

台灣區域性電離層模型之估計：應用於單頻精密單點定位

Estimation of Taiwan Regional Ionospheric Model : Application to Single Frequency Precise Point Positioning

彭德熙¹
De-Si Peng

陳國華²
Kwo-Hwa Chen

楊名³
Ming Yang

摘要

全球定位系統(Global Positioning System, GPS) 是一項高精度的定位技術。目前單頻定位誤差最大來源是電離層影響。本研究利用國土測繪中心提供的本島 2006 年 e-GPS 資料, 使用球諧函數的概念, 估計出適合於台灣的區域性電離層模型, 並與 IGS 電離層模型作比較, 分析兩者對單頻精密單點定位精度的影響。首先比較台灣上空(120E, 22.5N)之全電子含量差異, 發現 IGS 與台灣區域性電離層模型兩者差值於各時段之 RMS 值為 3~8TECU。

進行單頻精密單點定位測試於不同時段時, 使用台灣區域性電離層模型時, 其定位精度可較使用 IGS 模型提升約 80~90%。若選用一整天觀測資料, 使用 IGS 模型時, 其定位誤差 RMS 值為公尺等級, 而使用台灣電離層模型時, 平面定位誤差約為 5cm, 高程則約為 15cm。因此得知, 使用台灣區域性電離層模型可較使用 IGS 模型能更有效的改善定位誤差。

關鍵詞：全球衛星定位系統、區域性電離層模型、單頻精密單點定位

Abstract

Global Positioning System (GPS) has been known as a high-precision positioning technology. The ionospheric delay is currently the primary error of GPS single frequency positioning. This study focus on the estimation of a Taiwan ionospheric model in terms of spherical harmonic coefficients derived from 2006 e-GPS data provided by National Land Surveying and Mapping Center. A comparison of total electron content difference between the IGS model and the Taiwan local

¹ 國立成功大學 測量及空間資訊學系 碩士
² 國立臺北大學 不動產與城鄉環境學系 助理教授
³ 國立成功大學 測量及空間資訊學系 教授

ionospheric model at a location (longitude: 120E, Latitude:22.5N) shows the RMS is 3~8 TECU.

Different ionospheric models used for single frequency Precise Point Positioning were tested at different time intervals. Using the Taiwan ionospheric model can improve the positioning accuracy by 80~90% compared with using the IGS model. Additionally, if a whole day GPS data are adopted in the test, positioning error is at meter level by applying the IGS model, while positioning error can reach 5 cm in horizontal and 15 cm in vertical after the Taiwan ionospheric model is corrected. In conclusion, using the Taiwan ionospheric model is better than using the IGS model.

Key words: GPS、Regional Ionospheric Model、Single Frequency Precise Point Positioning

一、前言

GPS 是一項高精度的定位技術，利用雙頻觀測的方式可達到高精度量測，然而儀器較為昂貴，因此希望以單頻定位的方式達到所需。電離層誤差目前是單頻定位最主要的誤差，雖然可由差分定位方式消除電離層延遲量，但僅適用於短基線。若為中長基線，此時誤差無法全部消除(Seeber, 2003)。而差分定位精度雖然較高，然而所需物力較多，因此希望以單點定位方式達到需求，目前單點定位精度僅在公尺等級，精度上略顯不足，因此衍伸出精密單點定位(Precise Point Positioning, PPP)(Zumberge et al., 1997)。PPP 是利用精密星曆、精密衛星時錶差等資料，將系統誤差來源降之最低，進而直接利用衛星定出使用者位置。傳統上 PPP 使用雙頻觀測以消除一階項電離層誤差，但雙頻儀器造價昂貴。若僅使用單頻接收儀則電離層誤差影響很大，因此需要一個合適的電離層模型。而電離層的影響主要跟使用者所在的位置、太陽照射的時間、太陽黑子活動劇烈與否有很大關係，通常在低緯度地區、太陽照射時、黑子活動很劇烈時，此時電離層影響量較大。目前 IGS 底下 CODE 中心可提供一個全球性的電離層模型，在此簡稱為 IGS 模型，其表示方式是以球諧函數表示，解算階數為 15 階，使用者可自行上網下載使用(Feltens and Schaer, 1998; Schaer, 1999)，然而無法詳細描述台灣區域內的電離層變化。因此希望有一個適合於台灣地區的區域性電離層模型，可以在單頻精密單點定位上能有更高的定位精度。

二、電離層性質

2.1 電離層結構

電離層是游離氣體的電漿態，主要是因為大氣層內受到太陽射線分離部份的自由電子構成的。電離層分布在地表上方 50~1000 公里的地方，隨著自由電子的密度不同，可以將電離層主要分為 D、E、F 三層(Davies, 1969)。

2.2 電離層變化特性

電離層內電子密度變化主要是因為太陽及其活動的關係，因為電離層內電離度是受太陽輻射影響，因此電離層會隨著所在的位置、時間、太陽活動的不同而有所變化。一般來說有幾種影響因素：

1. 地理區域變化的影響

由於地表面緯度不同受到太陽照射影響也會有所不同，因此會隨著區域的不同而有所變化，隨著地磁緯度的不同，主要可以分成三個區塊，低緯度地區、中緯度地區、高緯度地區(Komjathy, 1997)。

低緯度地區主要是分在磁緯南北 20 度的範圍內，此區電子密度最高，電離層影響最強烈。而在磁緯南北 10 度至 20 度的範圍內白天時候 F2 層電子密度會出現極大值，這個現象稱為赤道異常(Equatorial Anomaly)現象。形成原因是因為當電離層受到太陽照射及潮汐作用造成電離層下層電漿上移，穿越地球磁場線，此時會形成一個電流，與磁場線的交互作用導致磁赤道附近 $\pm 10\sim 20$ 度的電離度增強，而使得電離層影響更為劇烈(Komjathy, 1997)。而台灣地區磁緯分布為磁北 $10\sim 20$ 度之間，即是位在赤道異常地區，因此電離層研究是一個非常感興趣的課題。中緯度的地方則是電離層最為平緩的地方，這邊電離層活動較為平緩。高緯度地區電子密度沒有低緯度地區來的高，但短時間內變化非常劇烈(Komjathy, 1997)。

2. 時間變化的影響

由於地球自轉的關係，因此每天同一個地方受太陽照射量大小會隨著時間的不同而有所改變，白天時候因為受太陽輻射影響較大，所以電子密度較高，晚上的時候則較低，通常一天當中電子密度最高的時間是當地下午二時(Local Time)。

3. 太陽活動的影響

電離層形成原因是因為空氣中的原子與分子受到太陽輻射成電子的，所以太陽活動活躍與否與電離層有很大的關係。通常用來表示太陽活動活躍與否用太陽黑子數(Sunspot Number)來表示。黑子數目越多表示太陽活動越劇烈，反之數目越少則較為平緩。太陽黑子的面積並沒有一定的大小，黑子從出現到消失的時間一直在變，有的可能短短幾天，長的也可達數個月。太陽黑子數目從最小量到下一次最小量稱為一個週期，通常黑子週期是 $9\sim 14$ 年左右，平均來說黑子變化週期為 11 年。下圖 1 可以看出 2006~2007 年之間太陽活動剛好在較低點的地方。

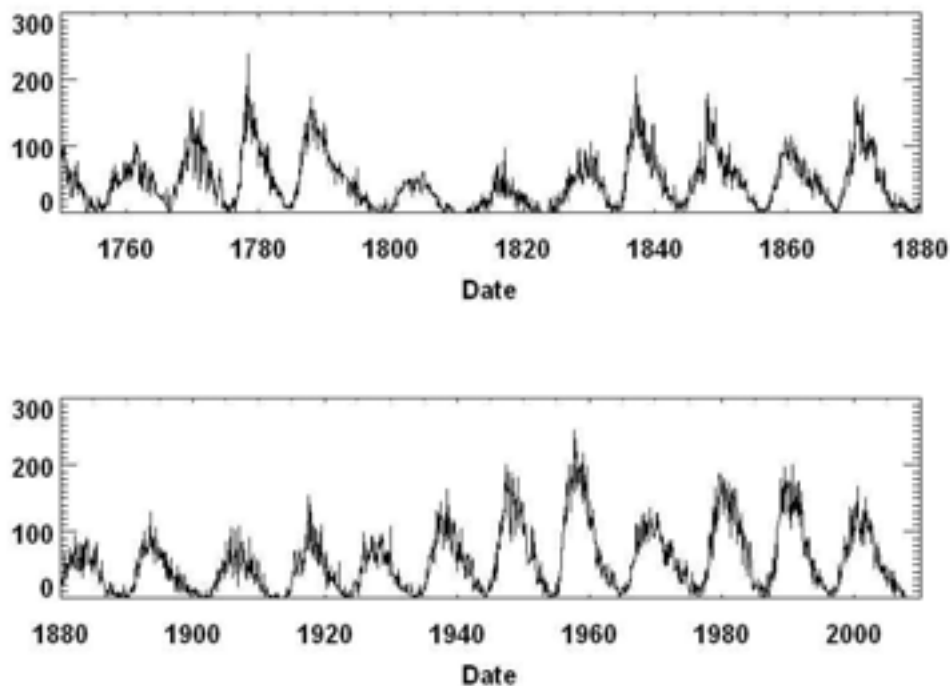


圖 1、太陽黑子變化週期

(摘自 NASA 網站 <http://solarscience.msfc.nasa.gov/>)

4. 特殊現象

當太陽附近發生太陽閃燃(Solar Flare)現象時，此時太陽風高能量的帶電粒子會影響地球的磁場，造成地磁擾亂的現象，成為磁暴現象(Geomagnetic Storm)。此時電離層中的電子密度會在短時間內急速上升，稱為電離層暴現象(Ionospheric Storm)，造成電離層活動會非常劇烈(Komjathy, 1997)。

電波傳播一般來說在經過電離層時會受到其電子密度大小、電離層活動劇烈與否影響。電離層研究有許多方法，例如電離層探測儀、GPS 觀測資料、非同調散射雷達(Incoherent Scatter Radar)、測高衛星(T/P)等觀測技術，由於 GPS 在各種應用上相當普及且廣泛應用，下面就 GPS 方法做介紹說明。

三、利用 GPS 觀測量模式化電離層之方法

3-1 電離層延遲效應與電磁波

電離層延遲量造成距離的量測誤差可以很簡單的算出(Hofmann-Wellenhof et al., 2001; Seeber, 2003)，藉由 Fermat's 定理可以得知電離層延遲量距離以下列

式子表示：

$$\Delta S_{ION} = \pm \frac{40.3}{f^2} TEC \quad (1)$$

ΔS_{ION} ：電離層延遲量距離，載波相位為負值，虛擬距離為正值、 f ：使用的頻率、 TEC ：全電子含量、 $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ (electrons/m}^2\text{)}$ 。

3.2 GPS 觀測量與全電子含量關係

接下來就可以應用 GPS 雙頻觀測資料來獲得全電子含量。為了能找出電離層延遲量與 GPS 的關係，因此希望將其它誤差都降至最低點，讓所推出的誤差來源屬於電離層所造成的。因此可以針對不同的誤差做不同的改正動作，像是架設地面追蹤站時能避免附近有強反射物以降低多路徑效應的影響，另外使用高品質的 GPS 接收儀也可將觀測雜訊降至最低 (Schaer, 1999)。其它像是能夠使用處理過提供的精密衛星時錶差改正、精密地球旋轉改正、精密星曆等，可以將這些誤差來源再予以降低。對流層的部份，乾延遲量以一個乾分量模型計算再加上 GPS 參數估計出的濕延遲量，兩者相加的總延遲量即為對流層的改正 (Seeber, 2003)。另外 GPS 發射訊號時從訊號產生到訊號離開天線有一段時間，不同的頻率訊號所造成的延遲時間也不同，理論上訊號發射與接收應該是同步的， L_1 與 L_2 訊號是否同時發射與同時接收也是影響很大 (Mannucci et al., 1998)，這項誤差稱為硬體的延遲偏差 (Differential Code Bias, DCB)，使用 GPS 零次差觀測量時，為了使電碼觀測量 (Code Observations) 與 IGS 提供的衛星時錶資料一致，此項與衛星有關的偏差量必須加以改正 (Kouba and Hroux, 2001)，若沒改正此項誤差對衛星造成的偏差量可達 $\pm 9 \text{ TECU}$ 左右，而接收儀更可達到 $\pm 30 \text{ TECU}$ (Mannucci et al., 1998; Gao and Liu, 2002)。

利用雙頻觀測資料組成 L_4 觀測量 (geometry-free)，即是利用 L_1 與 L_2 兩觀測量相減，可以得到下列式子：

$$P_4 = P_1 - P_2 = \Delta\rho_{ion,1} - \Delta\rho_{ion,2} + (B_{r,1} - B_{r,2}) + (b_1^s - b_2^s) + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (2)$$

$$L_4 = L_1 - L_2 = -(\Delta\rho_{ion,1} - \Delta\rho_{ion,2}) + (B_{r,1} - B_{r,2}) + (b_1^s - b_2^s) + (N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2) + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (3)$$

其中， $\Delta\rho_{ion,1}, \Delta\rho_{ion,2}$ ： L_1 、 L_2 電離層延遲量、 λ_1, λ_2 ： L_1 、 L_2 波長、 N_1, N_2 ： L_1 、 L_2 週波未定值、 $b_1^s, b_2^s, B_{r,1}, B_{r,2}$ ：衛星、接收儀硬體延遲偏差、 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ：觀測雜訊。

由公式 1 可以得知電離層延遲量與頻率有關，假設 L_2 的延遲量是 L_1 的 k 倍，可將上述式子化作以下表示：

$$P_4 = (1-k)\Delta\rho_{ion,1} + (B_{r,1} - B_{r,2}) + (b_1^s - b_2^s) + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (4)$$

$$L_4 = -(1-k)\Delta\rho_{ion,1} + (B_{r,1} - B_{r,2}) + (b_1^s - b_2^s) + (N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2) + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (5)$$

k : L_2 延遲量為 L_1 的 k 倍。

假設不考慮雜訊誤差的影響，並將電離層的延遲量取至一階項，可由公式(1)得知 TEC 與 GPS 觀測量關係表示如下：

$$TEC_g = \frac{f_1^2 [(P_1 - P_2) - (b_{1,2}^s + B_{r_{1,2}})]}{40.3(1-k)} \quad (6)$$

$$TEC_p = \frac{f_1^2 [(P_1 - P_2) - (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) - (b_{1,2}^s + B_{r_{1,2}})]}{40.3(k-1)} \quad (7)$$

TEC_g, TEC_p : 使用虛擬距離及載波相位之 TEC、 $b_{1,2}^s, B_{r_{1,2}}$: L_1 、 L_2 衛星、接收儀硬體偏差差值。

因此可計算出 TEC 與 GPS 觀測量間的關係，為了模式化 TEC，接下來將介紹如何以適當的函數模式化 TEC。

3-3 電離層模式化方法

為了將電離層能模式化且在後續計算方便，引入一個薄球殼模型(Single Layer Model)(Klobuchar, 1987)。假設所有帶電粒子都在這薄球殼上，從 GPS 發射訊號穿過薄球殼到地面接收儀這條路線與薄球殼的交點稱為穿刺點(Ionospheric Pierce Point, IPP)；而穿刺點與地心連線交於地面的點稱為亞電離層點(Sub-ionospheric point)，如下圖 2：

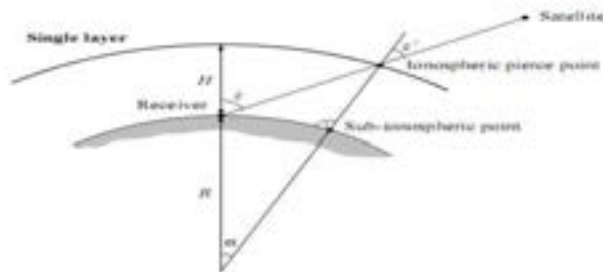


圖 2、電離層單層模型(Schaer, 1999)

z : 地面觀測衛星天頂距、 z' : 薄球殼上穿刺點觀測衛星之天頂距、 R : 地球半徑、 H : 薄球殼高度、 α : 測站位置與亞電離層點位置地心夾角。

為了求得 GPS 訊號路徑上的 TEC 含量，本文採用一個映射函數 $F_I(z)$ ，將亞電離層點垂直天頂方向的 VTEC(E_v)轉換到 GPS 訊號路徑上的 TEC(E)，公式表示如下(Schaer, 1999)：

$$F_I(z) = \frac{E}{E_v} = \frac{1}{\cos z'} \quad (8)$$

$$\sin z' = \frac{R}{R+H} \sin z \quad (9)$$

因此可將 L_4 觀測量與映射函數的關係表示如下 (Schaer, 1999) :

$$P_4 = a \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) F_l(z) E_v(\beta, s) + b_4 \quad (10)$$

$$L_4 = -a \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) F_l(z) E_v(\beta, s) + B_4 \quad (11)$$

a : 常數 $40.3 \times 10^{16} \text{ ms}^{-2} \text{TECU}^{-1}$ 、 B_4 表週波未定值造成的誤差。

接收 GPS 時可以得到原訊號傳遞路徑上 TEC 值，為了能夠轉換到亞電離層點天頂垂直方向的 VTEC，經由映射函數轉換。接下來將 VTEC 進行模式化動作，採用球諧函數展開式來模式化亞電離層點 VTEC 的量 (Schaer et al., 1996)，公式如下：

$$E_v(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin \beta) (a_{nm} \cos(ms) + b_{nm} \sin(ms)) \quad (12)$$

n, m : 表球諧函數的階數以及次數、 \tilde{P}_{nm} : 正規化的 Legendre 函數 (McCarthy, 1996)、 β, s : 穿刺點的地磁緯度與穿刺點位置經度，採用太陽固定系統坐標 (Sun-fixed)，定義表示如下 (Schaer, 1999) :

$$s = LT - \pi \approx UT + \lambda - \pi \quad (13)$$

LT、UT : 地方時與世界時、 λ : 穿刺點地理經度、 a_{nm}, b_{nm} : 待求定的球諧係數。

四、測試成果與分析

本文以台灣區 e-GPS 雙頻觀測資料，使用 GPS 零次差觀測量，線性組合成 L_4 觀測值，並以第三章所述之球諧函數概念，利用 Bernese Version 5.0 軟體作台灣區域性電離層模型的估計。目前估計是每天估計一組電離層模型，由於 IGS 模型是每兩小時估計一組球諧函數，為了後續比較，因此台灣區區域性電離層模型也每兩小時估計一組球諧函數。因為 Bernese Version 5.0 軟體本身的限制，除了限制最高求定階數為 30 階 (order) 以外，另外還有限制解算參數個數 (Beutler et al., 2007)，經過解算測試後目前球諧函數目前求定到 29 階 (order) 29 次 (degree)。

4.1 研究測試資料

研究資料採用國土測繪中心提供的 2006 年 e-GPS 本島觀測站資料，這是台灣首次建立加密之追蹤網，追蹤網的站與站之間間隔大約是 50~70km，站數約 40 站，其中有 4~5 站觀測時間較不連續，品質較不穩定，因此本研究共取了約 35 站使用，測站位置分布在東經 119~123 度與北緯 21~26 度之間。由於電離層延遲影響與時間有

關，因此每個月各選取一個禮拜作模型之估計及分析比較，選取每個月的第二天至第八天，其中三月的部分因為前幾天有時無資料沒辦法構成連續一個禮拜，因此從開始有連續一個禮拜資料的 14 號開始。

4.2 台灣區域性電離層模型估計之成果

本節即利用前述提到的方法及軟體估計出台灣區域性電離層模型，並對其作後續的分析探討。首先選取台灣上空某一定點上的 VTEC 值，觀看其 TEC 變化量，由於 IGS 模型提供的 VTEC 值分布是經度 5 度、緯度 2.5 度為一個網格點(Schaer et al., 1998)，為了分析台灣本島上方的 TEC 變化，因此選定網格點(120E, 22.5N)。圖 3(a)~圖 3(b)為 IGS 電離層模型與台灣區域性電離層模型於 2006 年 1~12 月於網格點(120E, 22.5N)上每天 0 時~24 時的各月平均 TEC 變化圖，由圖 3(a)~圖 3(b)得知兩者變化趨勢是相同的，高峯值出現在下午兩點，而夏季的時候高峯值大約會出現晚兩小時。也可看出 3~4 月、11~12 月(春、秋)的 TEC 高峯值較 6~8 月(夏季)來的高，這是因為電離層會有季節性的影響。

表 1 為 IGS 電離層模型與台灣區域性電離層模型兩者估計出各月平均 TEC 差值之 RMS 值於各時段情形。RMS 分布在 3~8TECU 左右，凌晨 00:00~06:00 的 RMS 為 3TECU 左右，是一天當中差異最小的時段；最大值出現在下午 12:00~18:00，RMS 可達 8TECU，此時為一天當中電離層活動最為活躍的時段。表 1 也可以得知在 3 月、4 月、10 月、11 月，春、秋這兩季各時段 RMS 差異也比其他月份來的高，這是季節性的影響因素，造成春秋兩季電離層活動較為活躍(楊銘仁，2004)。

為了分析全台灣各地 TEC 變化，以下取出實驗資料中變化較為劇烈的一天，觀測日期為 2006 年 11 月 07 日，範圍選取東經 119~123 度，北緯 21~26 度之間。分析當天的 TEC 變化，由於兩小時估計一組球諧函數，因此可以得到每兩小時位在台灣上方的 TEC 變化圖，其中時間的表示是以當地時間(Local Time)來表示，電子含量以 TECU 來表示，顏色偏藍色代表電子含量較低，深紅色則代表電子含量較高，如圖 4(a)~圖 4(c)。可以看出 TEC 含量最大的時候是 12:00~16:00 的時候，最大值出現部份在下午兩點時，此時因為太陽照射的關係，因此電子密度濃度較濃，電子含量較高；凌晨的時候 00:00~06:00 電子活動較為平緩，所以電子密度較低，電子含量較低。而台灣南部電離層影響也較北部來的劇烈，12:00~14:00 這段期間內影響尤其顯著，可以很清楚看出在這段時間內台灣南部(較低緯度)的 TEC 是較台灣北部(較高緯度)來的大，這是因為緯度因素影響造成的(Schaer, 1999)。

由圖 4(a)~圖 4(c)也可得知，下午兩點且位置處於緯度較低的部份，此時受到電離層的影響最劇烈，劇烈時可達到 80TECU，使用 L_1 觀測量時，電離層延遲量可達到 13 公尺誤差影響。

表 1、IGS 與台灣區域性電離層各時段 RMS(1~12 月)

月份	各時間段 RMS 之 TEC 值(TECU)											
	02h	04h	06h	08h	10h	12h	14h	16h	18h	20h	22h	24h
01	2.20	2.62	2.18	4.82	5.16	6.38	9.35	7.11	2.64	2.65	2.66	2.26
02	3.09	3.17	3.65	2.98	2.86	5.42	6.82	3.56	3.39	4.41	3.61	3.64
03	3.15	2.73	3.31	3.56	3.75	5.41	8.45	9.52	4.28	2.95	2.70	2.91
04	3.54	2.67	2.37	5.00	4.73	6.75	12.21	13.50	9.31	12.34	6.01	5.82
05	3.58	4.13	4.05	2.97	3.01	6.30	9.69	8.24	6.80	4.90	4.68	4.25
06	3.92	3.96	4.30	4.78	4.21	4.29	5.26	4.69	6.40	4.81	3.41	4.63
07	3.47	2.85	8.82	5.62	4.19	4.93	4.37	4.63	3.97	3.63	3.61	3.36
08	3.79	3.83	4.47	4.94	4.41	4.83	5.34	4.84	4.59	4.93	4.60	4.40
09	4.09	3.13	3.08	3.09	4.18	5.62	7.57	7.95	8.63	5.90	5.82	3.73
10	3.80	3.64	3.17	3.96	3.89	7.02	10.42	10.12	6.57	5.93	4.96	3.62
11	2.97	2.32	2.11	3.34	3.48	9.50	12.26	7.85	4.77	2.02	2.98	3.25
12	4.25	4.08	4.02	2.31	3.08	5.48	4.00	5.40	4.29	4.75	4.84	4.93
平均	3.49	3.26	3.79	3.95	3.91	5.99	7.98	7.28	5.47	4.93	4.16	3.90

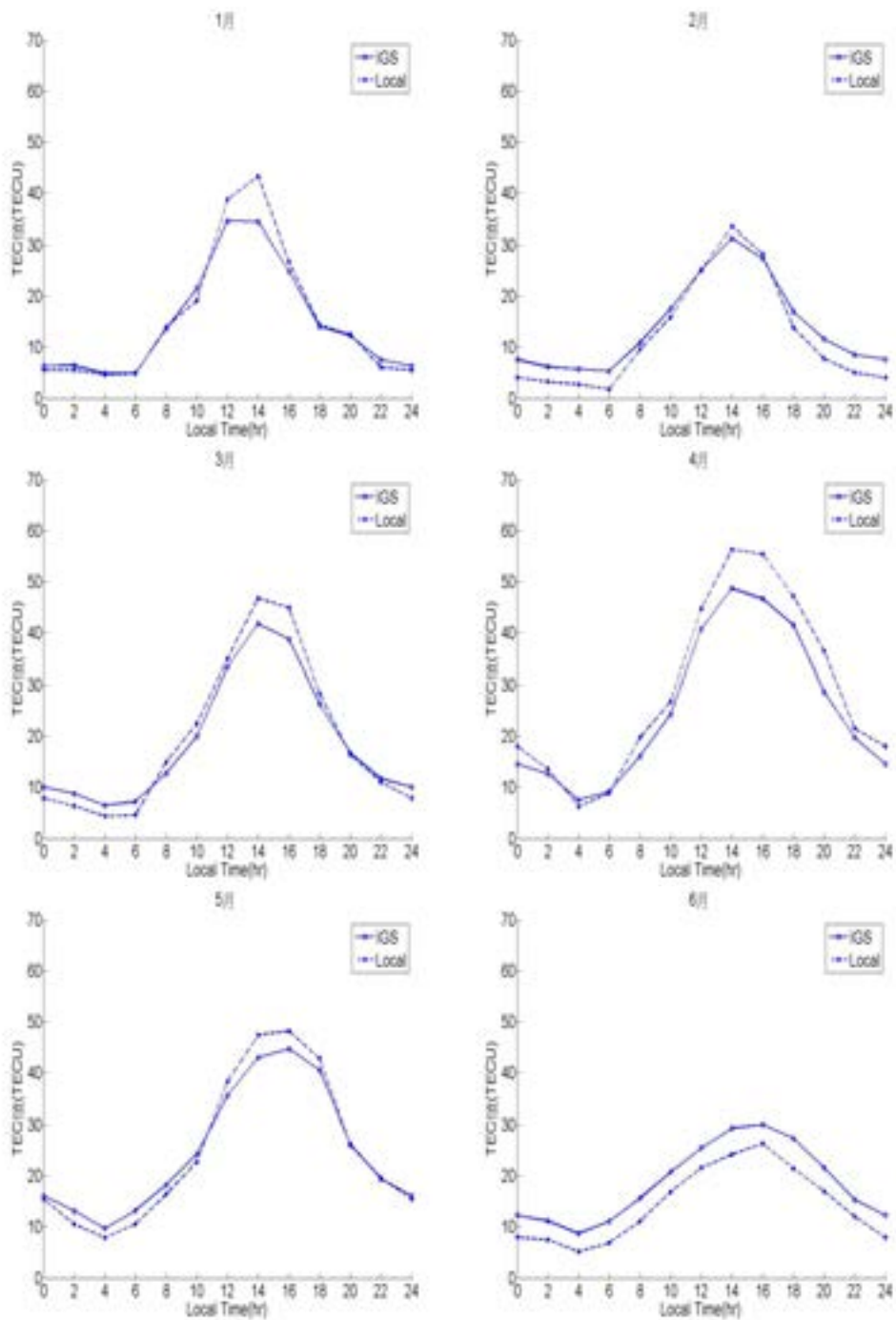


圖 3(a)、網格點 (120E, 22.5N) 每天 IGS 與台灣區域性電離層 TEC 變化比較圖 (1~6 月)

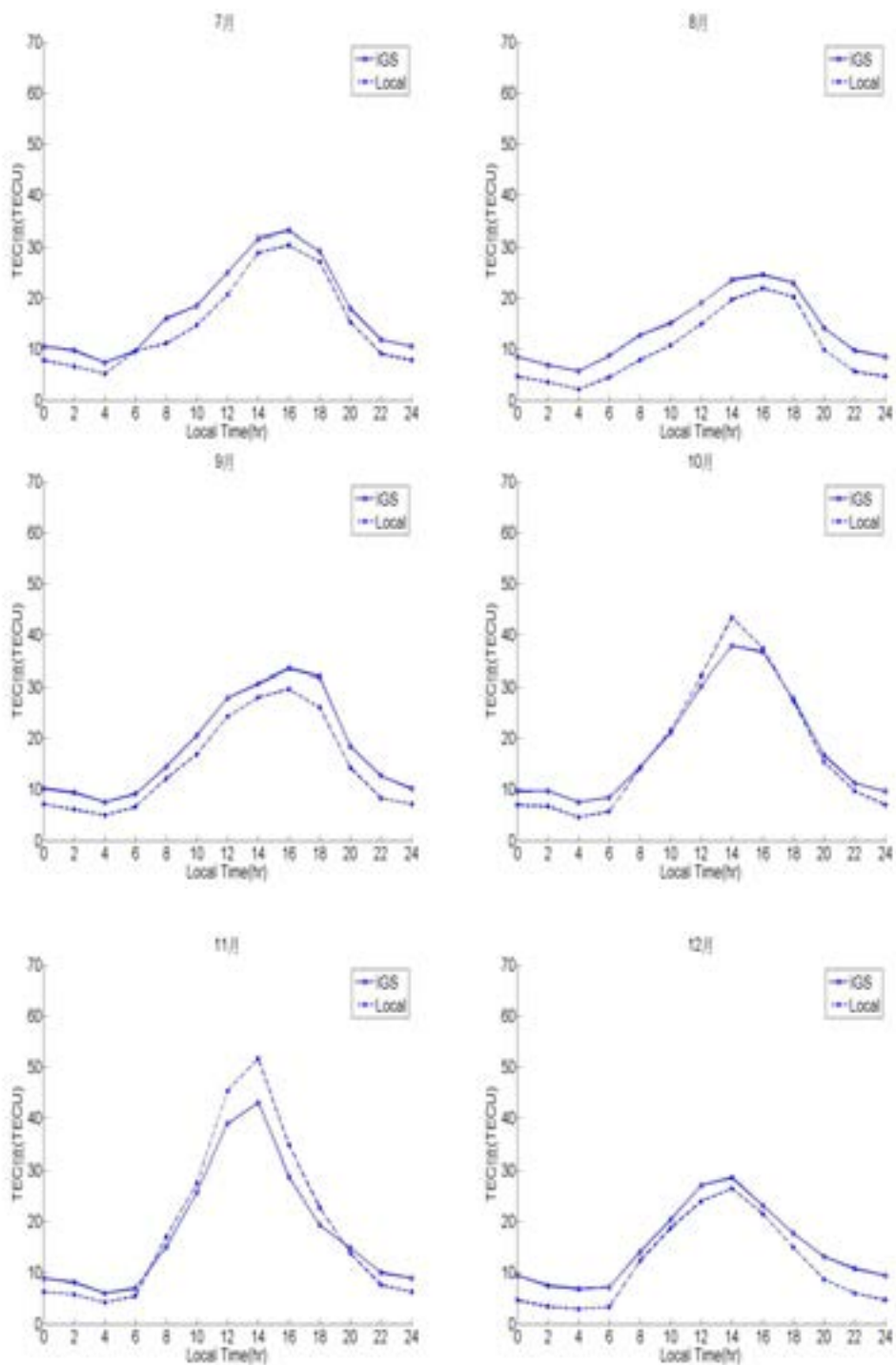


圖 3(b)、網格點(120E, 22.5N)每天 IGS 與台灣區域性電離層 TEC 變化比較圖(7~12 月)

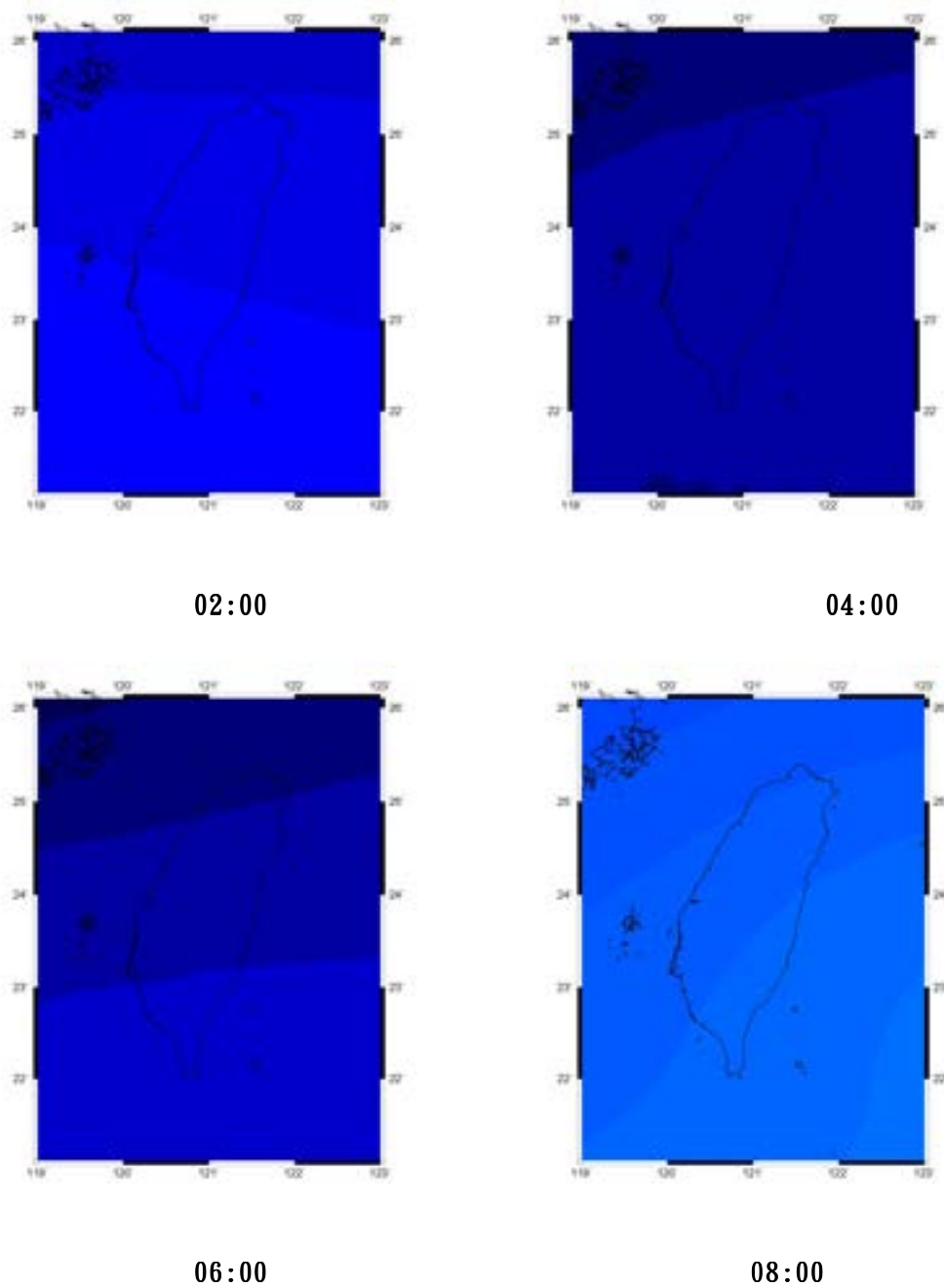
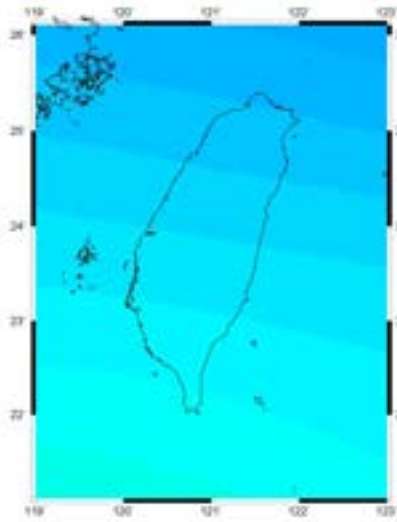
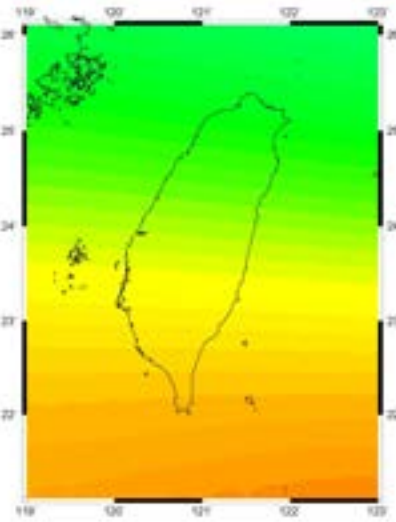


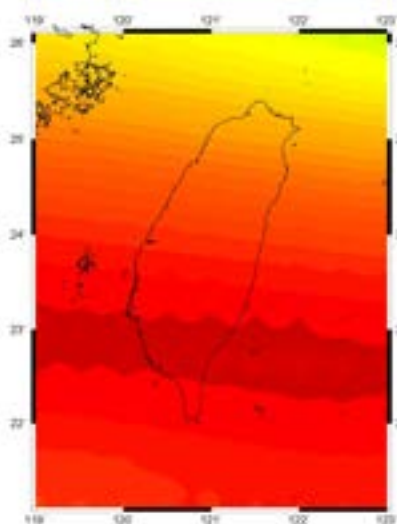
圖 4(a)、TEC 時間變化圖(時間：2006/11/07 02:00~08:00)



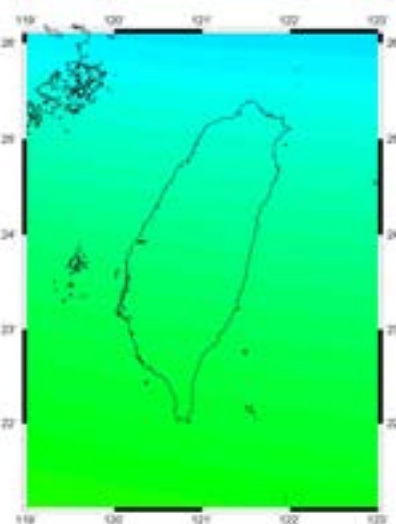
10:00



12:00



14:00



16:00

圖 4(b)、TEC 時間變化圖(時間：2006/11/07 10:00~16:00)

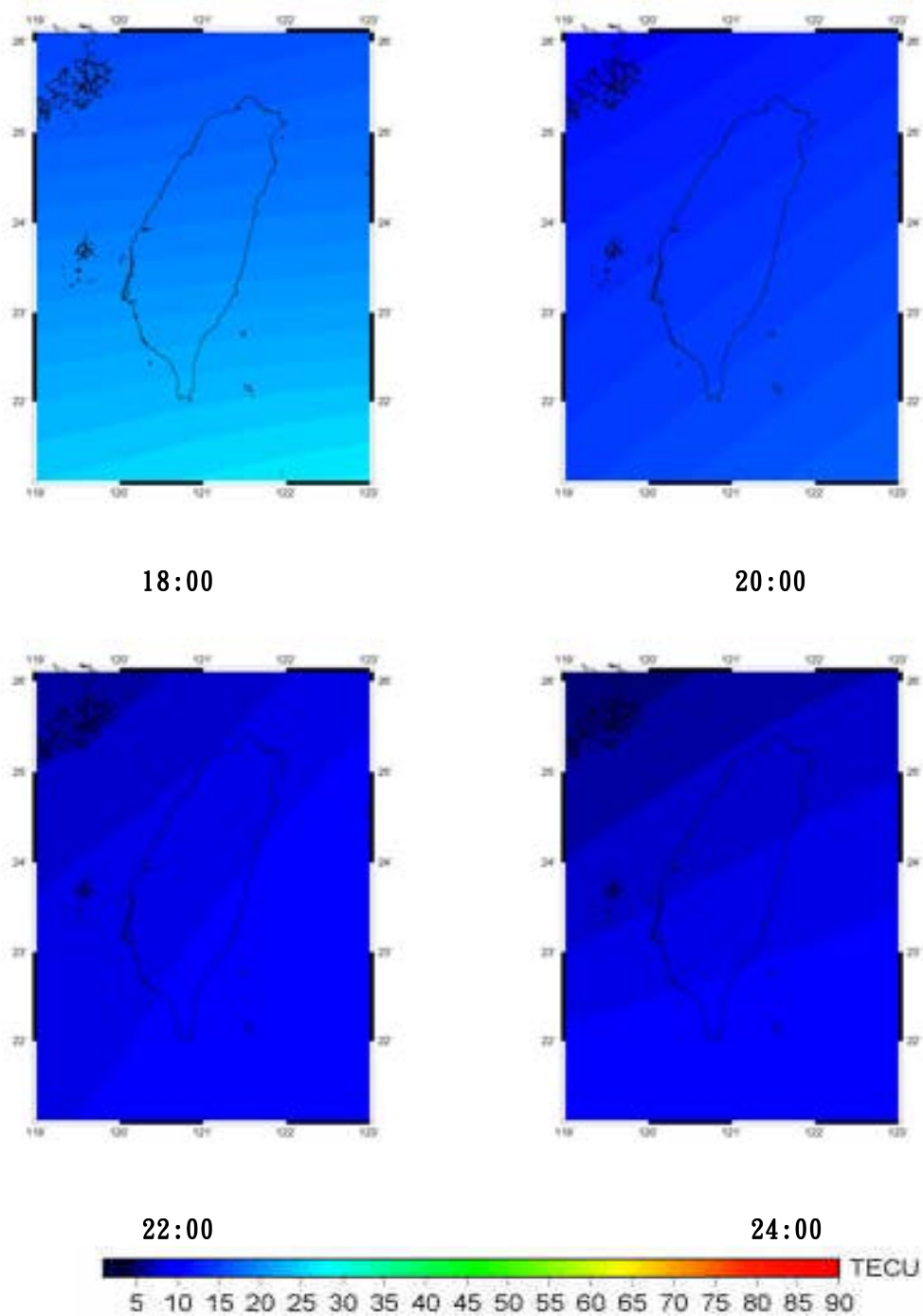


圖 4(c)、TEC 時間變化圖(時間：2006/11/07 18:00~24:00)

4.3 單頻精密單點定位測試

接下來將台灣區域性電離層模型應用在單頻精密單點定位測試上，分析比較四種不同的情形：

1. 僅使用 L_1 觀測量
2. 使用 $L_1 + \text{IGS Ion Model}$
3. 使用 $L_1 + \text{Local Ion Model}$
4. 使用雙頻無電離層線性組合 L_3 觀測量

分析其在精密單點定位下定位成果。採用國際地球參考框架(International Terrestrial Reference Frame, ITRF)坐標，由於測試站(北港)坐標呈現下沉變化，若採用全年坐標平均值視為真值較不合理，因此採用每個月坐標平均值視為該月坐標真值。如此可求得 ITRF 坐標(真值)與上述四種情形定位成果的每個月坐標變化量與坐標差異之 RMS 值，坐標變化量如圖 5，可以得知當使用單頻搭配台灣區域性電離層模型或是使用 L_3 觀測量時，其坐標變化量於 N、E、H 三方向變化都較僅使用單頻或單頻搭配全球電離層模型來的小；另外再將 1~12 月 RMS 值取平均即為定位精度。由於電離層影響與當地時間有關，將時間 00:00~24:00 分成四段，00:00~06:00、06:00~12:00、12:00~18:00、18:00~24:00。

表 2 與表 3 為單頻加入 IGS 電離層模型與台灣區域性電離層模型，兩種情形對定位精度提升百分比相較於僅使用單頻於水平及高程方向。茲對水平方向 00:00~06:00，其百分比如何計算加以說明。

$$\begin{aligned} \text{IGS} & \quad [(0.4749 - 0.3975) / 0.4975] \times 100\% \quad \approx 16.30\% \\ \text{台灣區域性} & \quad [(0.4749 - 0.0827) / 0.4975] \times 100\% \quad \approx 82.59\% \end{aligned}$$

當加入 IGS 電離層模型時，對定位精度的提升相較於僅使用 L_1 時只有提升 50%，且在高程的情況下提升更有限；而加入台灣區域性電離層模型，相較於僅使用 L_1 時在水平方向定位精度可提升約 90%，高程方向則約 85%。由表 4 與表 5 得知當使用台灣區域性電離層模型時，較使用 IGS 模型時，於定位精度上再提升 86%，且在電離層活動劇烈(12:00~18:00)所提升的精度會較其他時段來的更顯著。

由表 2 及表 3 知道下午 12:00~18:00 這段時間內加入台灣區域性電離層解算，定位精度提升的程度最高，且由表 1 可以得知這段時間內 IGS 模型與區域型模型兩者的 RMS 最大，可達到 8TECU，因此可以推斷在這段時間內 IGS 所計算出來的電離層模型是較不適合於台灣區域的，整體時間與定位精度關係也可以大致看出這樣的趨勢存在。

表 2、加入 IGS 模型或台灣區域性模型對僅用單頻其定位精度提升程度(水平方向)

時間	定位提升	定位精度提升(%)	
		IGS	台灣區域性
時間(LT)			
00:00~06:00		16.30	82.59
06:00~12:00		43.70	93.67
12:00~18:00		51.35	96.18
18:00~24:00		50.68	92.63

表 3、加入 IGS 模型或台灣區域性模型對僅用單頻其定位精度提升程度(高程方向)

時間	定位提升	定位精度提升(%)	
		IGS	台灣區域性
時間(LT)			
00:00~06:00		-30.53	79.95
06:00~12:00		18.82	88.67
12:00~18:00		45.61	93.68
18:00~24:00		39.49	91.23

表 4、加入台灣區域性電離層提升定位精度相較於加入 IGS 模型(水平方向)

定位精度提升	
時間(LT)	提升程度(%)
00:00~06:00	79.20
06:00~12:00	88.76
12:00~18:00	92.13
18:00~24:00	85.06

表 5、加入台灣區域性電離層提升定位精度相較於加入 IGS 模型(高程方向)

定位精度提升	
時間(LT)	提升程度(%)
00:00~06:00	84.64
06:00~12:00	86.04
12:00~18:00	88.19
18:00~24:00	85.50

由於電離層影響會受太陽照射影響，因此電離層誤差也與季節有關。將測試站北港 ITRF 框架下坐標(真值)與上述四種情形定位成果的坐標差異之 RMS 值，可分別求出 1~12 月 RMS 值。圖 6、圖 7 為四種不同情形於四段不同時間段全年水平與高程方向定位誤差成果。12:00~18:00 由於太陽照射的影響，當僅使用 L_1 觀測量或加入 IGS 電離層模型解算時，定位精度為公尺等級，且在春、秋兩季影響量較大。加入台灣區域性電離層時，此時定位誤差與時間關係影響較不明顯，每個月份的定位誤差大約都在數 10cm 等級。另外若使用 L_3 觀測量，電離層一階項誤差已經消除，因此沒有時間、

季節因素影響，定位誤差均約在 5cm 的等級。

若觀測時間加長，定位精度也會提昇。本研究也將觀測時間拉長到一天 24 小時觀測量，取全年 12 個月觀測資料的平均 RMS 值，定位誤差於四種情形比較如表 6、表 7。比較表 4、表 5 將時間段每 6 小時分一組，可以看出當使用 IGS 電離層模型來改善電離層延遲效應時，即使長時間觀測情況下(觀測一整天資料)，定位精度提升仍有限(約為 20~30%)，且定位誤差依然維持公尺誤差的等級；如果引入台灣區域性電離層模型後，長時間觀測(24 小時)可比短時間觀測(6 小時)在定位精度方面提升 40~60%，且此時定位誤差平面以可達到公分等級，高程方向則是公寸等級。

由表 6、表 7 可以得知，當長時間觀測時， L_3 的平面、高程精度可以達到公分等級；若使用單頻觀測量引入台灣區電離層模式幫助計算時，平面精度已經可以接近 L_3 等級，但高程精度仍然較 L_3 精度來的差。兩者的定位誤差差值之 RMS 於水平方向為 2.71cm，高程方向為 9.66cm。

圖 8 為 24 小時觀測水平方向與高程方向定位誤差於四種情形關係圖。可以看出不管在任何月份的情況下，使用單頻觀測量作精密單點定位時，僅使用 L_1 情況下因為電離層誤差無法消除，誤差仍然公尺等級；若搭配 IGS 電離層模型則只能消除部分誤差，水平方向誤差可提升至公吋等級，但在高程方向仍然有公尺等級的誤差；若加入台灣區域性電離層的定位精度是最接近 L_3 的定位精度，且觀測時間越長時，精度也會隨者提升。單頻觀測時，使用一個適合於台灣地區的區域性電離層模型幫助解算時，若再輔助長時間觀測的情況下，水平方向的定位誤差可接近 6~7cm 的精度，高程方向也可達 15cm 內的精度。

表 6、24 小時觀測定位誤差於四種情形(水平方向)

	定位誤差(m)	
	Case	RMS 值
水平	Case 1	1.6900
	Case 2	0.7416
	Case 3	0.0616
	Case 4	0.0365

表 7、24 小時觀測定位誤差於四種情形(高程方向)

	定位誤差(m)	
	Case	RMS 值
高程	Case 1	1.7303
	Case 2	1.4050
	Case 3	0.1414
	Case 4	0.0480

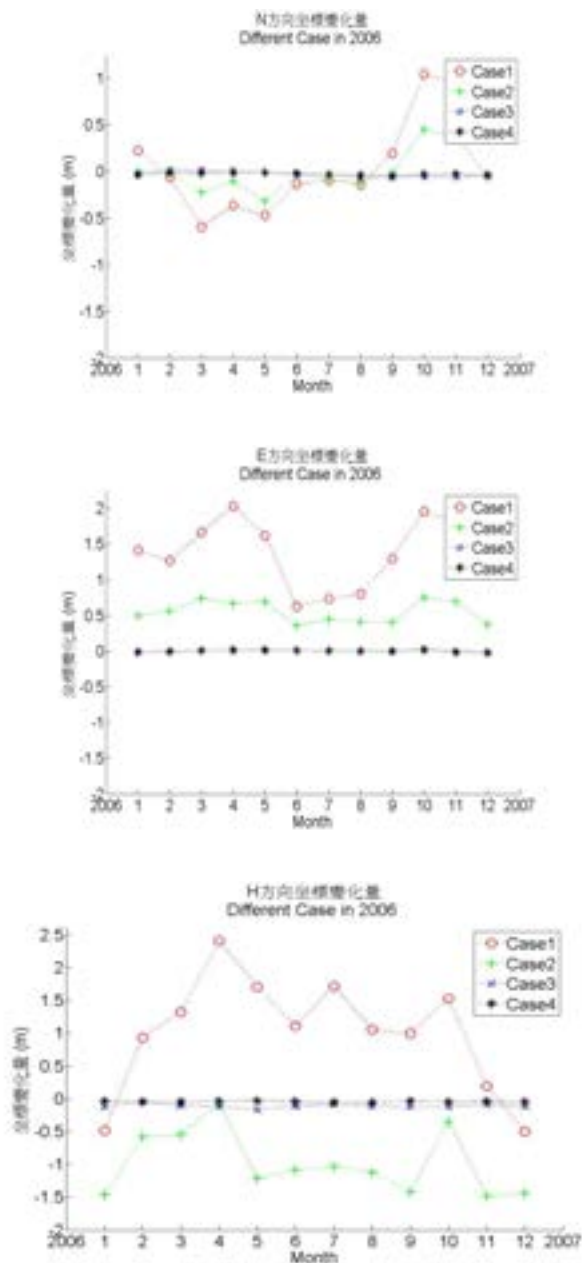


圖 5、北港站四種情形坐標時間序列變化圖(N、E、H 三方向)

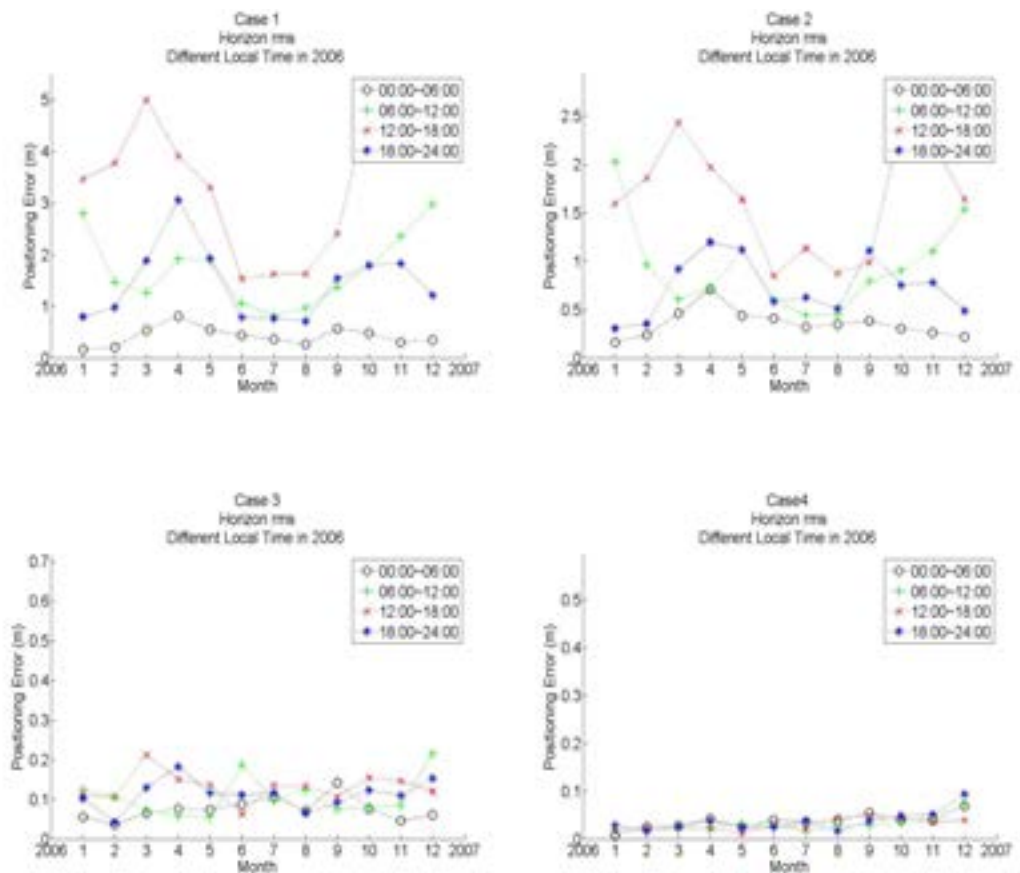


圖 6、水平方向不同月分定位誤差圖

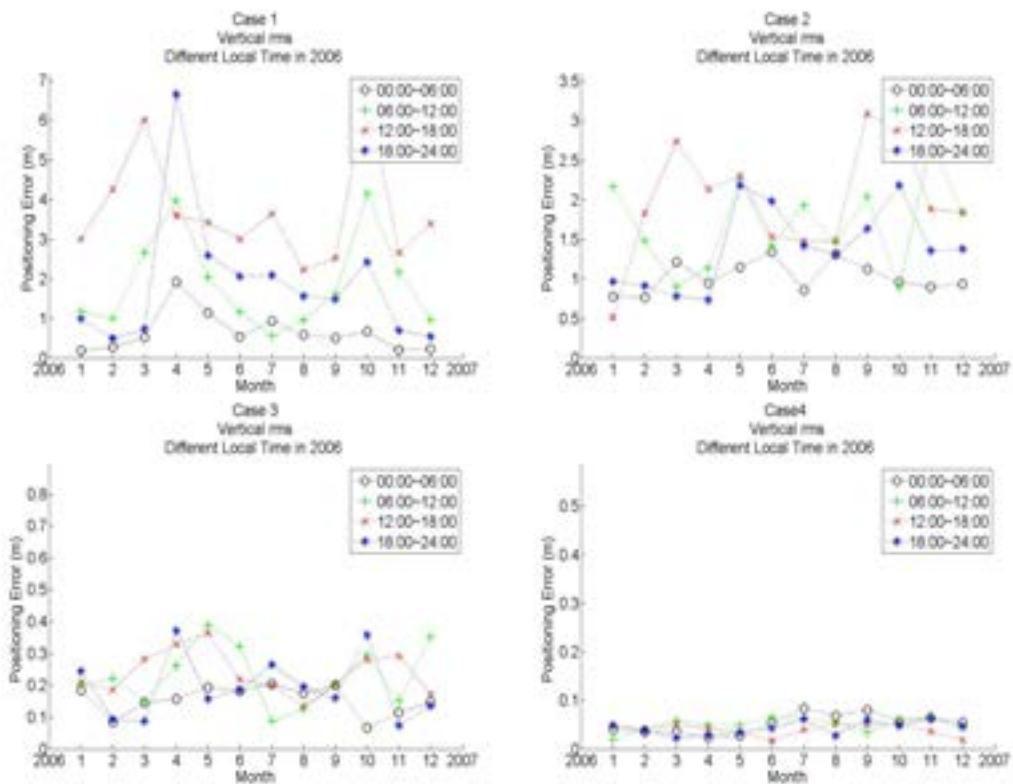


圖 7、高程方向不同月分定位誤差圖

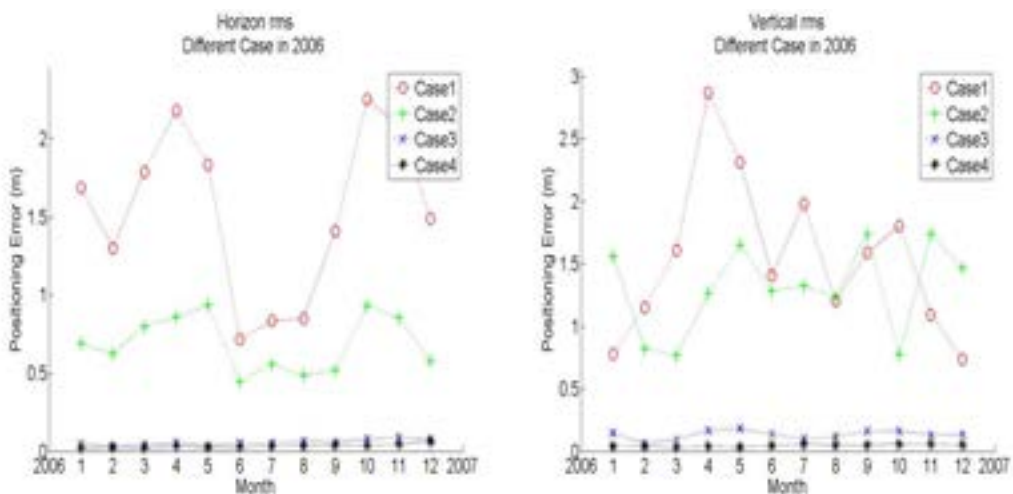


圖 8、24 小時觀測定位誤差於四種情形

五、結論

本文利用台灣區國土測繪中心所提供的 GPS 觀測資料，利用前述章節提到模式化電離層的方法，估計出適合於台灣地區的區域電離層模型，並與全球電離層模型兩者做單頻精密單點定位測試，可以得到以下幾點結論。

1. 台灣區的電離層變化在春、秋的時候電子活動較為活躍，峰值較高，在冬季的時候活動較為平緩，峰值較低；夏季時峰值出現時間會比其他季節約晚兩小時。
2. 峰值出現的時間在當地時間下午兩時，此時電子活動最為活躍，凌晨 00:00~06:00 則是活動最為平緩的時刻，因此這時段電離層造成定位誤差的影響也是最小。
3. 比較台灣上空某一定點 (120E, 22.5N) 上 IGS 模型與台灣區域電離層模型上的 TEC 值，兩者 TEC 差值之 RMS 值分布在 3~8TECU 左右，且電離層活躍時段 12:00~18:00 的 RMS 值最大。
4. 單頻精密單點定位測試的情況下，不使用電離層模型改正下，定位誤差為公尺等級且 12:00~18:00 定位誤差最大；若加入全球電離層模型解算，定位誤差雖然比僅使用單頻情況下來的好的，但仍然有公尺等級的誤差存在，改善大約 50% 左右的誤差；此時若加入估計出的台灣區域性電離層模型，可將定位精度提升至公分等級，相較於 IGS 模型能再提升約 80~90% 的定位精度，且在電離層活動劇烈時段 12:00~18:00 提升更顯著。
5. 長時間的觀測下，使用 L_1 搭配台灣區域性電離層模型的時候，水平方向定位誤差約為 5cm，高程方向定位誤差約為 15cm，而與 L_3 觀測量的定位成果比較，兩者定位誤差差值之 RMS 值水平方向約為 2.71cm，高程方向約為 9.66cm。
6. 由於 Bernese 估計出的區域性電離層模型是球諧格式，容易受限於軟體本身最高解算階數的限制，若要突破此限制，未來應根據其理論自行開發程式，如此可較不受軟體使用限制；也可以適當的函數模式作為電離層模型之研究方向，如何發展更高階的球諧模型或是發展適當的函數模式將區域性電離層模型解析度提高是未來值得研究之課題。

參考文獻

- 楊銘仁，2004，由台灣 GPS 追蹤站 2004 年資料建構區域性電離層模式及其影響定位精度之研究，國立成功大學測量及空間資訊學系研究所碩士論文，台南。
- Beutler, G., Bock, H., Dach, R., 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, Switzerland.

- Davies, K., 1969, *Ionospheric Radio Waves*, Blaisdell Publishing Company, Waltham.
- Feltens, J., and Schaer, S., 1998, IGS Products for the Ionosphere, Proc. IGS Analysis Center Workshop, Darmstadt, Germany, pp. 225-232.
- Gao, Y., and Liu, Z. Z., 2002, Precise Ionosphere Modeling Using Regional GPS Network Data, *Journal of Global Positioning Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 18-24.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Collins, J., 2001, *Global Positioning System: Theory and Practice*, Springer-Verlag, New York.
- Klobuchar, J. A., 1987, Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single Frequency GPS Users, *IEEE Transactions on Aerospace And Electronic Systems*, vol. AES-23, no. 3, pp. 325-331.
- Komjathy, A., 1997, *Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System*, Ph.D dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 188, University of New Brunswick, Canada.
- Kouba, J. and Héroux, P., 2001, Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products, *GPS Solutions* 5(2): 12-28.
- Mannucci, A. J., Wilson, B. D., Yuan, D. N., Ho, C. H., Lindqwister, U. J., and Runge, T. F., 1998, A Global Mapping Technique for GPS-derived Ionospheric Total Electron Content Measurements, *Radio Science*, vol. 33, no. 3, pp. 565-582.
- McCarthy, D. D., 1996, *IERS Conventions*, Technical Note No. 21, Observatory of Paris, Paris.
- National Aeronautics and Space Administration, NASA. <http://solarscience.msfc.nasa.gov/>
- Schaer, S., 1999, *Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System*, Ph.D dissertation, Astronomical Institute, University of Bern, Switzerland.
- Schaer, S., Beutler, G., Rothacher, M., and Springer, T. A., 1996, Daily Global Ionosphere Maps Based on GPS Carrier Phase Data Routinely Produced by the CODE Analysis Center, Proc. IGS Analysis Center Workgroup, Maryland, USA, pp. 181-192.
- Schaer, S., Gurtner, W., and Feltens, J., 1998, IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1, Proc. IGS Analysis Center Workshop, Darmstadt, Germany, pp. 233-247.
- Seeber, G., 2003, *Satellite Geodesy 2nd Edition*, Walter de Gruyter, New York.
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., and Webb, F. H., 1997, Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large network, *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, no. 3, pp. 5005-5017.