相對定位，因此基線距離不僅是傳統雙頻 RTK 基線解算首要考量的因素也是單頻 RTK 的瓶頸所在。內政部國土測繪中心所建置之台灣 e-GPS 網路化即時動態定位系統 (Network RTK) 已正式營運啟用，由 e-GPS 電子基準站觀測網可產生虛擬參考站 (Virtual Reference Station, VRS) 觀測資料作為 RTK 主站。VRS 通常與未知點距離通常不會超過 10 公尺，基線距離極短，因此理論上與基線有關之系統誤差可由相對差分定位予之消除 (王敏雄等, 2006)。故台灣 e-GPS 系統將使得 RTK 使用者有效的節省架設參考站的成本，並大大降低 RTK 測量的距離限制，若能搭配低價位之單頻接收儀作為移動站，則又可以將儀器需求成本壓低，以推廣 e-GPS 之應用。

未來 GNSS 將逐漸成為多系統多頻率的特性，且各系統間之民用訊號可互相相容，各儀器廠商紛紛將現有的 GPS 技術擴充為 GNSS 技術，接收儀的頻道 (channel) 數目預計將會提高為現有的兩倍以上，而成本僅微增為原本之 1.2 倍 (McDonald, 2002)。因此本研究嘗試以真實單頻接收儀搭配上上述 e-GPS 電子基準站觀測網，探討進行 RTK 動態定位的可行性，更進一步的根據 GPS L1 單頻實測資料成果作為模擬

Galileo E1 觀測量設定之依據，由模擬的 Galileo 資料，討論未來使用雙系統單頻 (GPS L1/Galileo E1) 接收儀是否可達到與目前單系統雙頻 (GPS L1/L2) 接收儀相近之即時動態定位效率，並分析未來的 GNSS 單頻接收儀可否取代 GPS 雙頻接收儀作為 e-GPS 的 RTK 移動站。

二、GPS/Galileo 單頻 RTK 演算法

2.1 GPS 與 Galileo 系統參數整合

參考坐標系統

在進行衛星定位以前，必須對其參考框架給予定義，GPS 所使用的坐標系統為 WGS-84 (World Geodetic System 1984)，其為 ITRF (International Terrestrial Reference Frame) 的具體實現之一。為了獨立運作的理由，Galileo 採行與 WGS-84 不同的 ITRF 具體實現，稱為 GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame) (Hein *et al.*, 2002)。文獻指出 GTRF 與 WGS-84 之間的差別預計將會被約制在 3 cm 以內，遠小於廣播星曆的誤差量，也小於精密精曆的誤差 (Miller, 2004; Swann *et al.*, 2006)，因此這系統性的微小差異對絕大多數的使用者而言是可以忽略的。

系統時間差

傳統單頻 GPS 觀測量中包含 C/A 電碼及 L1 載波相位觀測量，觀測量中皆包含系統誤差如衛星時錶差、接收儀時錶差、對流層延遲誤差、電離層延遲誤差等，當同時使用 GPS 與 Galileo 兩系統之觀測量時，還需考慮兩者間的系統時間偏差 (GPS-Galileo Time Offset, GGTO)，今假設一參數 τ 代表此項之誤差，並將此項誤差包含在 Galileo 觀測方程式內，則可列出 GPS 以及 Galileo 載波相位及虛擬電碼觀測方程式如下 (Leick, 1995; 楊名、江凱偉, 2009)：

GPS

$$\Phi = \rho - I + T + \lambda N + c(dt_i - dt) + \varepsilon_\Phi \quad (1)$$

$$P = \rho + I + T + c(dt_i - dt) + \varepsilon_P \quad (2)$$

Galileo

$$\Phi = \rho - I + T + \lambda N + c[dt_i - (dt + \tau)] + \varepsilon_\Phi \quad (3)$$

$$P = \rho + I + T + c[dt_i - (dt + \tau)] + \varepsilon_P \quad (4)$$

其中

Φ ：載波相位觀測量

P ：電碼觀測量

ρ ：衛星與接收儀之幾何距離

I 、 T ：電離層延遲與對流層延遲

N ：整數週波未定值

λ ：L1 (=E1) 載波波長

c ：光速

dt_i 、 dt ：分別為接收儀與衛星的時鐘誤差

τ ：GGTO

ε_Φ ：載波觀測量的雜訊

ε_P ：電碼觀測量的雜訊

2.2 卡曼濾波器模型

動態與靜態測量之主要不同在於未知參數之數量，靜態測量只包含一組位置坐標參數，而動態測量之位置參數會隨者時間增加，因此在計算模型上會與靜態有所不同。目前多數的動態觀測演算法都是以卡曼濾波為主的計算模型，原因在於卡曼濾波器可依照時間轉變而對參數進行推估及改正的特性來達到即時動態定位的需求。卡曼濾波器的方程式中包含一個動態方程式 (dynamic equation) 來表示參數隨時間改變而更新的狀況，以及一組觀測方程式 (observation equation) 來修正動態方程式所預估的參數，利用這兩種方程式的遞迴計算便可獲得動態求解的效果。卡曼濾波系統可表示如下 (Gelb, 1974; Welch and Bishop, 2006)：

$$\text{動態方程式： } x_{t+1}(-) = \phi_{t+1,t} \cdot x_t(+) + w_t, w_t \sim N(\mathbf{0}, Q_t) \quad (5)$$

$$\text{觀測方程式： } z_{t+1} = H_{t+1} \cdot x_{t+1} + v_{t+1}, v_t \sim N(0, R_t) \quad (6)$$

(5) 及 (6) 式中 (+)、(-) 分別表示參數的更新與預估，下標 t 、 $t+1$ 表示兩個相鄰的時刻；其中， x 表示未知數向量也就是欲估計之狀態 (state vector)，而 ϕ 即為狀態轉移矩陣， w 、 Q_t 為濾波器之系統預估的雜訊 (動態方程的誤差)， z 為觀測量向量， H 為觀測方程之設計矩陣， v 為觀測量之殘差向量。

2.2.1 觀測方程式

RTK 所使用之觀測量需先經過二次差分而得，雙系統下 GPS L1 與 Galileo E1 為同一頻率可視為同一種觀測量，所組成之二次差分僅含單頻載波與電碼兩類觀測量： Φ_{L1} 、 P_{L1} 。故在短基線下，二次差分後可消去系統誤差包括電離層、對流層及 GGTO，根據 (1)

~ (4) 式，可將單頻二次差分觀測方程式表示如下(楊名、江凱偉，2009)：

$$\Phi_{ij}^{kl} = (\rho_{ij}^{kl}) + \lambda \cdot N_{ij}^{kl} + \varepsilon_{\Phi_{ij}^{kl}} \quad (7)$$

$$P_{ij}^{kl} = (\rho_{ij}^{kl}) + \varepsilon_{P_{ij}^{kl}} \quad (8)$$

其中， i 、 j 分別表示已知及未知測站； k 、 l 分別表示兩顆衛星編號； Φ_{ij}^{kl} 為二次差分相位觀測量； P_{ij}^{kl} 為二次差分電碼觀測量； ρ_{ij}^{kl} 為真實幾何距離；

$$z_{t+1} = \begin{bmatrix} \Phi_{ij,L1}^{kl} \\ M \\ P_{ij,L1}^{kl} \\ M \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{ij}^{kl}}{\partial X} & \frac{\partial \Phi_{ij}^{kl}}{\partial Y} & \frac{\partial \Phi_{ij}^{kl}}{\partial Z} & \lambda & \Lambda \\ M & M & M & M & O \\ \frac{\partial P_{ij}^{kl}}{\partial X} & \frac{\partial P_{ij}^{kl}}{\partial Y} & \frac{\partial P_{ij}^{kl}}{\partial Z} & 0 & \Lambda \\ M & M & M & M & O \end{bmatrix}, \quad x_{t+1} = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ N_{ij,L1}^{kl} \\ M \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.2.2 動態方程式

動態方程式中狀態轉移矩陣 $\phi_{t+1,t}$ 是決定未知參數推估的過程，基本上必須藉由對移動站的運動方式或變化特性給予適當的設定，但如果對於移動站的運動模式不甚了解或是難以預測，則可以將狀態轉移矩陣

設定為單位矩陣 (identity matrix)，並將其系統的雜訊設定為無窮大，這種作法稱為 Random Walk (Gelb,

λ 為單頻波長； N_{ij}^{kl} 為載波相位整數週波值； $\varepsilon_{\Phi_{ij}^{kl}}$ 、 $\varepsilon_{P_{ij}^{kl}}$ 為二次差分相位與電碼觀測量雜訊。

在無週波脫落下，將兩式線性化後以矩陣表示成 (9) 式形式，成為一般平差模式，其中觀測量向量 z_{t+1} 、設計矩陣 H_{t+1} 及未知參數 x_{t+1} 可表示如下：

1974)。因此根據此概念將轉移矩陣 $\phi_{t+1,t}$ 中對應基線分量之係數設定為 1。而週波未定值部份，在動態解算時，進入到下一時刻後，若在未發生週波脫落的情形下，前一時刻與後一時刻的整數週波未定值將維持不變，故轉移矩陣中關於週波未定值的部份也可設為 1，則轉移矩陣 $\phi_{t+1,t}$ 等於一單位矩陣，表示如下：

$$\phi_{t+1,t} = \begin{bmatrix} 1 & & & & 0 \\ & 1 & & N & \\ & & 1 & & \\ & & & N & 1 \\ 0 & & & & O \end{bmatrix} \quad (10)$$

將動態方程式的系統雜訊 w_t 設定為零，以代表下一時刻以及前一時刻中未知參數變化並無系統性的行為，而

其方差-協方差矩陣 (system noise covariance matrix) Q_t 則可表示成 (11) 式：

$$Q_i = \begin{bmatrix} \infty & & \Lambda & & 0 \\ & \infty & & & \\ M & & \infty & & \\ & & & 0 & \\ 0 & & & & O \end{bmatrix} \quad (11)$$

如此設計也是根據 Random Walk 的概念， Q_i 對角線元素前三項代表空間位置且採用一個極大的值，目的在於忽略前一時刻空間位置的資訊；其餘對應週波值之對角線元素則採用零，代表完全相信前一時刻所估出之週波值，即當無週波脫落發生時，觀測時段內之週波值應相同。

2.3 OTF 整數週波值求解

觀測量經過卡曼濾波器處理後可以得到每一時刻所估計出的點位坐標以及週波值，而其中週波未定值尚為實數解，必須利用一套 OTF 整數搜尋演算法將估計的實數解固定為整數解，以滿足週波值的整數特性。但是對於單頻儀器而言並無法由雙頻觀測做線性組合，許多傳統搜尋法無法使用，因此本文採用 LAMBDA 低相關化計算方法進行整數搜尋。此法僅需由系統中卡曼濾波輸出的週波值最之方差-協方差矩陣，以及週波值的實數解向量，LAMBDA 即可進行整數週波值的搜尋 (Teunissen, 1995)，因此最適合單頻解算。

LAMBDA 得到整數解後，還需藉由比例測試 (ratio test) 決定整數週波值的正確性，Ratio 值代表整數解最佳組以及次佳組在搜尋空間中離實數解幾何距離差異，其定義如下 (Leick, 1995)：

$$Ratio = \frac{\Delta\hat{\sigma}_{2nd\ best}^2}{\Delta\hat{\sigma}_{best}^2} \quad (12)$$

其中， $\Delta\hat{\sigma}_{best}^2$ 為最佳組整數週波值為約制條件帶入最小二乘計算中所計算出之後驗單位權方差變化量； $\Delta\hat{\sigma}_{2nd\ best}^2$ 為次佳組整數週波值為約制條件帶入最小二乘計算中所計算出之後驗單位權方差變化量。差異越大代表所搜尋出的最佳組為正確之機率越高，在單頻即時動態定位的情況下，由於自由度偏低，通常將 Ratio 門檻值設定 5~10 以增加求解可靠度。Ratio 值代表了週波值求解正確的機率，也因此在本研究中將其做為評估求解效益的主要指標。

三、實驗成果與分析

3.1 RTK 效能評估方法

針對單頻 RTK 求解的效益分析，主要是利用 Ratio 值作為分辨週波值整數解是否正確的工具，Ratio 值越高代表整數週波值的正確率越高。然而一般 RTK 測量通常要求在短時間內找到正確週波值整數解以進行公分級定位，因此本研究將以 10 分鐘做為標準，目的在觀察觀測資料在 0~10 分鐘內 Ratio 值 (週波值求解正確率) 的變化情形，所設計的驗證方法如下：

- 一、將搜集一整天 24 小時的觀測資料依序切割成 144 個觀測段，使得每一段觀測量的時間為 10 分鐘，以 RTK 方式計算出每個觀測段 0~10 分鐘的 Ratio 值變化。
- 二、將所有 144 個觀測段的 Ratio 值成果取平均，得到一整天 144 筆時段之

0 ~ 10 分鐘的平均 Ratio 值 (AVR_t)，可表示成下式：

$$AVR_t = \sum_{s=1}^{144} Ratio_{t,s} / 144 \quad (13)$$

其中 t 代表由時刻 0 分鐘觀測至時刻 t 分鐘 ($0 \leq t < 10$ 分鐘)， s 表示測段序號值。

實驗所使用的 GPS 單頻接收儀為 Trimble R3 分離式天線盤衛星接收儀 (如圖 1)，相較於傳統大地型雙頻接收儀，Trimble R3 的價位約為其 1/5~1/6，觀測資料內容包含電碼虛擬距離觀測量 $C1$ 、載波相位觀測量 $L1$ ，實驗的資料接收間隔為 5 秒一筆。

3.2 真實單頻接收儀 RTK 實驗成果



截取自 Trimble R3 Datasheet

圖 1 Trimble R3 示意圖

除了架設單頻接收儀外，另外同時也設置了一傳統大地測量型雙頻接收儀 Leica SR530 做為分析的比較組。測試地點位於國土測繪中心頂樓，資料蒐集時間為 2009/6/15 一天 24 小時的觀測量，將單頻接收儀設置於點位 LS02 上，

而雙頻接收儀則在相近的點位 LS07 上架設。至於在參考站部份，單、雙頻兩移動站都將使用同一個由 e-GPS 產生之點號為 VLSB0 的虛擬參考站。點位分佈位置與兩組儀器設置說明如圖 2、表 2 所示：

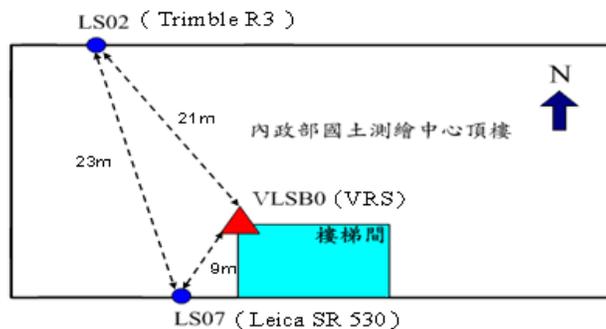


圖 2 點位分佈示意圖

表 2 接收儀設置說明

接收儀類型	Trimble R3 測量型單頻接收儀	Leica SR 530 大地型雙頻接收儀
基線	VLSB-LS02 (21 m)	VLSB-LS07 (9 m)
觀測時間	2009/06/15 01:20:25~ 23:59:59	2009/06/15 01:25:25~ 23:59:59
觀測量種類	L1、C1	L1、P1、L2、P2
整天平均可視衛星	7	7
售價	約 8~10 萬	約 50~60 萬

將收集到的兩組單頻與雙頻觀測量以 RTK 方式解算，再依 3.1 節方法計算後，可得到單、雙頻接收儀搭配 VRS 做參考主站的整天平均 Ratio 值 (AVR) 成果，成果繪製如下圖 3 所示：

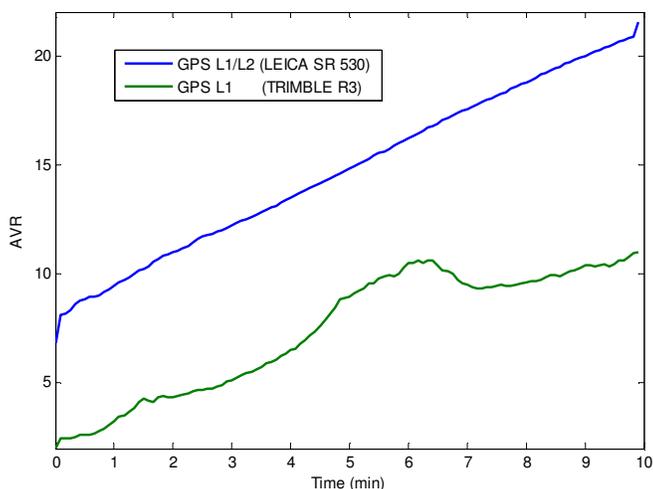


圖 3 一天平均 Ratio 值 (AVR 值) 之變化圖

由圖 3 可以得知，AVR 值（一天平均 Ratio 值）之變化會隨著觀測時間的增加、亦即觀測量自由度的累積而逐漸上昇，這表示週波值的正確率越來越高，使得在短時間內能得到正確的週波值，以達到公分級動態定位的成果。由結果可以看到在使用相同的參考站以及相似的基線長度下，Leica SR530 雙頻接收儀的 AVR 值明顯地高過單頻 L1 觀測量，平均可高於單頻 2 倍以上，同時

在很短的時間內（單一時刻或小於 1 分鐘內）即可達到很高的 Ratio 值，表示其有很高的週波值求解正確率以及很低的系統啟動時間 (initialization time or time to first fix)，因此適合用於即時動態測量。相較之下，使用 GPS 單頻 L1 觀測量的 AVR 值則無法在短時間內達到 5-10 以上。這代表在即時動態測量的狀況下，現行 GPS 單頻系統的系統啟動時間過長，使得在實務應用

上會有困難。

3.3 GPS/Galileo 單頻 RTK 效益分析

不久將來 Gaileo 系統建置完成且結合 GPS 後，可視衛星能同時達到 12 顆以上，不但有助於 RTK 求解效能，對單頻接收儀觀測量較少的缺點也能大幅

改善。故欲驗證此目標，本研究利用 GNSS 模擬器產生與實測資料相同基線 (VLSB0-LS02) 的 GPS L1 及 Galileo E1 模擬資料，模擬器介面如圖 4 所示，而相關系統誤差設定則如表 3 所示。

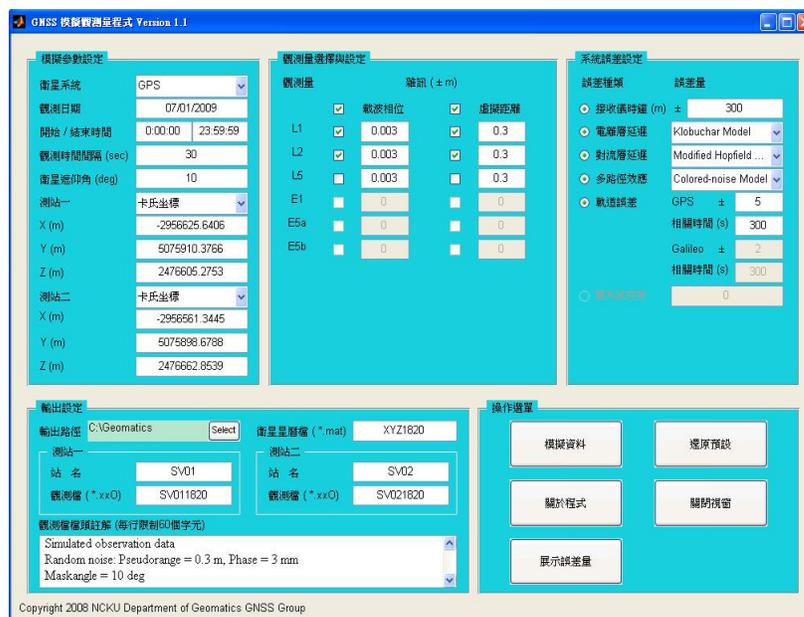


圖 4 GNSS 觀測量模擬器介面

表 3 模擬資料誤差設定

誤差	設定
雜訊	L1/E1: Phase=5 mm , Code=1 m
接收儀時表差	L2: Phase=6 mm , Code=1 m
電離層延遲	300 m
對流層延遲	Klobuchar Model
多路徑效應	Modified Hopfield Model
軌道誤差	Colored-noise Model
系統時間偏差(GGTO)	GPS=5 m , Galileo=2 m
	30 ns

在可視衛星截角設定為 10°下，模擬成果得到 LS02 點位上整天衛星可視

數量如圖 5 所示。其中 GPS 單系統整天之可視衛星數量為 5~11 顆，而

GPS/Galileo 整合系統則為 13~23 顆，多。
顯示整合系統之觀測量增加了兩倍之

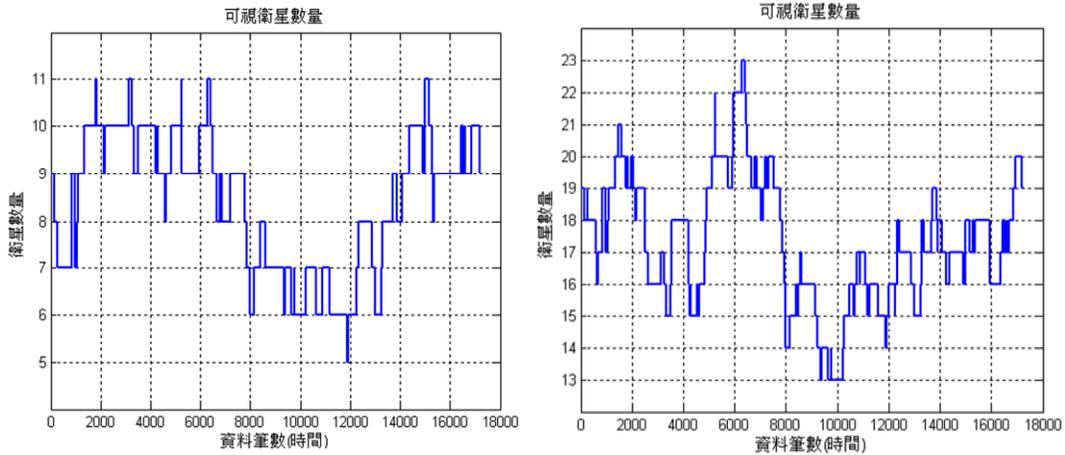


圖 5 整天可視衛星數量 (左圖為 GPS 單系統，右圖為 GPS/Galileo 雙系統)

欲分析單系統與整合系統之單頻 RTK 效能，故將產生之 GNSS 模擬資料分成三種組合測試，分別是：(1) GPS/Galileo 雙系統單頻：L1/E1；(2) GPS 單系統雙頻：L1/L2 (3) GPS 單系

統單頻：L1。將此三種組合之觀測量經過 RTK 解算並同樣依 3.1 方法得到 AVR 值後，與實測之單頻、雙頻資料成果一併比較，可以得到圖 6 的結果。

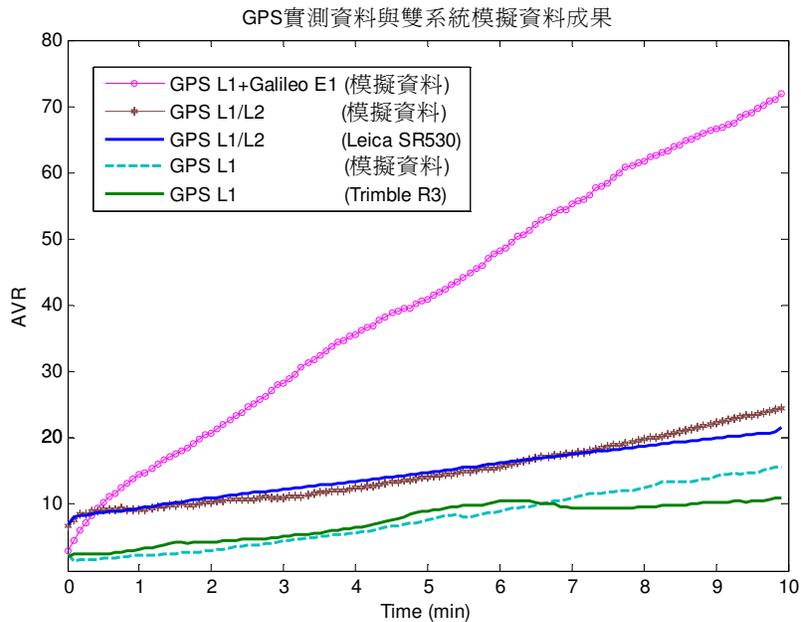


圖 6 一天平均 Ratio 值 (AVR 值) 之變化圖

為驗證模擬觀測量是否與真實資料相符，首先比較圖中模擬資料與真實接收儀 Leica SR530、Trimble R3 兩者間成果。可以看到圖中 GPS L1 與 GPS L1/L2 模擬資料的解算成果曲線與 GPS 實測單、雙頻接收儀的成果非常吻合，模擬資料與實測資料都顯示了雙頻的 AVR 值會高於單頻約兩倍，此結果表示了本文模擬器產生之觀測量與真實接收儀觀測量之特性非常接近，因此藉由產生的模擬資料具有足夠的代表性及可靠性，可用來評估 GPS/Galileo 單頻即時動態定位的解算效益。

針對不同系統的求解效益分析，我們可以看到，在 1 分鐘以內雙系統單頻觀測 (GPS L1/Galileo E1) 與傳統 GPS 雙頻觀測的 AVR 都可以達到足夠高的值來進行 RTK。而就整體而言 (10 分鐘內) 未來 GPS/Galileo 雙系統單頻觀測之整數週波值解算效益將會是最高的，且遠遠大於現行的 GPS 雙頻系統，而最低的則是 GPS 單頻系統。這表示在 GPS/Galileo 整合系統下，僅使用類似 Trimble R3 等級之中價位單頻接收儀，其求解效益卻可在短時間內高於目前的 GPS 高售價大地測量型雙頻接收儀，而最主要的原因就在於雙系統的可視衛星

顆數比單系統多出一倍，這使得整合系統有較佳的觀測幾何幫助求解。不過由另一角度來看，雖然衛星顆數較多、幾何分佈較好，使得雙系統單頻的整體效益超越單系統雙頻，但在系統剛開始啟動的時刻 (即第一個 epoch)，傳統 GPS 雙頻系統的週波值求解正確率 AVR 值就已超過 5，而雙系統單頻則需要更多一點時間才達到相同水準。這對需要單一時刻定位的使用者而言，還無法達到傳統 GPS 雙頻之效果，然而以一般 RTK 測量應用來說，GPS/Galileo 雙系統單頻的組合已經可以滿足快速定位的需求。

將各系統 24 小時模擬資料進行 RTK 後，根據產生模擬資料時給定之 LS02 點位坐標作為真值，我們另外可得到定位的成果精度分析。表 4 顯示出單系統單頻 (GPS L1) 觀測量的 3-D RMS 約為 2 cm，表示使用現行如 Trimble R3 測量型 GPS 單頻接收儀在搭配 e-GPS 系統下，RTK 可以達到公分等級之定位精度。而比較 GPS 雙頻與 GPS/Galileo 單頻定位成果，可以看未來整合系統定位精度將優於現行的雙頻觀測，其中在 E 方向提昇 26 %、N 方向提昇 35 %、U 方向提昇 46 %。

表 4 不同系統的 RTK 定位成果精度 (\pm cm)

	單系統單頻 GPS L1	單系統雙頻 GPS L1/L2	雙系統單頻 GPS L1/Galileo E1
E	0.62	0.48	0.38
N	0.70	0.54	0.40
U	2.00	1.52	1.04
3-D	2.21	1.68	1.18

四、結論與建議

未來的 GNSS 將邁入多系統多頻率

的時代，多樣化之 GNSS 接收儀也將依功能性及市場需求而被設計發展，對使用者而言，選擇最經濟、最有效的定位

模式成為未來測量工程上的重要課題。根據本文之實驗及模擬成果可得到以下幾點結論：

- 1.比較傳統 GPS 雙頻與單頻 RTK 效能，成果顯示雙頻觀測的 AVR 平均可高於單頻 2 倍以上，同時在很短的時間內（單一時刻或小於 1 分鐘內）即可達到很高的求解正確率，相較之下，單頻觀測的系統啟動時間過長，一旦發生週波脫落，單頻接收儀必須花較長時間才能恢復進行公分級定位，因此在現階段仍不實用。
- 2.針對不同系統的 RTK 效能比較分析，在 10 分鐘內，未來的整合系統 GPS/Galileo 單頻 RTK 週波值解算效益將會是最高的，且遠遠大於現行的 GPS 雙頻系統，而最低的則是 GPS 單頻系統。
- 3.進一步的比較 GPS L1/L2 與 GPS L1/Galileo E1 定位成果，後者 3-D RMS 優於前者，尤其在 U 方向上有較明顯提昇，顯示未來整合系統的幾何強度能有效改善定位精度。
- 4.使用 GPS/Galileo 單頻接收儀，以 e-GPS 系統進行即時動態定位的解算效益與精度將會超越現今使用的 GPS 雙頻接收儀，且可滿足一般的即時動態定位需求。因此，可以推估未來使用 GNSS 單頻接收儀作為 e-GPS 移動站將是台灣 RTK 使用者最有效、最經濟之定位模式，可望大大增加 e-GPS 服務之工程應用。

在不久的將來（預計自 2013 年起）當 Galileo 系統正式運行之後，GPS/Galileo 單頻接收儀只要輸出具有良好品質的 L1 單頻觀測資料，將可以取代現行的 GPS 雙頻接收儀，發揮 RTK 即時動態定位的功能。由於單頻接收儀

的製造成本低，即使是未來需要增加頻道數目以增加接收 Galileo 衛星，其成本亦所增不多，這是可以預期的。因此，未來配合國土測繪中心推動之 e-GPS 服務，使用者將可使用單頻接收儀作為移動站，對於地籍測量之基本控制點、圖根點及界址點等精密點位測量具有極大應用潛力。

致謝

本文研究為內政部國土測繪中心補助「全球導航衛星系統（GNSS）資料聯合處理」委辦案之一部分，計畫編號 NLSC-97-46，特此致謝。

參考文獻

- 1.王敏雄、劉至忠、劉正倫、蕭輔導，2006，e-GPS 衛星基準網之VBS-RTK 即時動態定位系統測量成果分析，地籍測量，第 25 卷，第 2 期，1-20 頁。
- 2.吳錫賢，1996，利用雙重天線與單頻資料進行即時性 On-the-Fly GPS 定位研究，國立成功大學測量工程研究所碩士論文，台南。
- 3.楊名、江凱偉，2009，全球導航衛星系統（GNSS）資料聯合處理技術，內政部國土測繪中心委託計劃報告，國立成功大學衛星資訊研究中心，台南。
- 4.Feng, Y., 2005, Future GNSS Performance Predictions Using GPS with a Virtual Galileo Constellation, GPS World, pp. 46-52.
- 5.Gelb, A., 1974, Applied Optimal Estimation, Massachusetts, The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, and London, England, pp. 79.
- 6.Hein, G.W., Godet, J.I., Jean-Luc, M., Jean-Christophe, E., Philippe, L., Rafael,

- K., and Pratt, T., 2002, Status of Galileo Frequency & Signal Design, Proceedings of the US ION GPS 2002, Portland, Oregon, pp. 24-27.
- 7.Landau, H., Vollath, U., Chen, X., and Allison, T., 2004, Benefits of Modernized GPS/Galileo to RTK Positioning, The 2004 International Symposium on GNSS/GPS, Sydney, Australia.
- 8.Leick, A., 1995, GPS Satellite Surveying, 2nd edition, John Wiley & Sons, INC, New York, USA.
- 9.McDonald, K.D., 2002, The Modernization of GPS: Plans, New Capabilities and the Future Relationship to Galileo, Journal of Global Position System, Vol. 1, No. 1, pp. 1-17.
- 10.Miller, J., 2004, GPS & Galileo: Evolution towards GNSS, Proceedings of the US ION NTM 2004, San Diego, California, pp. 73-91.
- 11.Swann, J., Lachapelle, G., Petovello, M., Fenton, P., and McCarthy, D. D., 2006, Reference Systems, UTC Leap Second, and L2C Receivers?, Inside GNSS, pp. 20-24.
- 12.Teunissen, P.J.G., 1995, The Least-square Ambiguity Decorrelation Adjustment : A method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation, Journal of Geodesy, Vol. 70, No. 1-2, pp. 65-82.
- 13.Welch, G., Bishop, G., 2006, An Introduction to the Kalman Filter, Department of Computer Science, University of North Carolina.