

以連續運行基站(CORS)建立城市級 電離層模型之研究-以臺中市為例

A Study of Building City-Level Ionosphere Model by Using Continuously Operating Reference Station (CORS)-A Case Study of Taichung City

高書屏¹

黃駿橙²

Szu-Pyng Kao¹

Jun-Cheng Huang²

摘要

現今地面雙頻 GNSS 觀測量已廣泛被使用來建構電離層垂直全電子含量模型，並成為研究全球或區域電離層擾動的一項重要工具。

本研究以 2013 年台中市新建的連續運行基站作為題材，以 CORS 系統之架構，針對整個台中市地區建立城市級電離層模型。最後以電離層模型做單頻單點定位測試，該模型平均提升之定位精度可達 50 至 60 %，而在短時間兩小時進行單點定位最佳提升定位精度可達 95 %。

關鍵字：連續運行基準站系統、全球定位系統、電離層、全電子含量

Abstract

Nowadays, the dual-frequency GNSS magnitude has been widely used to build up the ionospheric vertical model and become an important tool for studying global or regional ionospheric disturbances.

The study aims at the newly built Continuous Operational Reference System of Taichung city as objects, build up the city ionospheric model in Taichung area based on the CORS system. Last, perform the single-frequency point positioning test with the ionospheric model, and the average accuracy increases to 50% to 60%. While within the short 2 hours, performing the single point positioning may reach the best accuracy to 95%.

¹國立中興大學土木工程學系測量資訊組 教授

²國立中興大學土木工程學系測量資訊組 碩士

一、前言

在科技的進步下，全球定位系統(GPS)結合電腦網路及數位通訊等技術，使連續運行基準站系統(CORS)快速的發展於世界各地，並廣泛應用於各專業領域。城市級 CORS 系統可由一個主控站做為數據處理中心，藉由連續運行基站所接收衛星觀測數據，建立適合該區域的電離層誤差修正模型，提供給使用者高精度的定位服務。

本研究利用台中市新建的十站連續運行基站所提供 2013 至 2014 年部分天數的觀測資料，使用瑞士 Bern 大學所開發 Bernese 5.0 軟體，將觀測量組合為載波相位平滑化電碼，以估計硬體延遲誤差、電離層全電子含量(TEC)，由估算的電離層全電子含量(TEC)構建台中市的城市級電離層模型，並分析台灣地區電離層在四季的變化，最後以 IGS 全球電離層模型與城市級電離層模型進行單頻單點定位成果比較。

二、連續運行基站系統(CORS)

連續運行基站系統(CORS)的概念最早由美國 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的 NGS (National Geodetic Survey ,NGS)提出 (Snay et al., 2008)。如今 CORS 技術在科技的進步下逐漸成熟，利用 GPS 衛星定位技術，在一個國家、城市、地區內建立多個永久的連續運行基站，全天候接收衛星觀測資料，透過專用網路傳輸至主控站(數據處理中心)，藉由主控站進行資料處理，針對各種需求的使用者傳輸 GPS 服務項目的數據以及各種誤差修正資料。

連續運行基站網建設與應用領域廣泛，國際上主要 CORS 系統有國際全球導航衛星系統服務局（國際全球導航衛星系統服務，IGS）的全球 IGS 站網，其使用約 200 連續運行基站，並提供全球的 GPS 使用者下載 GPS 各種誤差修正資料與觀測資料，如全球電離層模型、精密星曆、快速星曆、IGS 站每日觀測資料等。並對於地球科學、氣象學、大氣及電離層之科學應用與監測分析有很大的幫助。

CORS 系統主要由基準站網、數據處理中心、數據傳輸系統、定位導航數據發射系統及使用者應用系統等五大部分組成。CORS 基本原理是利用多個連續運行基站構成一個基站網，在系統內組成差分觀測值，藉由廣域差分 GPS 和具有多個基準站的區域差分 GPS 之方法來減弱或消除各種誤差的影響，亦或是利用連續運行基站之觀測資料進行地球科學之研究，如電離層監測、監測網位移分析、大地起伏值等研究(2013,高書屏)。

三、模式化電離層模型

GPS現今以兩個不同的頻率來發射它們的訊號，每種頻率上都搭配兩種不同型態的觀測量，虛擬距離(pseudorange)與載波相位(carrier phase)，兩種觀測量可應用於不同型態的精度應用。而利用雙頻觀測量的特性可以做各種不同的線性組合(Dach, 2007)，可藉由雙頻觀測量線性組合的方式再搭配模式化公式來求得TEC含量，可藉GPS觀測資料來模式化產生電離層模型。

電離層模型的建構常用單層模型 (Klobuchar, 1987)表達。電離層分布於地表約50~1000 公里的上空，不同的高度所含有的電子量都不相同，為了方便計算將電離層模式化，假設距地表H 公里處的電子密度最大，將電離層假想為距地表H公里處的薄球殼，引入一個薄球殼模型。假設所有帶電粒子都集中在此薄球殼上，因此GPS 訊號發射至地面接收儀都會經過這個薄球殼。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1。

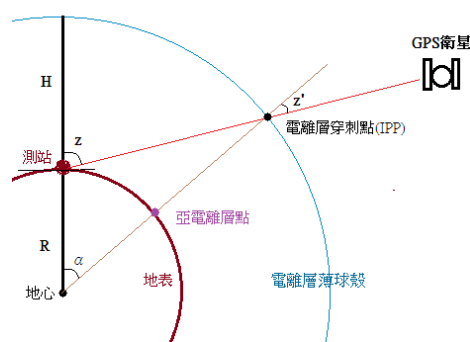


圖1 電離層單層模型圖(Schaer, 1999)

其中

z 表地面觀測衛星天頂距，

z' 表薄球殼上穿刺點觀測衛星之天頂距。

R 是地球半徑， H 為薄球殼高度。

α 為測站位置與亞電離層點位置地心夾角。

對於圖1中薄球殼高度(H)有些不同的看法，一般認為大約在距地表上方350~450公里的地方，經過精密的計算以後，Schaer採距地表上方450公里處是薄球殼為最適合高度(Schaer, 1999)。

接收GPS時可以得到原訊號傳遞路徑上傾斜全電子含量(STEC)值，為了能夠轉換到亞電離層點天頂垂直方向的VTEC，可經由映射函數將傾斜全電子含量(STEC)與垂直全電子含量(VTEC)做轉換。

接下來將VTEC進行模式化動作，本研究使用球諧函數展開式(Spherical

Harmonics Function)來模式化亞電離層點VTEC的量(Schaer,1999)，在使用球諧函數模式化VTEC時，可選擇靜態或動態的方式，靜態表示在該時段所求解的函數值都相同，動態則會以簡易的內插方式完成(Schaer,1999)。

本研究以 Bernese 5.0 軟體做為計算基礎，主要採 PPP 模組計算與估計硬體延遲誤差，並假定 IGS 發布的修正資料為已知，這些資料包括精密軌道、衛星時鐘改正、地球旋轉參數，及衛星 DCB 等，計算所需相關資料均可自 IGS 網站下載。

利用上述所提到的球諧函數之建模方式，以不同階數的組合，構建電離層誤差模型與估計電離層全電子含量(TEC)，為了能夠與 IGS 所發布的最終電離層資料作比較分析，所以將城市級電離層模型同樣以每兩小時估計一組球諧函數，最後再做單頻精密單點定位之比較分析。

四、研究方法與步驟

本研究文獻中所提到球諧函數的方式進行估算電離層全電子含量、建立城市級電離層模型，使用 2013 年台中市新建的連續運行基站的雙頻觀測資料，結合城市級 CORS 網之架構，針對電離層全電子含量與建立城市級電離層模型做探討，並以 Bernese 5.0 軟體進行資料處理與估算，由檢核站單頻觀測資料加入全球電離層模型與城市級電離層模型進行單點定位，驗證城市級電離層模型之可行性。

本研究建立城市級電離層模型的步驟：

1. 使用 2013 年新建的臺中市連續運行基站(10 站)的觀測資料，本研究主要利用 Bernese 5.0 軟體進行城市級電離層模型之估計，建立 Bernese 軟體每日工作目錄、基站座標檔，更新 Bernese 參數檔案，並由 IGS 網站下載精密星曆、全球電離層模型、衛星資訊檔、衛星軌道參數、接收儀資訊參數檔、天線盤相位中心改正參數，完成資料前置作業。
2. 為了能夠達到 CORS 系統自動化數據處理與解算之功能，使用 Bernese 5.0 軟體的自動化 PPP 模組進行修改，使資料預處理(組成相位平滑化電碼、各修正參數檔轉換為 Bernese 格式)能夠自動化快速進行，並估算電離層全電子含量(TEC)、各站硬體延遲誤差，最後構建城市級電離層模型。
3. 利用不同階數的球諧函數，估計電離層 TEC 值，並分析電離層變化，將 IGS 所發佈的最終電離層(TEC)值與估計電離層 TEC 值進行比較及分析，探討台灣地區電離層在四季的變化。
4. 用檢核點的觀測資料加入城市級電離層改正模型、IGS 全球電離層改正模型做單頻單點定位成果分析比較。

五、研究成果與分析

為證明估計的電離層全電子含量(TEC)與城市級電離層模型是可行的，藉由上述的研究流程進行實驗，利用不同階數的球諧函數與 2013 年至 2014 年台中市連續運行基站(10 站)的觀測資料進行電離層之研究。在確定所選用的球諧階數後，以每兩小時估計一組電離層 TEC 值與 IGS 發布的電離層資料做比較，選擇相同的電離層穿刺點(120E,22.5N)進行比較分析，探討電離層日夜變化與季節性影響。

(一) 利用不同階數之球諧函數進行電離層 TEC 估計之成果

本研究以不同階數的球諧函數估計電離層 TEC 值，利用分布於台中市的連續運行基站所接收的雙頻觀測資料(2013/08/29)，以 30 秒為一筆的觀測資料，並估計每兩小時一筆的電離層的變化，分別使用 1×1 至 8×8 的球諧階數，選定穿刺點為(120E,22.5N)，將估計之電離層 TEC 值與 IGS 提供的最終電離層 TEC 做比較。

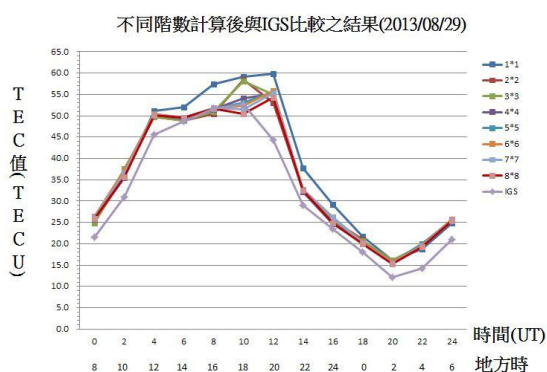


圖 2 不同球諧階數各時段與 IGS 比較之成果圖

表 1 不同球諧階數所估算的電離層全電子含量(TEC)

2013/08/29 不同球諧階數所估算電離層 TEC 值與 IGS 提供的最終電離層 TEC (單位：TECU)													
	0h	2h	4h	6h	8h	10h	12h	14h	16h	18h	20h	22h	24h
1*1	25.8	35.4	51.1	52.1	57.5	59.1	59.9	37.8	29.2	21.8	16.2	18.7	24.8
2*2	25.0	36.4	49.8	48.8	50.5	58.4	53.0	32.5	25.6	21.0	15.7	19.9	25.3
3*3	24.8	37.5	49.8	48.8	51.0	58.2	54.9	32.6	25.7	20.6	16.1	19.7	25.7
4*4	25.8	36.6	50.3	49.3	51.5	54.1	55.1	32.1	24.6	20.3	15.7	19.6	25.6
5*5	26.1	37.2	50.4	49.4	51.6	53.1	55.7	32.5	25.0	20.3	15.7	19.9	25.6
6*6	26.4	37.2	50.5	49.6	51.7	52.3	55.9	32.7	26.2	20.4	15.7	19.7	25.8
7*7	26.3	36.6	50.3	49.6	51.8	51.5	55.3	32.7	26.2	20.2	15.5	19.5	25.6
8*8	25.9	35.6	50.1	49.5	51.7	50.5	54.3	32.5	24.8	20.0	15.3	19.2	25.4
IGS	21.5	31.0	45.5	48.7	51.6	52.7	44.3	29.1	23.4	18.1	12.1	14.2	21.0

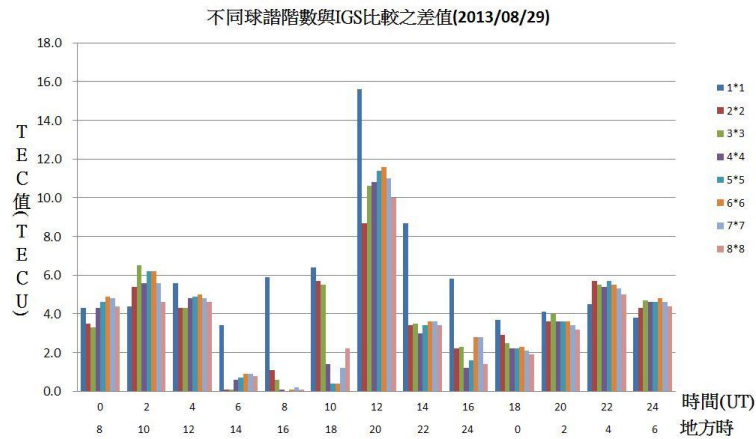


表 2 不同球諧階數各時段與 IGS 之差值

2013/08/29 不同球諧階數各時段與 IGS 比較之差值(單位：TECU)													
	0h	2h	4h	6h	8h	10h	12h	14h	16h	18h	20h	22h	24h
1*1	4.3	4.4	5.6	3.4	5.9	6.4	15.6	8.7	5.8	3.7	4.1	4.5	3.8
2*2	3.5	5.4	4.3	0.1	1.1	5.7	8.7	3.4	2.2	2.9	3.6	5.7	4.3
3*3	3.3	6.5	4.3	0.1	0.6	5.5	10.6	3.5	2.3	2.5	4.0	5.5	4.7
4*4	4.3	5.6	4.8	0.6	0.1	1.4	10.8	3.0	1.2	2.2	3.6	5.4	4.6
5*5	4.6	6.2	4.9	0.7	0.0	0.4	11.4	3.4	1.6	2.2	3.6	5.7	4.6
6*6	4.9	6.2	5.0	0.9	0.1	0.4	11.6	3.6	2.8	2.3	3.6	5.5	4.8
7*7	4.8	5.6	4.8	0.9	0.2	1.2	11.0	3.6	2.8	2.1	3.4	5.3	4.6
8*8	4.4	4.6	4.6	0.8	0.1	2.2	10.0	3.4	1.4	1.9	3.2	5.0	4.4

本次實驗藉由每日 TEC 值之變化，可知台灣地區在地方時 14~16 點(UT6~8 時)為 TEC 高峰時刻，此時的電離層活動非常劇烈，從分析的結果顯示：雖然在電離層活動非常劇烈時所估計之電離層 TEC 值與 IGS 電離層 TEC 值有所差異，但可以明顯的看出兩者的變化趨勢是相同的，並經由文獻中提到由於 2013 年為太陽黑子活動的高峰期，所以太陽活動也會非常活躍。

利用一日電離層 TEC 的比較發現，台灣地區在地方時 0~4 點(UT18~22 時)時為 TEC 差異最小的時段，此時的電離活動非常平靜，使用不同的球諧階數進行估算 TEC，而一階、二階球諧函數所估計出的 TEC 值明顯與 IGS 之 TEC 值有差異，在電離層活躍時段所估計之 TEC 值之差異也比其他階數高，經由比較不同的球諧階數發現，當選用的球諧階數越高所估算的 TEC 值會比較穩定。

根據地區的大小及站數的多寡亦會影響球諧階數的選擇，而對於台中市的範圍及分布的 10 個連續運行基站而言，在使用五階以上的球諧函數，其所估算出來的 TEC 值不會有太大的變化，故本研究後續皆以 5×5 的球諧函數進行季節分析與探討。

(二) 電離層受季節影響之分析

使用球諧函數五階(order)五次(degree)進行估計電離層全電子含量(TEC)，並以 2013 年夏至(6/20-6/24)、秋分(9/20~9/25)、冬至(12/21~12/25)及 2014 年春分(3/18~3/23)，探討電離層的季節性的變化，並以 IGS 提供的最終電離層進行比較分析。分析成果如下圖 3。

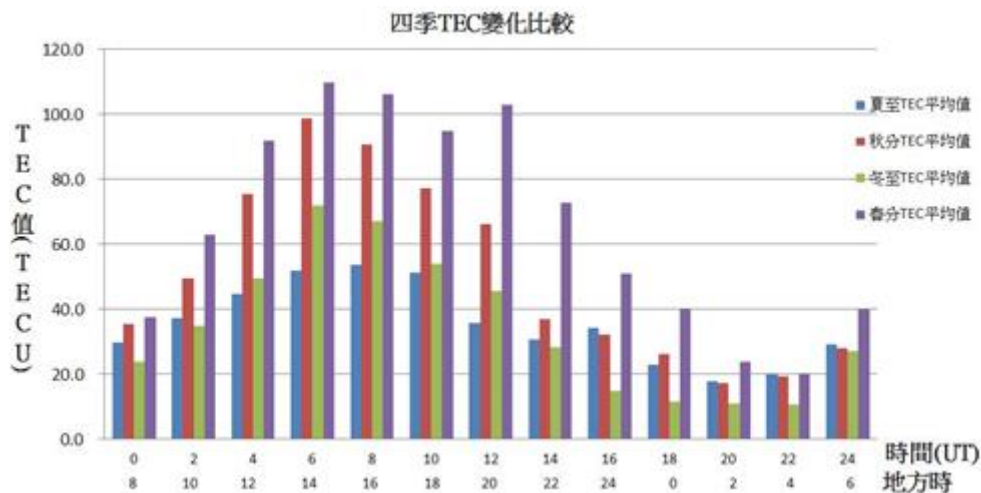


圖 3 四季電離層 TEC 變化圖

經由文獻中提到 2013 年為太陽黑子活動的高峰期，雖然在電離層活動非常劇烈時所估計之電離層 TEC 值與 IGS 電離層 TEC 值有所差異，經比較後可知當台灣冬季時白天的 TEC 值會比夏季時高，此為冬季異常的現象(蔡和芳,1999)，而此現象會發生於日間，在夜間則不明顯。

以 2013 年 6 月至 2014 年三月之各季節 TEC 比較後可知：在春、秋兩季的 TEC 值會達到高峰，這是因為季節性的影響因素，造成春、秋兩季電離層活動較為活躍，而在三月份的電離層全電子含量為最高。

此外，夏季的 TEC 高峰值大約會比其他季節晚兩小時，約為下午四點左右，而春、冬季兩季則會發生在下午兩點左右，因為在夏季時太陽位置在北回歸線，白晝時間也較長，位於北半球的台灣上空受太陽正射，使電離層被電離且累積效應較長，造成日變化的電離子含量峰值會比其他季節晚出現(韓玲,2006)

(三) 單頻單點定位測試

用台中市 CORS 網中的三站檢核點進行單點定位測試，以下列四種情形，比較城市級電離層模型與全球電離層模型所能提升之精度：使用雙頻無電離層線性組合(L3)、使用單頻 L1 觀測量(C/A-code)、使用單頻 L1 觀測量+全球電離層模型、使用單頻 L1 觀測量+城市級電離層模型。

選用 2013 年(8/28~8/31) 連續四天的觀測資料，用每日的觀測資料做單點定位做電離層模型比較，當使用雙頻無電離層線性組合(L3)之觀測量進行定位求解時，可直接消除電離層一階項誤差，可大幅降低電離層對於單點定位之影響，所以我們以雙頻無電離層線性組合(L3)為所求得定位座標為真值，同時利用單頻 L1 觀測量與加入電離層模型的單頻 L1 觀測量進行單點定位，比較在不同的情況下所提升的相對精度。

表 3 連續四天單點定位平均值比較之成果

2013/08/28~08/31 連續四天誤差平均值比較之成果 (單位：m)					
改正模式	站名	ΔX	ΔY	ΔZ	$\Delta D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$
使用單頻 L1 觀測量 (不加入電離層誤差修正)	GS23	-8.208	3.736	5.348	10.532
	GS37	-7.319	4.459	5.595	10.538
	GS38	-8.319	5.079	6.209	11.663
使用單頻 L1 觀測量 (加入全球電離層模型)	GS23	-5.081	-1.247	0.610	5.296
	GS37	-4.230	-0.460	0.814	4.842
	GS38	-5.168	0.109	1.410	5.540
使用單頻 L1 觀測量 (加入城市級電離層模型)	GS23	-3.745	-0.681	-0.112	4.295
	GS37	-0.969	-2.724	-1.286	5.573
	GS38	-5.515	0.738	-0.219	5.659

表 4 相對提升精度之成果

2013/08/28~08/31 連續四天平均值比較之相對提升精度之成果		
改正模式	站名	相對提升精度%
使用單頻 L1 觀測量 (加入全球電離層模型)	GS23	50
	GS37	54
	GS38	52
使用單頻 L1 觀測量 (加入城市級電離層模型)	GS23	59
	GS37	47
	GS38	51

使用連續四天長時間的電離層延遲誤差平均值進行比較分析，由表 3、4 所示，使用單頻 L1 觀測量不加入電離層模型時，其定位誤差平均值為 11 公尺，當加入了 IGS 的全球電離層模型時，定位誤差平均值約為 5 公尺，相對提升了約 52%的定位精度，而加入了城市級電離層模型時，相對提升了約 52%的定位精度，兩者之間差異不大。

從每日的單點定位比較分析可發現，全球電離層模型對於每一站所提升的精

度都很均勻，但由於全球電離層模型之解析度較低，對於台灣地區的單頻接收儀的使用者仍無法達到更高精度的定位，其所能提升的精度以受限，但其使用的永久連續運行基站觀測資料品質與考量因素都很完善，且對於觀測資料之品質、設站位置、環境因素皆有很周全的考量，使該模型即使無法很精細的修正電離層延遲之影響，但仍能達到一定的精度等級。

而台灣位於中低緯度地區，尤其是當發生太陽活動不穩定時、太陽活動高峰期、電離層暴現象、地磁活動等，在長時間的情況下可能影響估算電離層全電子含量的精度，使後續利用城市級電離層模型加入單頻定位的解算分析實驗中只能達到公尺級的定位精度。

利用短時間兩小時做單點定位分析，如下表 5、7 所示，在電離層活動較為平穩的時段(上午 8 至 10 點) 加入了 IGS 的全球電離層模型時，平均提升了約 46 % 的定位精度；而加入了城市級電離層模型時，平均提升了約 54 % 的定位精度，如下表 6 所示。而在電離層活動較為劇烈的時段(下午 2 至 4 點)加入了 IGS 的全球電離層模型時，平均提升了約 32 % 的定位精度，加入城市級電離層模型時，平均提升了約 51 % 的定位精度，如下表 8 所示。當電離層活動較為平穩的時段使用城市級電離層模型所得最佳成果可提升 86 %，而電離層活動較為劇烈的時段使用城市級電離層模型所得最佳成果可提升 95 %。

表 5 連續三天短時間單點定位誤差平均值比較之成果(上午 8 點至 10 點)

2013/08/28~08/30 短時間單點定位誤差平均值比較之成果(單位：m)					
改正模式	站名	ΔX	ΔY	ΔZ	$\Delta D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$
使用單頻 L1 觀測量 (不加入電離層誤差修正)	GS23	-4.975	12.135	10.301	16.824
	GS37	-9.530	15.371	6.413	20.214
	GS38	-4.931	11.657	10.291	16.453
使用單頻 L1 觀測量 (加入全球電離層模型)	GS23	-3.085	6.791	2.564	7.969
	GS37	-7.793	10.269	-1.398	13.616
	GS38	-3.028	6.346	2.455	7.530
使用單頻 L1 觀測量 (加入城市級電離層模型)	GS23	-0.591	0.095	-3.231	5.926
	GS37	-5.098	3.513	-6.852	13.821
	GS38	-0.631	-0.038	-2.986	5.597

表 6 連續三天短時間單點定位相對提升精度之成果(上午 8 點至 10 點)

2013/08/28~08/30 三天誤差平均值比較之相對提升精度之成果		
改正模式	站名	相對提升精度(%)
使用單頻 L1 觀測量 (加入全球電離層模型)	GS23	53
	GS37	33
	GS38	54
使用單頻 L1 觀測量 (加入城市級電離層模型)	GS23	65
	GS37	32
	GS38	66

表 7 連續三天短時間單點定位誤差平均值比較之成果(下午 2 點至 4 點)

2013/08/28~08/30 短時間單點定位誤差平均值比較之成果(單位：m)					
改正模式	站名	ΔX	ΔY	ΔZ	$\Delta D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$
使用單頻 L1 觀測量 (不加入電離層誤差修正)	GS23	-18.294	1.053	6.596	20.580
	GS37	-8.020	3.281	7.063	11.622
	GS38	-12.155	2.306	5.248	14.593
使用單頻 L1 觀測量 (加入全球電離層模型)	GS23	-15.168	-1.571	3.413	16.103
	GS37	-4.982	0.666	3.859	6.691
	GS38	-9.138	-0.313	2.050	9.980
使用單頻 L1 觀測量 (加入城市級電離層模型)	GS23	-10.972	-2.936	0.421	12.195
	GS37	-1.632	-0.698	1.047	4.198
	GS38	-5.812	-1.689	-0.817	7.485

表 8 連續三天短時間單點定位相對提升精度之成果(下午 2 點至 4 點)

2013/08/28~08/30 三天誤差平均值比較之相對提升精度之成果		
改正模式	站名	相對提升精度(%)
使用單頻 L1 觀測量 (加入全球電離層模型)	GS23	22
	GS37	42
	GS38	32
使用單頻 L1 觀測量 (加入城市級電離層模型)	GS23	41
	GS37	64
	GS38	49

六、結論

本次實驗藉由 TEC 值之變化，可知台灣地區在地方時 14~16 點為 TEC 高峰時刻，此時電離層活動非常劇烈，而地方時 0~4 點為 TEC 差異最小的時段，此時電離層活動非常平靜。雖然在電離層活動非常劇烈時所估計之電離層 TEC 值與 IGS 電離層 TEC 值有所差異，但可以明顯看出兩者的變化趨勢是相同。使用不同的球諧階數進行估算 TEC，當選用的球諧階數越高所估算的 TEC 值會比較穩定，根據地區的大小及站數的多寡亦會影響球諧階數的選擇。

探討電離層的季節性變化，經比較後可知當台灣冬季時白天的 TEC 值會比夏季時高，此為冬季異常的現象，而此現象會發生於日間。在春、秋兩季的 TEC 值會達到高峰，這是因為季節性的影響因素，造成春、秋兩季電離層活動較為活躍。此外夏季的 TEC 高峰值大約會比其他季節晚兩小時，約為下午四點左右，而春、冬季兩季則會發生在下午兩點左右。

使用四天的電離層延遲誤差平均值進行比較分析，受到電離層延遲影響約 11 公尺，當加入 IGS 的全球電離層模型時，電離層延遲影響約 5 公尺，相對提升了約 52% 的定位精度，而加入城市級電離層模型時，電離層延遲影響約 5 公尺，相對提升了約 52% 的定位精度。短時間兩小時做單點定位分析，在電離層活動較為平穩的時段(上午 8 至 10 點) 加入電離層模型，可知城市級電離層模型比 IGS 的全球電離層模型更能提升 8% 的定位精度。而在電離層活動較為劇烈的時段(下午 2 至 4 點)時加入全球電離層模型時，可知城市級電離層模型比 IGS 全球電離層模型更能提升 19% 的定位精度。

七、參考文獻

1. 孫翊騰(2010)，適用於電離層高活動期間之現代化 GPS 長基線算法，國立成功大學碩士論文。
2. 涂裕民(2013)，GPS 接收儀硬體延遲偏差與低緯地區電離層模型研究，國立中興大學土木工程學系博士論文。
3. 彭德熙(2008)，台灣區域性電離層模型之估計-應用於單頻精密單點定位，國立成功大學碩士論文。
4. 葉欣豪(2013)利用最小二乘支持向量機進行電離層全電子含量預報之研究，國立中興大學土木工程學系碩士論文。
5. 高書屏、涂裕民、陳弘農(2013)，大臺中市連續運行基準站系統(CORS)之建置與市政應用-三維數位智慧城市之基石，臺中市政府 102 年度獎助市政建設研究論文選集，P31-56。
6. Seeber,G.(1993).Satellite Geodesy.Walter de Gruyter，Berlin。
7. Kao, Szu-Pyng, Yao-Chung Chen, and Fang-Shii Ning. "A MARS-based method for estimating regional 2-D ionospheric VTEC and receiver differential code bias." *Advances in Space Research* 53.2 (2014): 190-200