

改良式模稜函數應用於台灣地區 GNSS 定位研究 Applying Modified Ambiguity Function Approach to GNSS Positioning in Taiwan

陳冠宏¹ 吳究² 蔡龍治² 陳揚仁³
Kuan-Hung Chen Joz Wu Lung-Chih Tsai Yang-Zen Chen

摘要

GLONASS衛星系統現已穩定運行，且提供全世界免費服務，目前已是具有潛力與GPS進行整合的導航衛星系統。其FDMA訊號特性，使得求解方式有別於CDMA系統，以致兩系統間整合更是深具挑戰。

本文即在探討以改良式模稜函數法，在保有相位模稜的整數特性狀態下，直接對坐標分量進行解算。本實驗以GLONASS與GPS衛星系統為對象，以短基線定位與應用電離層模型TWIM於較長基線的改正等進行討論。實驗結果可以發現在台灣地區目前GLONASS系統已有很不錯的表現。配合TWIM模型改正，此方法在55公里基線，GPS系統可達平面定位精度約7公分，高程方向約14公分。GLONASS系統平面定位精度約12公分，高程方向約23公分。

Abstract

GLONASS have been operated stably and provided free service worldwide. Currently, it is the most potential satellite system to integrate with GPS. Otherwise, the FDMA signal structure, which is different from CDMA, makes integrations full of challenge.

The proposed method generates the solution of geometry in the condition of preserving integer-valued ambiguity. The experiments used GLONASS and GPS observations to compare with different baseline lengths, and TWIM corrections in longer baseline positioning results. The results show that GLONASS have good performance in Taiwan region. With TWIM corrections in 55 km baseline, the GPS positioning differences is 7 cm in horizontal and 14 cm in vertical component. GLONASS positioning differences is 12 cm in horizontal and 23 cm in vertical component.

¹ 國立中央大學 土木工程研究所 碩士

² 國立中央大學 太空及遙測研究中心 教授

³ 國立中央大學 土木工程研究所 博士生

一、前言

因全球衛星定位系統 GPS(Global Positioning System)的迅速發展，且各領域的依賴與實用性不斷提高，世界各國紛紛自行研發區域性或廣域性的衛星導航系統。因應多系統發展，系統間的整合也是近年全球導航衛星系統 GNSS(Global Navigation Satellite System)所面臨的最大課題。如何快速、精確與穩定的聯合求解，也就成為相當關鍵的重要技術。目前如由俄羅斯自主研發，已幾近完成且穩定運作的 GLONASS(GLObal NAVigation Satellite System)，是最有潛力與GPS進行整合的新興導航衛星系統。其FDMA(Frequency Division Multiple Access)訊號特性，使得求解方式有別於CDMA(Code Division Multiple Access)系統。

典型的相位模稜求定方式為，利用有限的連續觀測資料，對坐標分量與相位模稜同時求解，先得到實數之相位模稜值與其協變方矩陣，隨後經由解關聯技術，拆解相位模稜與坐標參數高相關問題，再由整數搜尋域的變換，尋找最可能之整數值加以試誤，最後以觀測量的殘差二次型最小者為最適答案 [Teunissen *et al.*, 1997; Wu and Hsieh, 2010]。消去整數模稜的方法，主要目的即為避免與坐標參數間的高相關問題，最常見的即為模稜函數法 AFM(Ambiguity Function method)，以 Remondi[1991]的一系列研究最為著名。

此方法為利用三次差分、二次差分微分求解或電碼差分定位的方式，先得到一初始值，再以初始值為中心，在空間中以固定間隔試誤，找到最後解答。

GLONASS系統自發展以來，皆以 FDMA訊號特性的處理方式及與GPS配合處理的相關參數評定與改正，為研究之大宗。Zinoviev[2005]對於GLONASS系統的通盤討論，有助於瞭解GLONASS系統在整合上需注意的事項。而實際對於GLONASS相位模稜處理 [Wang *et al.*, 2001; Leick, 2004]與GNSS系統整合研究，目前也有部分研究可供參考 [Pratt *et al.*, 1997]。

二、理論基礎

2.1 GLONASS 訊號特性

GPS在通訊技術上，採頻分多址CDMA方式播送訊號，亦即不同的GPS衛星利用播送不同的電碼內文，以達區別不同衛星的結果。與GPS衛星不同的是，GLONASS採用FDMA的方式進行資料傳輸，所以GLONASS衛星是依據不同發送頻率，區別相異衛星訊號，且相同衛星的L1:L2發送頻率具有9:7的固定特性。GLONASS衛星訊號的載波頻率依控制介面文件區分為式(2.1)與(2.2)，其中 k 表示不同衛星的頻段編號。

$$L1 = 1,602 + k \cdot 0.5625 \text{ MHz} \quad (2.1)$$

$$L2 = 1,246 + k \cdot 0.4375 \text{ MHz} \quad (2.2)$$

2.2 GPS/GLONASS 系統整合

GPS與GLONASS兩大系統整合，最重要的即為坐標系統與時間系統之整合。坐標系統方面由於兩系統所處的大地框架不同，兩者間勢必須進行坐標系統轉換。本研究採用之轉換參數為Boucher與Altamimi[2001]所提出之適應參數。其中 X_{90} 、 Y_{90} 、 Z_{90} 代表PZ90坐標

系下的三軸坐標，反之則為WGS84的 X_{84} 、 Y_{84} 、 Z_{84} ，此轉換參數在三軸之旋轉與尺度變化皆有描述，如下式(2.3)，其中旋轉單位為角秒 mas (mili arc second)，尺度單位為百萬分之一 ppb (part per billion)：

$$\begin{bmatrix} X_{84} \\ Y_{84} \\ Z_{84} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{90} \\ Y_{90} \\ Z_{90} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.07 \text{ m} \\ 0 \text{ m} \\ -0.07 \text{ m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -3 \text{ ppb} & -353 \text{ mas} \\ 353 \text{ mas} & -3 \text{ ppb} \\ 4 \text{ mas} & -19 \text{ mas} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{90} \\ Y_{90} \\ Z_{90} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

時間系統的整合方面，GPST與UTC(SU)相差3 hr，除了固定時間偏值外，UTC(US)與UTC(SU)因採用不同原子鐘做為計算基準，兩系統間尚有1 ms以下的不定偏差，可藉由導航訊息參數 τ_c 加以改正，轉換式如(2.4)：

$$\text{GPST} = \text{UTC(SU)} + \tau_c - 3 \quad (2.4)$$

2.3 GNSS 載波相位方程式

$$\varphi_{i,\beta}^g + \varepsilon\varphi_{i,\beta}^g = \frac{1}{\lambda_\beta} R_i^g + f_\beta(\Delta t_i - \Delta t^g) + \frac{1}{\lambda_\beta} T_i^g - \frac{1}{\lambda_\beta} \frac{I_i^g}{f_\beta^2} + N_{i,\beta}^g \quad (2.5)$$

上式中 $\varphi_{i,\beta}^g$ 為GPS衛星 g 至接收器 i 的原始載波相位觀測量(cycle)； $\varepsilon\varphi_{i,\beta}^g$ 為載波相位觀測量誤差(cycle)； β 為頻率編號1或2，代表L1或L2； λ_β 為載波波長(m)； f_β 為載波頻率(Hz)； Δt_i 、 Δt^g ：

因電碼與相位有著不同的量測精度，按1 %波長概估測距精度時，兩類測距本質上截然不同。為達高精度定位，利用載波相位進行觀測，測距觀測方程式如式(2.5)：

差(s)； T_i^g 為對流層延遲量(m)； $\frac{I_i^g}{f_\beta^2}$ 為電離層延遲量(m)； $N_{i,\beta}^g$ 為整數相位模稜(cycle)。

GLONASS因頻率隨衛星而改變，在相同測量原理下，觀測方程式可寫為式(2.6)：

$$\varphi_{i,\beta}^r + \varepsilon\varphi_{i,\beta}^r = \frac{1}{\lambda_\beta^r} R_i^r + f_\beta^r (\Delta t_i - \Delta t^r) + \frac{1}{\lambda_\beta^r} T_i^r - \frac{1}{\lambda_\beta^r} \frac{I_i^r}{(f_\beta^r)^2} + N_{i,\beta}^r \quad (2.6)$$

上式中 $\varphi_{i,\beta}^r$ 為 GLONASS 衛星 r 至接收器 i 的原始載波相位觀測量 (cycle)； $\varepsilon\varphi_{i,\beta}^r$ 為載波相位觀測量誤差 (cycle)； β 為頻率編號 1 或 2，代表 L1 或 L2； λ_β^r 為 r 衛星的載波波長 (m)； f_β^r 為 r 衛星的載波頻率 (Hz)； Δt_i 、 Δt^r 分別表示接收儀 i 與 GLONASS 衛星 r 的時錶偏差 (s)； T_i^r 為對流層延遲量 (m)； $\frac{I_i^r}{(f_\beta^r)^2}$ 為 GLONASS 衛星 r 在頻段 β 所造成的電離層延遲量 (m)； $N_{i,\beta}^r$ 為整數相位模稜 (cycle)。

$$\rho_{ij,\beta}^{gh} + \varepsilon\rho_{ij,\beta}^{gh} = \frac{1}{\lambda_\beta} \left(R_{ij}^{gh} + T_{ij}^{gh} \right) + \frac{I_{ij}^{gh}}{f_\beta^2} \quad (2.7)$$

$$\varphi_{ij,\beta}^{gh} + \varepsilon\varphi_{ij,\beta}^{gh} = \frac{1}{\lambda_\beta} \left(R_{ij}^{gh} + T_{ij}^{gh} \right) - \frac{I_{ij}^{gh}}{f_\beta^2} + N_{ij,\beta}^{gh} \quad (2.8)$$

$$\rho_{ij,\beta}^{rs} + \varepsilon\rho_{ij,\beta}^{rs} = \left(\frac{1}{\lambda_\beta^r} R_{ij}^r - \frac{1}{\lambda_\beta^s} R_{ij}^s \right) + (f_\beta^r - f_\beta^s) \Delta t_{ij} + \left(\frac{1}{\lambda_\beta^r} T_{ij}^r - \frac{1}{\lambda_\beta^s} T_{ij}^s \right) + \left(\frac{1}{\lambda_\beta^r} \frac{I_{ij}^r}{(f_\beta^r)^2} - \frac{1}{\lambda_\beta^s} \frac{I_{ij}^s}{(f_\beta^s)^2} \right) \quad (2.9)$$

$$\varphi_{ij,\beta}^{rs} + \varepsilon\varphi_{ij,\beta}^{rs} = \left(\frac{1}{\lambda_\beta^r} R_{ij}^r - \frac{1}{\lambda_\beta^s} R_{ij}^s \right) + (f_\beta^r - f_\beta^s) \Delta t_{ij} + \left(\frac{1}{\lambda_\beta^r} T_{ij}^r - \frac{1}{\lambda_\beta^s} T_{ij}^s \right) - \left(\frac{1}{\lambda_\beta^r} \frac{I_{ij}^r}{(f_\beta^r)^2} - \frac{1}{\lambda_\beta^s} \frac{I_{ij}^s}{(f_\beta^s)^2} \right) + N_{ij,\beta}^{rs} \quad (2.10)$$

其中 $\rho_{ij,\beta}^{gh}$ 與 $\varphi_{ij,\beta}^{gh}$ 表示 GPS 衛星 g 、 h 與地面站 i 、 j 在頻段 β 狀態下所組成的

2.4 GNSS 二次差分觀測式

對於同一條基線上的兩個接收儀，在接收衛星訊號的路徑上，許多的影響量是相近的；故可利用差分的方式，消除共同的誤差，如接收器時鐘誤差、衛星時鐘誤差、衛星軌道誤差等。

在本研究中，GPS 與 GLONASS 二次差分之電碼與載波模式分別如下式 (2.7) 至 (2.10)，皆以週波表示。其中最大不同為 GLONASS 衛星因採 FDMA 設計，不同接收站之時錶偏差無法消去，而大氣效應因為與頻率相關，所以也需小心處理。

二次差分電碼與相位觀測式。反之 GLONASS 系統的電碼與載波相位表示

為 $\rho_{ij,\beta}^{rs}$ 、 $\varphi_{ij,\beta}^{rs}$ 。

本研究目前以GNASS系統進行二次差分處理，比較在不同基線長度的定位成果。在基線短於10 km的狀況下，由於大氣狀況變化很小，可以經由二次差分的方式消去。在10 km以上的基線，大氣的延遲效應採模式計算的方式推算，在計算前加以修正，本研究對流層採Saastamoinen[1973]模型進行改正，而電離層以TWIM(TaiWan Ionospheric Model)模型加以改正。

三、實驗方法

3.1 改良式模稜函數法

改良式模稜函數法基於傳統模稜函數法，確保了相位模稜的完整性，但不

透過整數搜尋步驟，而是改用控制條件下的函數模式，對二次差分觀測量的殘差，進行最小二乘求解。此方法在不破壞相位模稜的整數特性下，直接對未知參數進行求解。

改良式模稜函數法從二次差分觀測量出發，以GPS短基線二次差分觀測量為例，暫不考慮大氣延遲效應，如式(3.1)，透過正弦函數處理，可以將具整數特性的相位模稜從觀測式中移除[Cellmer *et al.*, 2010]，如式(3.1)：

$$\varphi_{ij,\beta}^{gh} + \varepsilon\varphi_{ij,\beta}^{gh} - \frac{1}{\lambda_\beta} R_{ij}^{gh} = N_{ij,\beta}^{gh} \quad (3.1)$$

$$\sin \left\{ \pi \left(\varphi_{ij,\beta}^{gh} + \varepsilon\varphi_{ij,\beta}^{gh} - \frac{1}{\lambda_\beta} R_{ij}^{gh} \right) \right\} = \sin \left[\pi \left(N_{ij,\beta}^{gh} \right) \right] = 0 \quad (3.2)$$

基於載波相位觀測精度一般可優於百分之一個週波，所以觀測量殘差值應遠小於半個週波，所以改良式模稜函數

法可寫為式(3.3)或(3.4)，其中 **round** 為四捨五入運算式。

$$\varphi_{ij,\beta}^{gh} + \varepsilon\varphi_{ij,\beta}^{gh} - \frac{1}{\lambda_\beta} R_{ij}^{gh} = \text{round} \left[\varphi_{ij,\beta}^{gh} - \left(\frac{1}{\lambda_\beta} R_{ij}^{gh} \right) \right] \quad (3.3)$$

$$\varepsilon\varphi_{ij,\beta}^{gh} = \text{round} \left[\varphi_{ij,\beta}^{gh} - \left(\frac{1}{\lambda_\beta} R_{ij}^{gh} \right) \right] - \left[\varphi_{ij,\beta}^{gh} - \left(\frac{1}{\lambda_\beta} R_{ij}^{gh} \right) \right] \quad (3.4)$$

為了配合最小二乘平差模式，將式(3.4)線性化為(3.5)。

$$\begin{aligned} \varepsilon\varphi_{ij,\beta}^{gh} = & \frac{1}{\lambda_{\beta}} \left(\bar{R}_{ij}^{gh} + \frac{\partial \bar{R}_j^{gh}}{\partial x_j} dx_j + \frac{\partial \bar{R}_j^{gh}}{\partial y_j} dy_j + \frac{\partial \bar{R}_j^{gh}}{\partial z_j} dz_j \right) \\ & + \text{round} \left[\varphi_{ij,\beta}^{gh} - \left(\frac{1}{\lambda_{\beta}} \bar{R}_{ij}^{gh} \right) \right] - \left[\varphi_{ij,\beta}^{gh} - \left(\frac{1}{\lambda_{\beta}} \bar{R}_{ij}^{gh} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.5)$$

對於GLONASS二次差分觀測量而言，最大不同源自GLONASS播送頻率隨不同衛星而改變，基線兩端的接收儀時錶偏差無法消去，以致待求解參數為三個坐標分量與地面一次差分後的時錶偏差值，一共四個，而化為週波的觀測式也需特別處理與波長有關的參數。改良

式相位模稜法應用於GLONASS系統可寫為式(3.6)，式中大部分參數意涵與GPS二次差分系統相同，唯衛星端編號以 r 、 s 代表GLONASS衛星，而時錶偏差參數以 t_{ij}^r 為例，表示地面接收儀 i 與 j 利用相同的GLONASS衛星 r ，在地面一次差分後的時錶偏差值。

$$\begin{aligned} \varepsilon\varphi_{ij,\beta}^{rs} = & \left(\frac{1}{\lambda_{\beta}^r} \frac{\partial \bar{R}_{ij}^r}{\partial x_j} - \frac{1}{\lambda_{\beta}^s} \frac{\partial \bar{R}_{ij}^s}{\partial x_j} \right) dx_j + \left(\frac{1}{\lambda_{\beta}^r} \frac{\partial \bar{R}_{ij}^r}{\partial y_j} - \frac{1}{\lambda_{\beta}^s} \frac{\partial \bar{R}_{ij}^s}{\partial y_j} \right) dy_j \\ & + \left(\frac{1}{\lambda_{\beta}^r} \frac{\partial \bar{R}_{ij}^r}{\partial z_j} - \frac{1}{\lambda_{\beta}^s} \frac{\partial \bar{R}_{ij}^s}{\partial z_j} \right) dz_j + (f_{\beta}^r - f_{\beta}^s) dt_{ij} \\ & + \text{round} \left[\varphi_{ij,\beta}^{rs} - \left(\frac{1}{\lambda_{\beta}^r} \bar{R}_{ij}^r - \frac{1}{\lambda_{\beta}^s} \bar{R}_{ij}^s \right) - (f_{\beta}^r - f_{\beta}^s) \bar{t}_{ij} \right] \\ & - \left[\varphi_{ij,\beta}^{rs} - \left(\frac{1}{\lambda_{\beta}^r} \bar{R}_{ij}^r - \frac{1}{\lambda_{\beta}^s} \bar{R}_{ij}^s \right) - (f_{\beta}^r - f_{\beta}^s) t_{ij} \right] \end{aligned} \quad (3.6)$$

3.2 層次式求解

改良式相位模稜函數法基於最小二乘模式，對於初始值的給定較為敏感，若直接利用原始觀測量進行解算，極有可能收斂至錯誤的數值。層次式(Cascade)的求解概念為，利用基本觀測量進行線性組合的方式，從較長的組合波長優先

計算，逐漸收斂至原始L1、L2觀測量進行求解，解答的可靠度較高[游豐吉，1999；Cellmer *et al.*, 2010]。線性組合後的觀測量及波長可表示為式(3.7)與(3.8)。 φ_c 、 f_c 表示組合觀測量與波長， α 、 β 為整數性質的組合乘係數。

雖然本研究方法不直接求取相位模

稜值，但由於改良式模稜函數法建立在相位模稜持續保有整數性質的狀態下，線性組合的過程中，應給予整數的組合係數，以確保相位模稜的整數性不被破壞。本研究使用的線性組合方式如下表

1，由線性組合I至組合III逐層解算，以達收斂效果。

$$\varphi_c = \alpha\varphi_1 + \beta\varphi_2 \quad (3.7)$$

$$f_c = \alpha f_1 + \beta f_2 \quad (3.8)$$

表 1 GNSS 線性組合表

線性組合編號	α	β	GPS 組合後波長(m)	GLONASS 組合後波長(m)
I	-3	4	1.628	1.682-1.689
II	1	-1	0.862	0.841-0.845
III	1	0	0.190	0.187-0.188
	0	1	0.244	0.240-0.241

3.3 最佳線性不偏差估計式

最佳線性不偏差估計式BLUE (Best Linear Unbiased Estimation)於單位權方差導來，最小二乘法優化準則在於量測殘差加權平方和為極小，故所得的估計值具備最佳性質。方差分量無偏估計式(3.9)[Wu and Hsieh, 2010]：

$$\sigma_i^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{C}_i \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{v}}{\text{tr}(\mathbf{B} \mathbf{C}_i \mathbf{B}^T \mathbf{Q}_k)} \quad (3.9)$$

本研究在先驗權的給定方式以頻率比的方式給予，以GLONASS衛星為例，如式(3.10)。

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi_1}^2 &= (1)^2 \\ \sigma_{\varphi_1}^2 &= (9/7)^2 \\ \sigma_{\rho_1}^2 &= (f_1^r / 5.115)^2 \\ \sigma_{\rho_2}^2 &= (f_1^r / 5.115)^2 \times (9/7)^2 \end{aligned} \quad (3.10)$$

由於頻率比的給權方式，並不能將衛星於不同仰角的測距精度概念納入解算，所以本研究採BLUE方差分量進行解算。首先本研究將觀測量分三群，依不同的衛星仰角，從仰角0°開始，距地仰角每30°為一群，如衛星分布狀況不佳，也有可能僅存在兩群。

四、台灣自主電離層模型 TWIM

訊號傳播時穿越大氣層，而其中高層大氣部分，電離層之延遲量為主要誤差來源之一。電離層為對流層上方，距地表約幾十至幾千公里高度的游離氣體

層。由於中性大氣分子及原子受到輻射而游離成電子，形成電漿(Plasma)狀態，加上原本就存在的中性分子與原子即形成電離層。電離層對衛星訊號所傳送的電碼和載波相位有兩種效應，對電碼觀測量產生延遲效應，對載波相位觀測量產生訊號提前效應。因此在觀測方程式中電碼觀測量須予以補償改正，載波相位觀測量以剔減改正。

由於電離層主要是由許多帶電粒子所組成，延遲量主要以總電子含量TEC (Total Electron Content) 來表示。TEC的定義為隨著訊號傳播在一平方公尺的斷面所容納之總電子數，單位為 el/m^2 。而一個單位量的總電子含量TECU (Total Electron Content Unit) 定義為 $10^{16} \text{el}/\text{m}^2$ ，舉例來說，一個TECU值於GPS L1電波傳播，會造成約0.162 m 的延遲量。在二次差分技術中，短基線因大氣條件幾乎相同可以直接消去，但基線拉長時，由於電離層環境並非簡易的線性化函數，其影響量會造成求解的不穩定性提高。

臺灣自主電離層數值模型TWIM是由國立中央大學蔡龍治教授於2008年所開發製作[Tsai *et al.*, 2009]，利用台灣FORMOSAT - 3/COSMIC(Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate)中GPS掩星觀測，所提供的垂直電漿剖面資料所製作出的數值模型，為純粹採用實際觀測資料所製成的經驗模型，可提供從2007年至今全球電離層D、E、F1、F2 層的相關

資料[黃俊穎，2009]。TWIM可以隨使用者的需求，提供不同時間及空間尺度的電離層各層峰值之電漿頻率、峰值高度、以及其標尺高等數值，以做為實際電離層環境的參考；經簡化的計算能快速且方便使用於其他應用上，如波的傳播預測、電離層斷層掃描等電離層基礎資料。在TWIM基礎下，本研究於長基線估算電離層影響量時，採接收路徑上每個格點間距1 km，天頂方向距地長度1500 km為基準，根據視線方向計算總電子含量，代入觀測方程式修正電離層影響量。

五、實驗成果與分析

本章以前述之改良式模稜函數法之理論，在實際接收GNSS觀測量後，對地面站進行相對定位研究。研究目標為短基線相對定位的坐標解算成效，與電離層模型對較長基線的解算效益之比較研究。

5.1 實驗資料背景

本研究之觀測數據皆為含GPS與GLONASS觀測量之Leica雙頻接收儀，實驗觀測時皆採每秒一筆連續接收，原始接收資料轉換成RINEX格式後，配合實驗室開發之ManGo(Management of GNSS-data for Orientation)程式子集為解算工具。解算成果的比較，在短基線以實際測量為比較真值，而較長基線則採LGO(Leica Geo Office)第8.0版的長時間觀測量做為比較標準。

5.2 解算流程

本研究之解算流程，首先利用電碼觀測量求得初始坐標值，以此初始坐標為中心，建立搜索空間，將空間內的點，視為可能的特寬巷坐標估值。以特寬巷坐標估值與電碼觀測量，進行第一階段的特寬巷求解。特寬巷求解結束後，將所有近似坐標進行卡方檢定與費雪檢定，求定最適合的近似坐標值，做為下一階段寬巷線性組合的寬巷坐標估值。寬巷求解時，同樣須將電碼帶入一併求解。最後僅以原始L1與L2觀測量直接求解，做為最後的解答輸出。

5.3 成果與分析

本研究共有兩組基線，分別為22 m與55 km。實驗主站皆為SPP4，位於國立中央大學。目前實驗採用GPS與GLONASS衛星系統，分別獨立進行定位解算，比較在不同基線長度、不同的環境狀況對於定位成果的影響。實驗之量化分析以平均誤差(Mean)、均方根誤差(RMS, Root Mean Square)及標準差(Sigma)分別示於表中，假定真值之給定分述於各實驗。

5.3.1 基線 SPP4-SPP5 (22.2 m)

表 2 短基線 GNSS 解算成果比較表

SPP4-SPP5		高程差(m)	距離差(m)
GLONASS			
Mean		-0.001	-0.002
RMS		0.019	0.025
Sigma		0.019	0.025
GPS			
Mean		0.003	0.006
RMS		0.006	0.013
Sigma		0.006	0.011

5.3.2 基線 SPP4-HOLN (56.5 km)

此基線的待解站HOLN位於台灣苗栗後龍，參考地理坐標為(E120°45'48.8", N24°38'05.0")，距解算主站SPP4約56.58 km，高程差約為143.3 m。實驗時間同短

此基線架設在國立中央大學太空遙測及研究中心頂樓。實驗時間為2011年4月19日，13:00:00開始的連續100 s。實驗取樣頻率為1 Hz，最低觀測仰角5°，衛星的幾何精度稀釋因子GDOP(Geometric Dilution Of Position)為2.8。

為了驗證GLONASS衛星系統的解算成效，本次實驗的真值來自於實際水準測量與測距，分別比較兩點位間的高程差與幾何距離。此方式可避免坐標系統轉換所造成的誤差，過度影響實際定位誤差，以致於無法分辨其間差異。

高程差的比較真值為2.947 m。另外將三維方向的誤差以畢氏定理計算，可得兩點距離的誤差值，假定真值為22.187 m。由表2可知，以GLONASS系統為例，在高程差的比較上，標準差為1.9 cm，與真值的平均誤差為0.1 cm。在距離方面，受到高程分量的影響較大，標準差為2.5 cm，平均誤差為0.2 cm。而GPS定位成果普遍比GLONASS系統好，約有2-3倍差異。高程方向標準差約為0.6 cm，整體距離而言，標準差為1.1 cm。

基線實驗(SPP4 - SPP5)為2011年4月19日，13:00開始的連續100 s。實驗取樣頻率為1 Hz，最低觀測仰角5°，GLONASS系統的GDOP為2.8，而GPS系統之GDOP為2.0。比較真值的給定方式為當日連續

24 hr長時間觀測，以LGO解算求得。

此基線實驗目的為較長基線 (SPP4-HOLN)與短基線實驗在本研究方法中，相對定位的成果比較。另外，TWIM 電離層模型對於觀測量的修正，是否對定位成效有所增進，亦是比較重點。

圖1與表3、4由電離層探測實驗室協

助提供。由圖1可看出本次實驗時段，位於電離層活動高峰期，而表3、4則列出主站與待解站，面對不同GLONASS衛星，在路徑方向上的TEC值。圖2至圖5分別表示此基線在三維方向上，GLONASS與GPS有無使用電離層模型 TWIM的三維定位誤差圖。

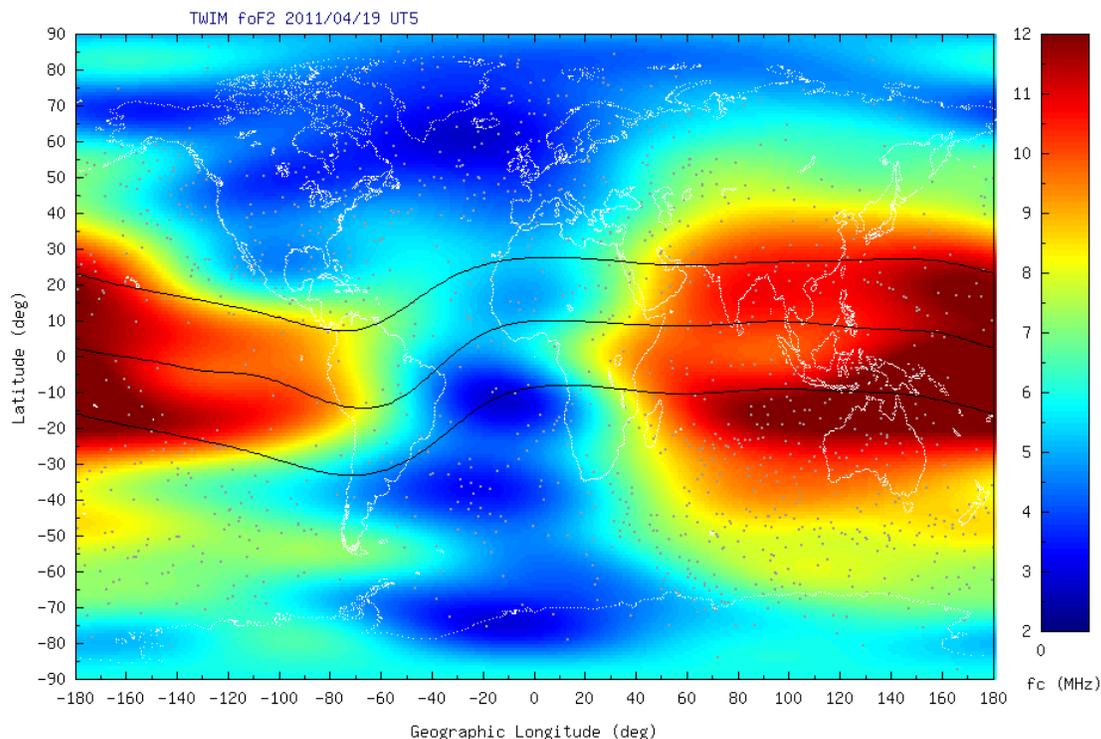


圖 1 2011/04/19 13:00:00 全球臨界電漿頻率圖
(<http://isarncu.ncu.edu.tw/info.htm>)

表 3 基線 SPP4-HOLN 之 TECU 對照例表(GLONASS)

衛星編號	SPP4 (TECU)	HOLN (TECU)	仰角 (deg)	方位角 (deg)
PR01	85.75	86.35	1.5	324.4
PR06	151.48	152.06	11.5	129.4
PR07	58.52	59.22	64.5	86.8
PR08	56.52	57.44	47.0	349.9
PR09	68.26	69.57	25.8	25.9
PR10	53.00	53.61	74.6	345.3
PR11	88.10	87.50	40.3	222.0

1 TECU=10¹⁶ eI/m²

表 4 基線 SPP4-HOLN 之 TECU 對照例表(GPS)

衛星編號	SPP4 (TECU)	HOLN (TECU)	仰角 (deg)	方位角 (deg)
PG09	40.81	41.47	44.8	29.8
PG12	55.41	55.92	43.1	111.1
PG14	56.67	56.87	27.0	298.9
PG15	63.75	64.88	23.1	68.5
PG18	35.85	36.25	76.7	347.9
PG21	69.10	68.26	33.2	206.1
PG22	41.94	42.37	43.2	322.7
PG25	70.40	69.86	32.3	163.0
PG27	50.36	51.13	27.7	36.4
PG31	109.63	108.84	7.5	228.1

1 TECU=10¹⁶ el/m²

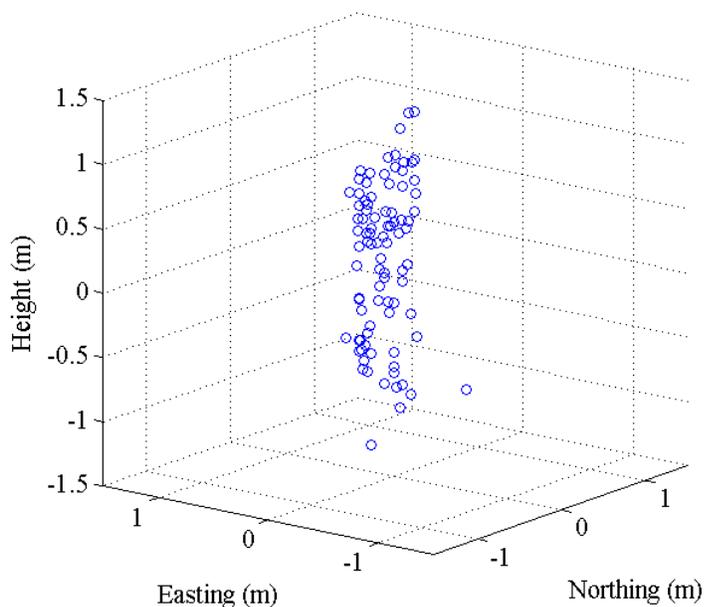


圖 2 基線 SPP4-HOLN 未使用 TWIM 改正之三維誤差圖(GLONASS)

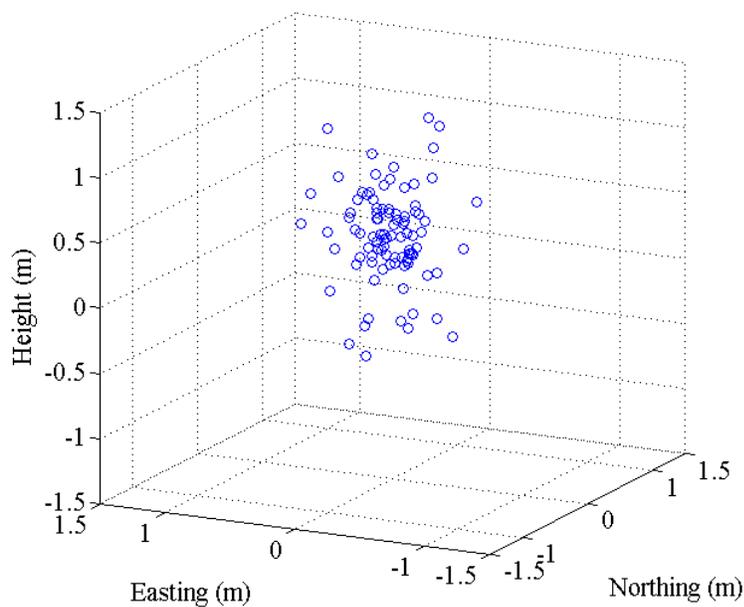


圖 3 基線 SPP4-HOLN 未使用 TWIM 改正之三維誤差圖(GPS)

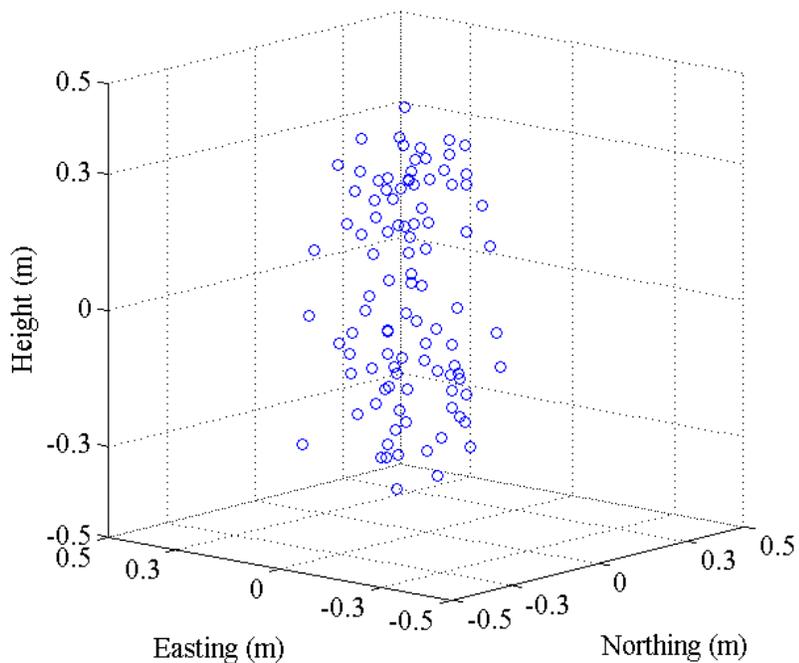


圖 4 基線 SPP4-HOLN 使用 TWIM 改正之三維誤差圖(GLONASS)

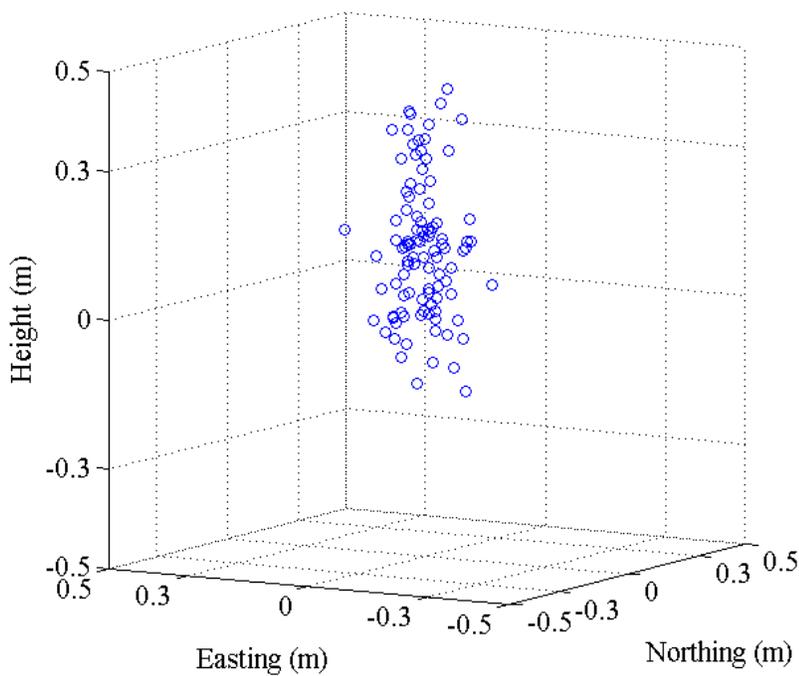


圖 5 基線 SPP4-HOLN 使用 TWIM 改正之三維誤差圖(GPS)

表 5 有無使用 TWIM 模型對於定位成果影響之比較(GLONASS)

SPP4-HOLN	南北向 (m)	東西向 (m)	高程向 (m)
含 TWIM			
MEAN	0.024	0.071	0.013
RMS	0.095	0.115	0.229
Sigma	0.092	0.089	0.228
未含 TWIM			
MEAN	-0.140	0.058	0.219
RMS	0.376	0.197	0.626
Sigma	0.347	0.196	0.583

表 6 有無使用 TWIM 模型對於定位成果影響之比較(GPS)

SPP4-HOLN	南北向 (m)	東西向 (m)	高程向 (m)
含 TWIM			
MEAN	0.059	0.046	0.109
RMS	0.074	0.073	0.176
Sigma	0.045	0.056	0.138
未含 TWIM			
MEAN	0.103	0.076	0.333
RMS	0.184	0.222	0.467
Sigma	0.157	0.211	0.349

表5、6可看出TWIM模型對於觀測量的修正，有助於達到更好的解算成果。以標準差而言，GLONASS系統平面與高程皆有約2-3倍的改進，GPS系統則約為3倍之精進。

由表3、4可看出，在距離56 km的基線兩端，面對相同衛星，尤其是相對低仰角的衛星，路徑上的TEC值差異已可明顯辨別，如未加以修正，僅假定二次差分觀測式可將電離層影響量消除，將造成求解不穩定，定位結果難以收斂，或收斂至錯誤的位置。

六、結論

1.雖然目前備有接收GLONASS觀測資料的接收儀並不多，但在改良式模稜函數

法的應用中，GLONASS系統所具備的二次差分定位能力，目前已有很不錯的成果。在期盼其他衛星系統成熟發展前，GLONASS無論在單系統定位與系統間整合，具有極高的研究與應用價值，值得持續探討。

2.在較長基線的處理上，由於改良式模稜函數法為了保有相位模稜的整數特性，如果觀測量的電離層誤差未經修正，會造成本研究之方法失敗。由最小二乘法理論即可看出，原始觀測量本身的精度，會直接影響最後解答的結果。以本研究為例，電離層延遲量經TWIM改正後，對於求解有關鍵性的貢獻。TWIM以接收路徑方向直接估計總電子含量的方式，提高了基線兩端電離層

影響量差異的解析能力。

3. 本研究之方法不僅避免了直接求解相位模稜與坐標參數間的高相關問題，更降低了最小二乘法中參數過多難以求解的困難。以 GLONASS 衛星系統為例，相較於 GPS 二次差分系統，多了一個時錶偏差的估計量，而在衛星顆數較少或構形不佳的狀態下，改良式模稜函數法可以提供更多且更好的求解自由度。
4. 改良式模稜函數法無論應用於 GLONASS 或 GPS 衛星系統，定位成果皆逼近傳統直接解算相位模稜之方法，而高程方向雖然定位成果較差，但仍保持在標準差為平面精度 2-3 倍的普遍認知內。以計算結果而言，GPS 相對於 GLONASS 系統具有較好的定位成果，自由度、觀測精度與衛星構形等先天限制是導致此結果的主因。
5. 層次式的求解方式，是先由最長的超寬巷，後由中波長的寬巷，最後由最小波長的原始觀測量進行解算，漸進的收斂，雖然程序較為繁複且耗費計算時間，但較不易漏失解答。而由精度較差的電碼觀測量所計算出的參數估值，經搜索空間的判定，將所有較為可能的初始值納入，可以提供較好的近似值，助於解答之收斂。

參考文獻

1. 黃俊穎，2009。運用臺灣自主電離層數值模式研究電離層赤道異常現象，碩士論文，國立中央大學太空科學研究所，中壢。
2. 游豐吉，1999。應用 GPS 載波相位於餘弦模式於衛星測量之研究，博士論文，國立中央大學土木工程研究所，中壢。
3. Boucher, C. and Altamimi, Z., 2001. ITRS, PZ-90 and WGS 84: current realizations and the related transformation parameters. *Journal of Geodesy*, Vol. 75, No. 11, pp. 613–619. doi:10.1007/s001900100208
4. Cellmer, S., Wielgosz, P., and Rzepecka, Z., 2010. Modified ambiguity function approach for GPS carrier phase positioning. *Journal of Geodesy*, Vol. 84, No. 4, pp. 267–275. doi:10.1007/s00190-009-0364-8
5. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Wasle, E., 2008. *GNSS—Global Navigation Satellite Systems*, 5th edn., Springer, New York .
6. Leick, A., 2004. *GPS Satellite Surveying*, 3rd edited, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
7. Pratt, M., Burke, B., and Misra, P., 1997. Single-Epoch integer ambiguity resolution with GPS-GLONASS L1-L2 carrier phase measurements. *Proceedings of ION GPS-98*, Nashville, TN, September 15–18.
8. Remondi, B.W., 1991. Pseudo-kinematic GPS results using the ambiguity function method. *Navigation*, Vol. 38, No. 1, pp. 17–36.
9. Saastamoinen, J., 1973. Contribution to the theory of atmospheric Refraction. *Bulletin Géodésique*, Vol. 107, No. 1, pp. 13–34 doi:10.1007/BF02521844
10. Teunissen, P. J. G., De Jonge, P. J., and Tiberius, C. C. J. M., 1997. Performance of the LAMBDA Method for Fast GPS Ambiguity Resolution. *Navigation*, Vol. 44, No. 3, pp. 373–383.
11. Tsai, L. C., Liu, C. H., Hsiao, T. Y., and Huang, J. Y., 2009. A near real-time phenomenological model of ionospheric

- electron density based on GPS radio occultation data. *Radio Science*, Vol. 44, RS5002, pp. 1–10.
[doi:10.1029/2009RS004154](https://doi.org/10.1029/2009RS004154)
12. Wang, J., Rizos, C., Stewart, M. P., and Leick, A., 2001. GPS and GLONASS integration: modeling and ambiguity resolution issues. *GPS Solutions*, Vol. 5, No.1, pp. 55–64.
[doi:10.1007/s001900100208](https://doi.org/10.1007/s001900100208)
13. Wu, J. and Hsieh, C. H., 2010. Statistical modeling for mitigation of GPS multipath delays from day-to-day range measurements. *Journal of Geodesy*, Vol. 84, No. 4, 223–275.
[doi:10.1007/s00190-009-0358-6](https://doi.org/10.1007/s00190-009-0358-6)
14. Zinoviev, A. E., 2005. Using GLONASS in combined GNSS receivers: current status, *Proceedings of ION GNSS*, Long Beach, CA, September 13–16.