

第肆章 構建網格式區域電離層模型

本研究係以 TEC 預估值殘差來評估區域電離層模型的效能，故首先定義 TEC 預估值殘差。然後以 91 年 4 月 5 日~14 日計 10 天，台南縣白河鎮 S804、R096、PH19 測站觀測資料作測試，比較 UNSW 網格式演算法和傳統網格式演算法在構建台灣地區的電離層模型之適用性，及比較各種網格式大小所構建的區域電離層模型之效能。

在考量網格式電離層模型的精度及電離層模型檔案大小等條件下，求得適合台灣地區即時的電離層模型之較佳網格式大小。最後，藉由計算參考站 IPP 之地理經緯度範圍，探討使用那些內政部衛星追蹤站之 GPS 觀測資料，便可有效建立台灣地區即時的區域電離層模型。

第一節 UNSW 網格式演算法與傳統式網格式演算法之比較

一、TEC 預估值殘差之定義

用網格式演算法構建即時的區域電離層模型，須在一特定區域內佈置數個參考站 (Reference Stations)，而「參考站」用雙頻 GPS 觀測量估算各電離層穿透點(IPP)之 TEC，再用網格式演算法構建區域電離層模型。至於「使用者測站」則為模擬單頻接收儀的測站 (使用者的角色)，但該測站亦使用雙頻 GPS 接收機，故可直接計算對應該測站各 IPP 的 TEC 值(實測值)；另一方面，也可根據所構建的區域電離層模型，預估對應該測站各 IPP 的 TEC 值(估計值)。因此，「TEC 預估值殘差」(TEC prediction residual)定義為，對應使用者之各 IPP「實測」TEC 值減「估計」TEC 值。

本研究有關區域電離層模型的效能，係以 TEC 預估值殘差作為評估優劣的依據。換言之，比較 UNSW 網格式演算法和傳統網格式演算法的效能，及比較各種網格式大小所構建之區域電離層模型的效能，係根據 TEC 預估值殘差的標準差大小來判斷，若標準差較小，則視該演算法或網格式大小的效能較佳。

二、實驗結果

本節實驗以91年4月5日~14日計10天，台南縣白河鎮S804、R096、PH19測站觀測資料，先以第三章介紹的修正的單站演算法估計參考站之差分延遲，再加上美國JPL機構估計之GPS衛星差分延遲。然後採用POSTEC軟體（執行表3-2之Program 4~Program 9）來構建網格式電離層模型，而「網格式大小固定採用 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 」（Program 6、Program 7需配合修正），再以UNSW網格式演算法和傳統網格式演算法求得之「TEC預估值殘差」的平均值和標準差作比較，以評估兩種網格式演算法，在構建台灣地區的電離層模型之效能，其實驗結果如表4-1~表4-3，圖4-1~圖4-6。

此外，本節實驗將S804、R096、PH19三個測站，輪流以其中二個測站作「參考站」，另一個測站作「使用者」。其中，參考站的角色為利用雙頻GPS觀測資料構建即時的區域電離層模型，再由使用者利用區域電離層模型的網格式節點資料，內插出預估對應該測站各IPP的TEC值(估計值)。但因S804、R096、PH19三個測站皆使用雙頻GPS接收機，故可直接計算對應該測站各IPP的TEC值(實測值)，進而求得TEC預估值殘差。

本節圖表中，Conv. 和 UNSW，分別代表「傳統的網格式演算法」和「UNSW網格式演算法」；且均不列第一天的成果，因為從第二天開始才能應用UNSW網格式演算法。另外，「Impro. (%)」數值定義為 $[(\text{Conv.} - \text{UNSW}) / \text{Conv.}] \times 100\%$ ；其中，Conv. 和 UNSW，分別代表「傳統的網格式演算法之TEC預估值殘差標準差」和「UNSW網格式演算法之TEC預估值殘差標準差」。

表 4-1 91 年 4 月 6 日~14 日，使用者測站為 S804，以 UNSW 和 Conv.

求得 TEC 預估值殘差之平均值和標準差的比較（單位：TECU）

項目 \ 日期		6	7	8	9	10	11	12	13	14	平均值
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	平均值
平均值	Conv.	0.320	0.362	0.437	0.382	0.556	0.752	1.037	1.403	0.853	0.68±0.37
	UNSW	0.335	0.483	0.497	0.591	0.689	0.906	0.924	1.295	0.784	0.72±0.29
標準差	Conv.	1.414	1.544	1.928	1.890	1.616	1.779	1.799	3.125	2.138	1.91±0.50
	UNSW	1.309	1.329	1.659	1.113	1.082	1.169	1.121	3.008	1.648	1.49±0.61
	Impro.(%)	7.4	13.9	14.0	41.1	33.0	34.3	37.7	3.7	22.9	23.12±13.92

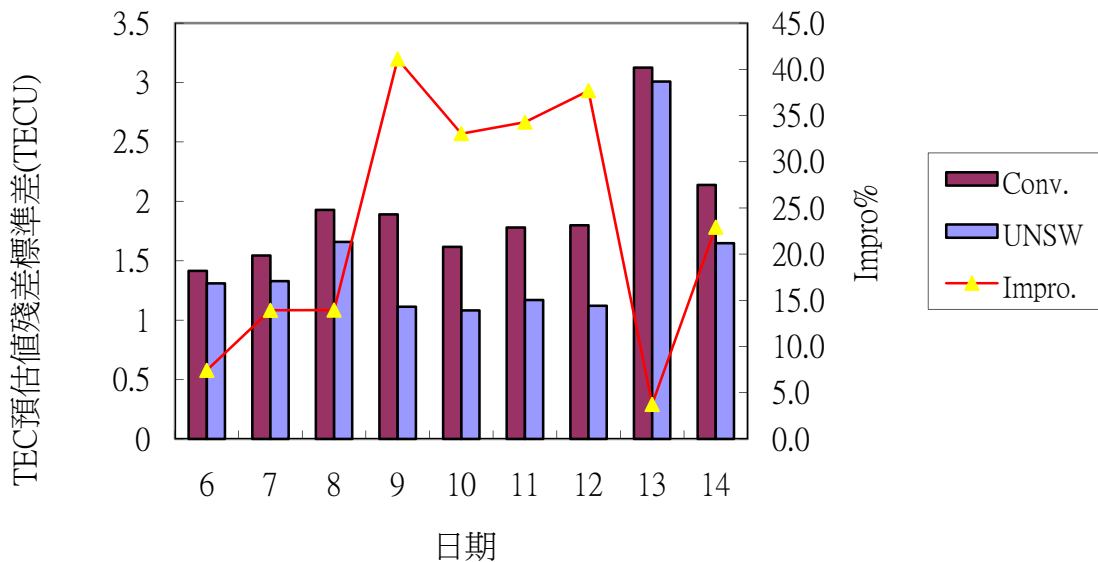


圖 4-1 91 年 4 月 6 日~14 日，使用者測站為 S804，以 UNSW 和

Conv.求得 TEC 預估值殘差之標準差及 Impro(%)值的比較

表 4-2 91 年 4 月 6 日~14 日，使用者測站為 R096，以 UNSW 和 Conv.

求得 TEC 預估值殘差之平均值和標準差的比較 (單位: TECU)

項目 \ 日期		6	7	8	9	10	11	12	13	14	平均值
		平均	Conv.	-0.976	-0.947	-1.027	-1.154	-0.786	-0.793	-0.894	-0.765
值	UNSW	-0.958	-0.821	-0.965	-0.958	-0.706	-0.728	-1.009	-0.869	-0.906	-0.88±0.11
標準差	Conv.	1.706	1.813	2.334	2.398	1.755	1.733	1.889	3.333	2.210	2.13±0.52
	UNSW	1.589	1.448	2.032	1.585	1.336	1.144	1.371	3.360	1.753	1.74±0.66
	Impro.(%)	6.9	20.1	12.9	33.9	23.9	34.0	27.4	-0.8	20.7	19.89±11.81

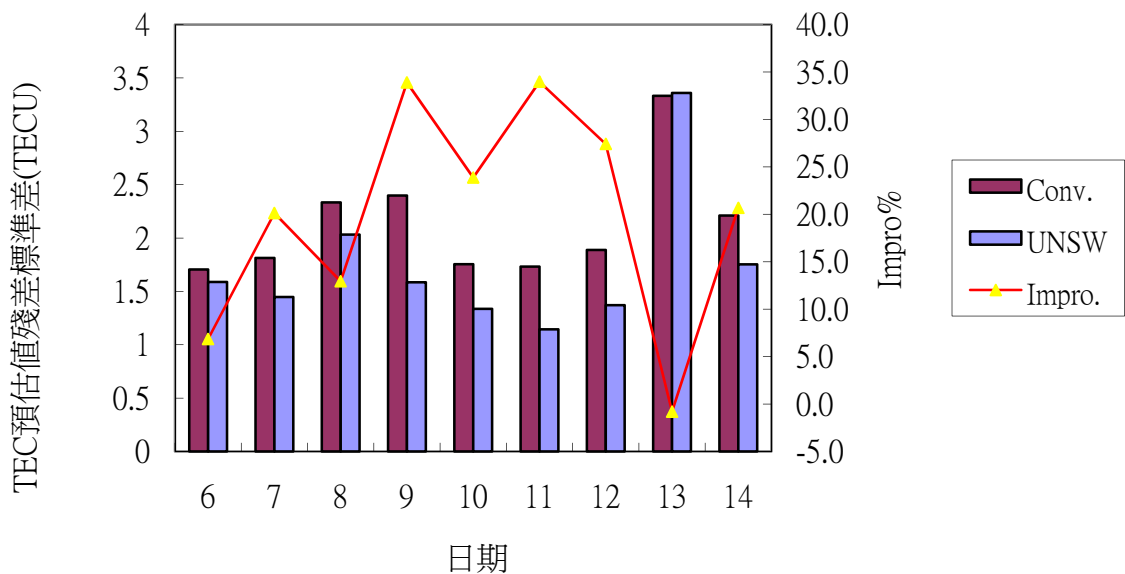


圖 4-2 91 年 4 月 6 日~14 日, 使用者測站為 R096, 以 UNSW 和 Conv.求得 TEC 預估值殘差之標準差及 Impro(%)值的比較

表 4-3 91 年 4 月 6 日~14 日, 使用者測站為 PH19, 以 UNSW 和 Conv.求得 TEC 預估值殘差之平均值和標準差的比較 (單位: TECU)

項目 \ 日期		6	7	8	9	10	11	12	13	14	平均值
		平均	Conv.	0.761	0.393	0.494	0.13	-0.147	-0.349	-0.02	0.062
值	UNSW	0.791	0.505	0.529	0.376	0.018	-0.191	0.171	-0.053	0.077	0.25±0.32
標準差	Conv.	1.788	1.991	2.899	2.312	1.679	1.637	1.551	2.659	2.560	2.12±0.50
	UNSW	1.731	1.857	2.759	1.444	1.244	1.094	1.044	2.572	2.100	1.76±0.62
	Impro.(%)	3.2	6.7	4.8	37.5	25.9	33.2	32.7	3.3	18.0	18.37±14.26

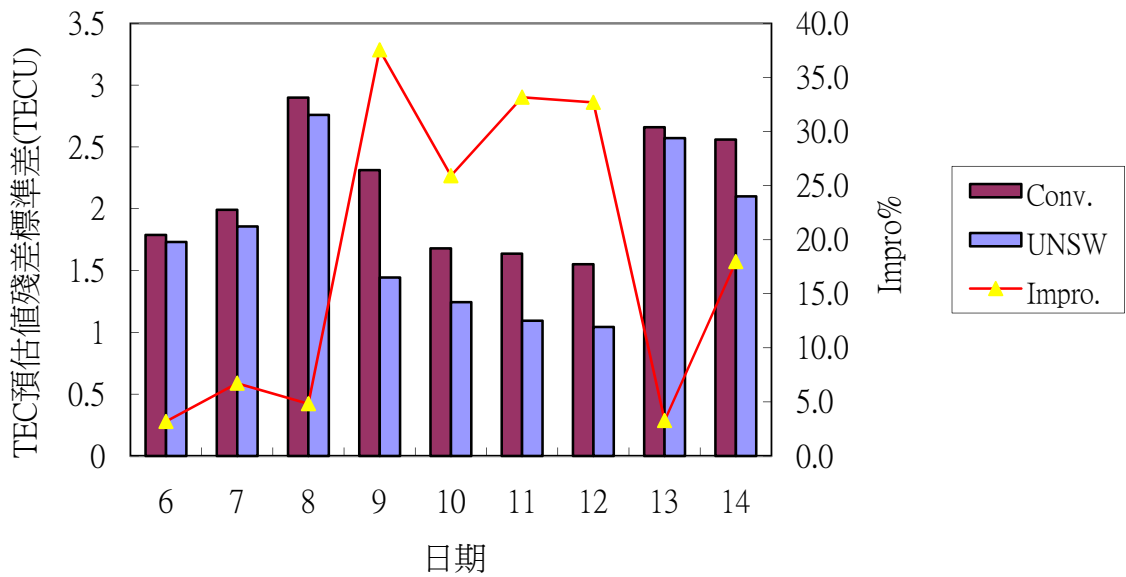


圖 4-3 91 年 4 月 6 日~14 日，使用者測站為 PH19，以 UNSW 和 Conv.求得 TEC 預估值殘差之標準差及 Impro(%)值的比較

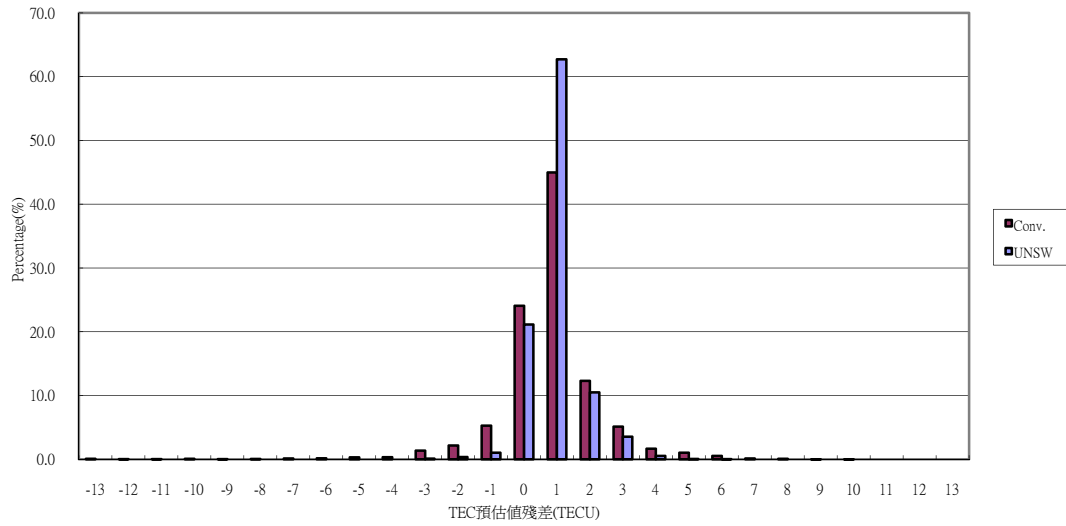


圖 4-4 91 年 4 月 11 日，使用者測站為 S804，以 UNSW 和 Conv.求得 TEC 預估值殘差分佈圖的比較

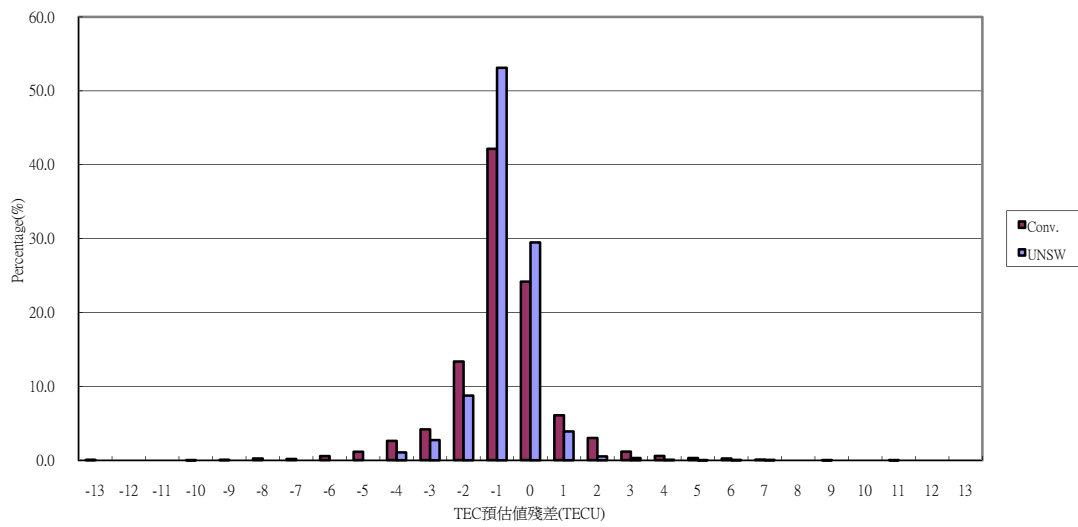


圖 4-5 91 年 4 月 11 日，使用者測站為 R096，以 UNSW 和 Conv.求得 TEC 預估值殘差分佈圖的比較

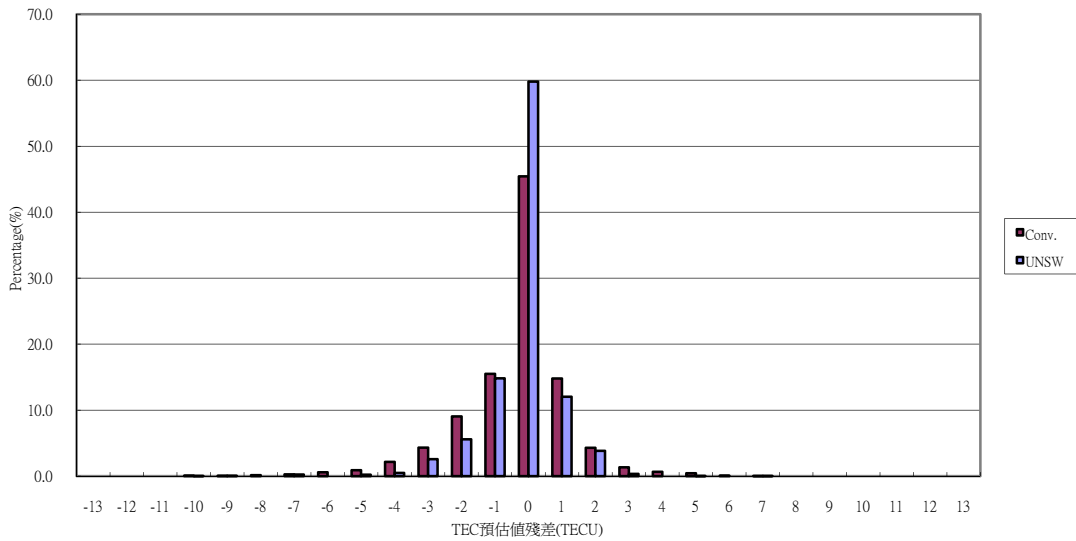


圖 4-6 91 年 4 月 11 日，使用者測站為 PH19，以 UNSW 和 Conv.求得 TEC 預估值殘差分佈圖的比較

三、實驗結論

- (一)由表 4-1~表 4-3、圖 4-1~4-3 可知，使用「UNSW 網格式演算法」之 TEC 預估值殘差的標準差，皆較使用「傳統的網格式演算法」為小。而且，在 S804 測站資料，UNSW 網格式演算法之 TEC 預估值殘差的標準差，較傳統的網格式演算法大約減少 23%；在 R096 測站資料，大約減少 20%；在 PH19 測站資料，大約減少 18%。
- (二)由圖 4-4~4-6 顯示，使用「UNSW 網格式演算法」之 TEC 預估值殘差的常態分布情形較「傳統的網格式演算法」為佳。
- (三)綜上所述，UNSW 網格式演算法在構建台灣地區的電離層模型，其效能較傳統的網格式演算法為佳，故本研究採用 UNSW 網格式演算法來模擬構建台灣地區的電離層模型。

第二節 決定區域電離層模型之網格式大小

一、實驗結果

本節實驗以 91 年 4 月 5 日~14 日計 10 天，台南縣白河鎮 S804、R096、

5°×5°	2.800	2.425	3.699	2.643	1.814	1.736	1.331	3.680	3.221	2.594	0.852
4°×4°	2.092	1.703	2.908	1.793	1.402	1.410	1.187	3.417	2.152	2.007	0.738
3°×3°	1.477	1.432	2.116	1.084	1.207	1.207	1.130	3.272	1.877	1.645	0.704
2°×2°	1.309	1.329	1.659	1.113	1.082	1.169	1.121	3.008	1.648	1.493	0.609

表 4-4 91 年 4 月 6 日~14 日，使用者測站為 S804，四種
網格大小之 TEC 預估值殘差標準差（單位：TECU）

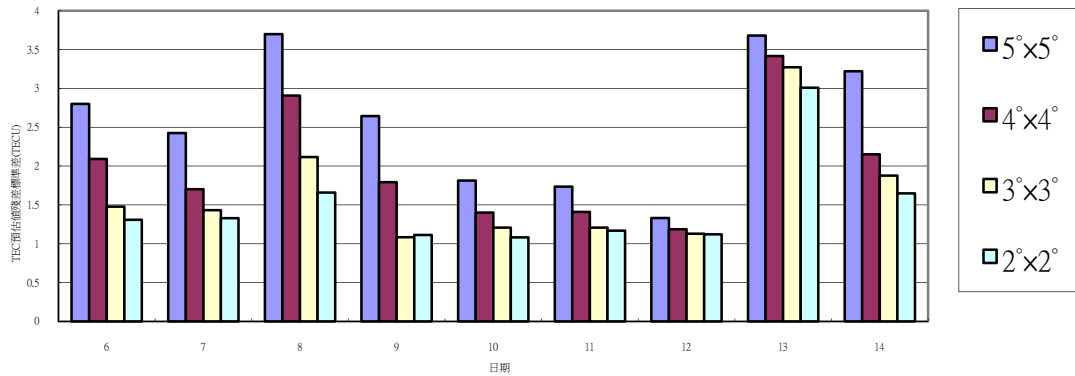


圖 4-7 91 年 4 月 6 日~14 日，使用者測站為 S804，四種
網格大小之 TEC 預估值殘差標準差的比較

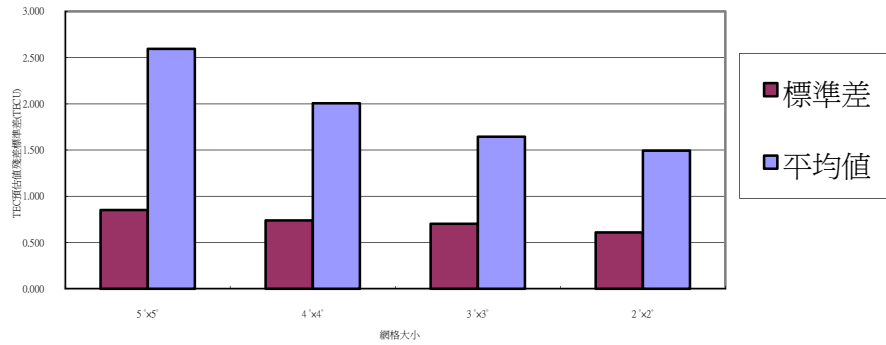


圖 4-8 91 年 4 月 6 日~14 日，使用者測站為 S804，四種網格大小
之 TEC 預估值殘差標準差之平均值與標準差的比較

表 4-5 91 年 4 月 6 日~14 日，使用者測站為 R096，四種
網格大小之 TEC 預估值殘差標準差（單位：TECU）

日期	6	7	8	9	10	11	12	13	14	平均值	標準差
網格											

大小												
5°×5°	2.939	3.222	3.643	3.780	2.091	1.886	1.769	4.326	3.863	3.058	0.944	
4°×4°	2.325	1.873	2.852	2.486	1.660	1.533	1.526	4.051	2.849	2.351	0.826	
3°×3°	1.888	1.567	2.325	1.729	1.400	1.292	1.404	3.691	2.043	1.927	0.742	
2°×2°	1.589	1.448	2.032	1.585	1.336	1.144	1.371	3.360	1.753	1.735	0.661	

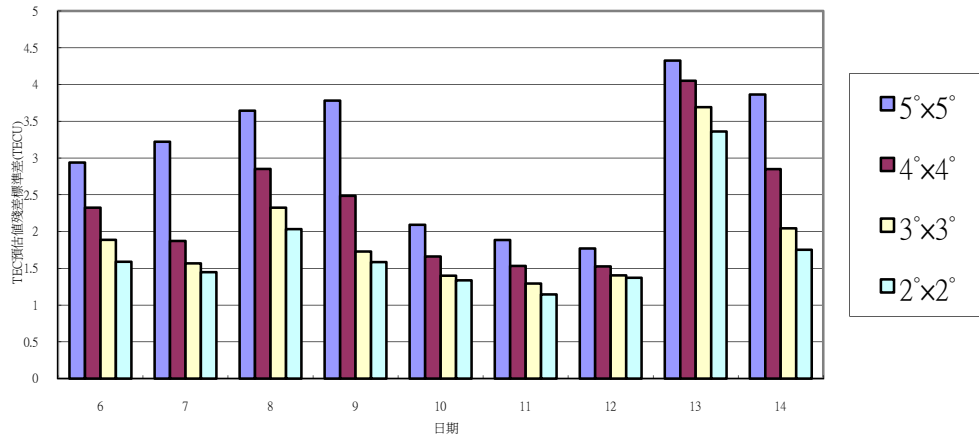


圖 4-9 91 年 4 月 6 日~14 日，使用者測站為 R096，四種網格大小之 TEC 預估值殘差標準差的比較

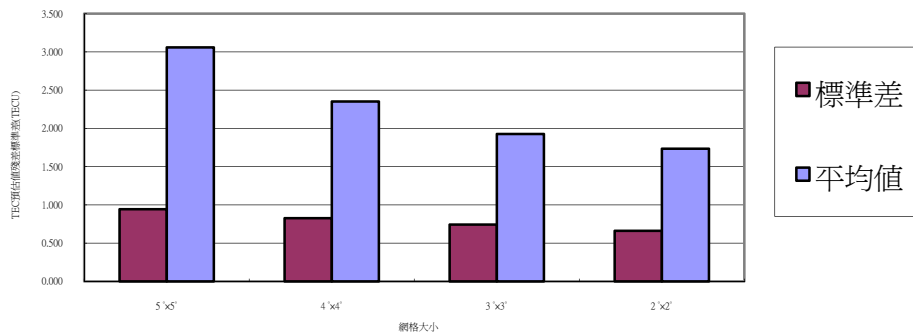


圖 4-10 91 年 4 月 6 日~14 日，使用者測站為 R096，四種網格大小之 TEC 預估值殘差標準差之平均值與標準差的比較

表 4-6 91 年 4 月 6 日~14 日，使用者測站為 PH19，四種網格大小之 TEC 預估值殘差標準差（單位：TECU）

日期	6	7	8	9	10	11	12	13	14	平均值	標準差
網格											

大小											
5°×5°	3.013	3.109	3.846	2.965	2.261	1.969	1.283	3.547	3.794	2.865	0.870
4°×4°	2.249	2.015	3.485	1.977	1.597	1.553	1.222	3.224	3.177	2.278	0.823
3°×3°	1.920	2.099	3.172	1.507	1.381	1.328	1.063	2.832	2.200	1.945	0.712
2°×2°	1.731	1.857	2.759	1.444	1.244	1.094	1.044	2.572	2.100	1.761	0.623

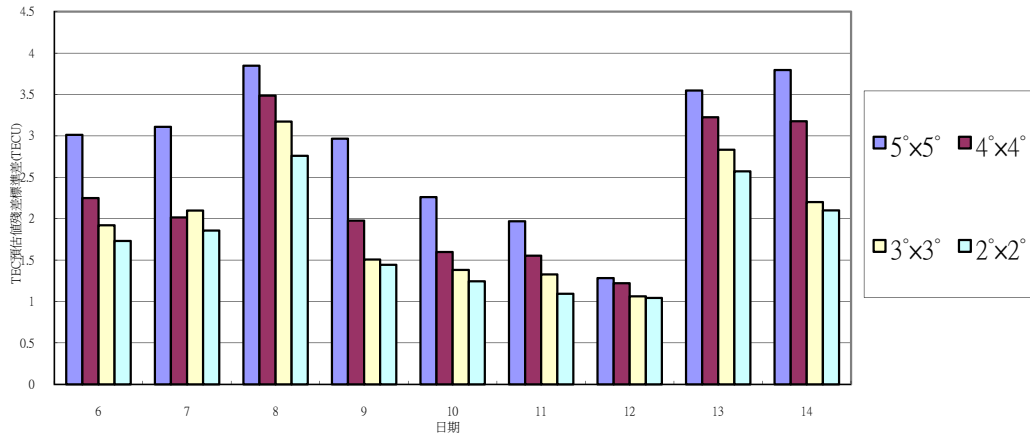


圖 4-11 91 年 4 月 6 日~14 日，使用者測站為 PH19，四種網格大小之 TEC 預估值殘差標準差的比較

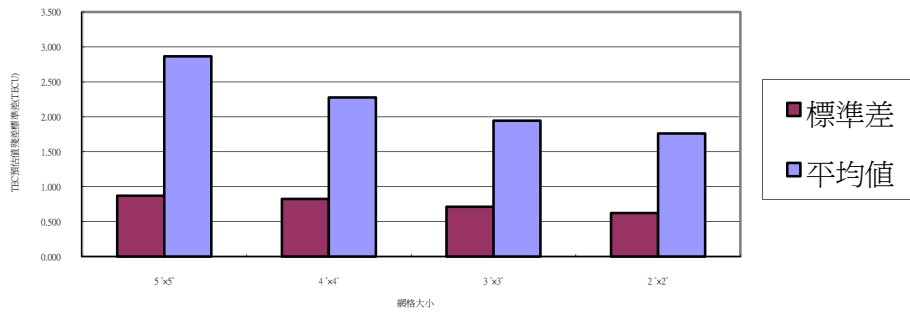


圖 4-12 91 年 4 月 6 日~14 日，使用者測站為 PH19，四種網格大小之 TEC 預估值殘差標準差之平均值與標準差的比較

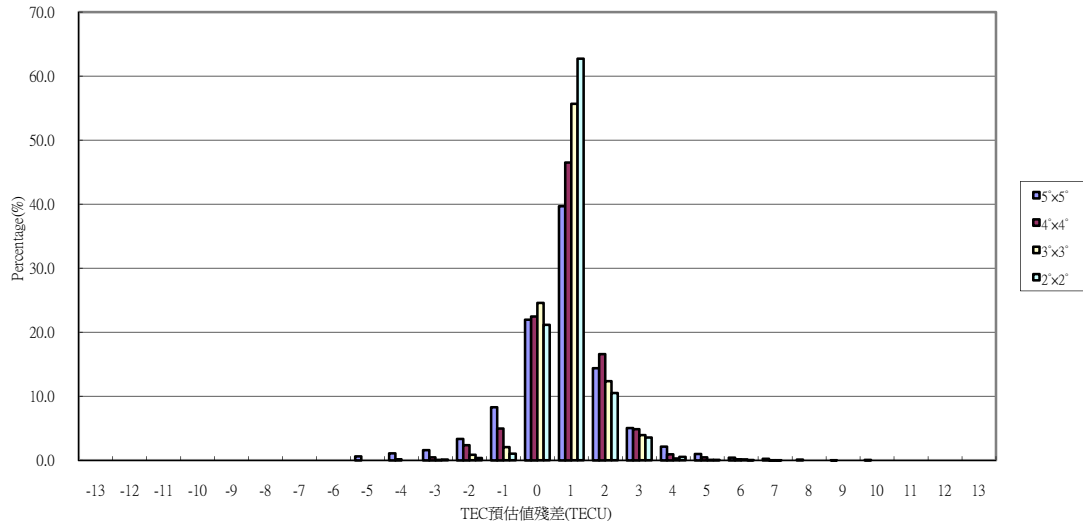


圖 4-13 91 年 4 月 11 日，使用者測站為 S804，四種
網格大小之 TEC 預估值殘差分佈圖的比較

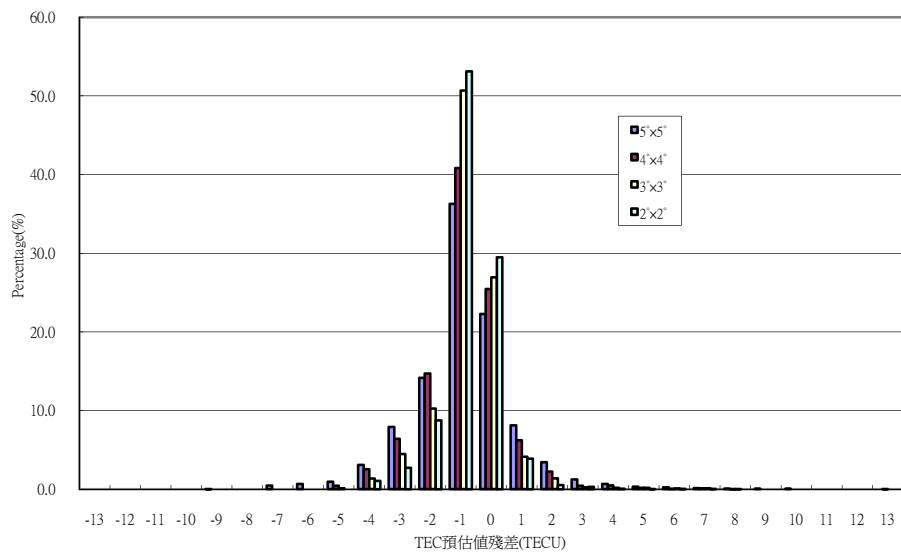


圖 4-14 91 年 4 月 14 日，使用者測站為 R096，四種
網格大小之 TEC 預估值殘差分佈圖的比較

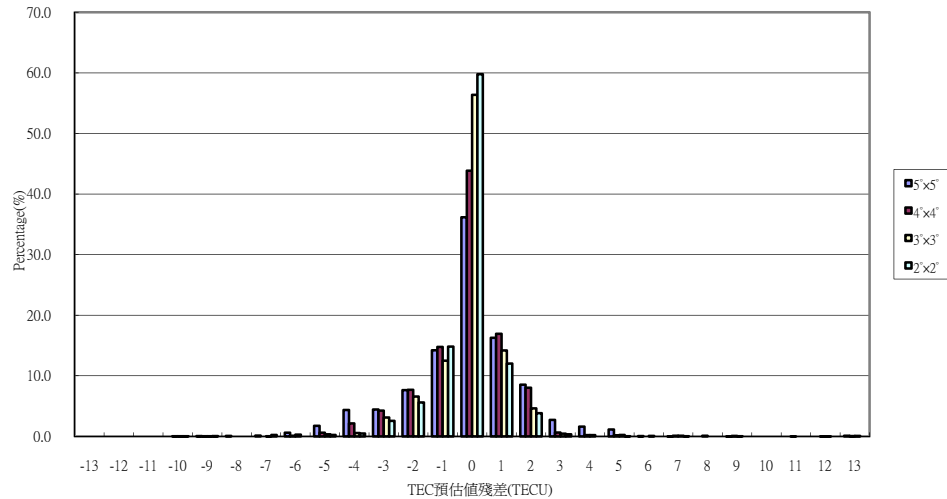


圖 4-15 91 年 4 月 11 日，使用者測站為 PH19，四種網格大小之 TEC 預估值殘差分佈圖的比較

二、實驗結論

- (一)由表 4-4~表 4-6，圖 4-7、4-9、4-11 可知，幾乎在各種情況下，網格大小 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ ，其 TEC 預估值殘差的標準差均最小。
- (二)由表 4-4~表 4-6，圖 4-8、4-10、4-12 可知，在各種情況下，網格大小 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ ，其「TEC 預估值殘差的標準差」之標準差均最小。
- (三)如果純粹就 TEC 預估值殘差的標準差大小來判斷，四種網格大小 ($5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 、 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ 、 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ 、 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$) 中，以 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 效能最佳。
- (四)但在實際執行時，需使用無線電數據機將參考站的電離層修正數據傳輸至使用者測站以進行電離層改正，若網格愈小，則檔案愈大，傳輸速率愈慢。所以，在考量網格式電離層模型的精度及電離層模型檔案大小等條件下，應求得適合台灣地區即時的電離層模型之較佳網格大小。

1、就網格大小改變之精度增加率言

由表 4-4~表 4-6 可知，使用者分別為 S804、R096、PH19 時，四種網格大小 ($5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 、 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ 、 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ 、 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$) 之 TEC 預估值殘差

的標準差之 9 日（91 年 4 月 6 日～14 日）「平均值」。

參照第一節「Impro. (%)」定義為 $[(Conv. - UNSW) / Conv.] \times 100\%$ 之方式。網格大小由 A 改為 B 時，「精度增加率」定義為 $[(A - B) / A] \times 100\%$ ；其中，A 和 B 分別代表「網格大小為 A 之 TEC 預估值殘差標準差」和「網格大小為 B 之 TEC 預估值殘差標準差」。因此，以 S804 測站為例，其網格大小由 $5^\circ \times 5^\circ$ 改為 $4^\circ \times 4^\circ$ 時，其精度增加率 $= [(2.594 - 2.007) / 2.594] \times 100\% = 22.63\%$ ，其餘類推。

表 4-7 所示為 91 年 4 月 6 日至 14 日，四種網格大小改變之精度增加率，其中，網格大小由 $5^\circ \times 5^\circ$ 改為 $4^\circ \times 4^\circ$ 時，平均精度增加率為 22.09%，對精度之提昇最大。而網格大小由 $3^\circ \times 3^\circ$ 改為 $2^\circ \times 2^\circ$ 時，平均精度增加率僅為 9.54%，對精度之提昇最小。

表 4-7 91 年 4 月 6 日～14 日，四種網格大小改變之精度增加率的情形（單位：TECU）

測站 網格大小	S804	精度增 加率	R096	精度增 加率	PH19	精度增 加率	平均精度 增加率
$5^\circ \times 5^\circ$	2.594	N/A	3.058	N/A	2.865	N/A	N/A
$4^\circ \times 4^\circ$	2.007	22.63%	2.351	23.13%	2.278	20.51%	22.09%
$3^\circ \times 3^\circ$	1.645	18.06%	1.927	18.04%	1.945	14.62%	16.91%
$2^\circ \times 2^\circ$	1.493	9.21%	1.735	9.93%	1.761	9.47%	9.54%

2、就網格大小改變之檔案大小增加率言

表 4-8 係以 91 年 4 月 5 日至 14 日計 10 日，台南縣白河鎮 S804、R096、PH19 測站，及內政部 GPS 衛星追蹤站 YMSM、PKGM、KDNM、TMAM、FLNM、KMNM、MZUM 之 GPS 觀測資料，計算出涵蓋台灣地區之 IPP 地理緯度範圍：北緯 $6.2806^\circ \sim 36.4189^\circ$ ；IPP 地理經度範圍：東經 $104.5207^\circ \sim 136.5479^\circ$ 。再參考此 IPP 地理經緯度

範圍來決定網格之地理經緯度範圍及其網格數，進而決定電離層模型檔案（表 3-2 之 File 7）之大小。但實際執行時，使用無線電數據機或其他傳輸設備，為達到加速檔案傳輸之目的，其所使用之檔案格式與上述電離層模型檔案格式（逐曆元列出各網格節點的地理經緯度及其 VTEC 值等資料）不同，故其檔案大小較電離層模型檔案為小。

檔案大小由 A 改為 B 時，「檔案大小增加率」定義為 $[(B - A) / A] \times 100\%$ ；其中，A 和 B 分別代表「檔案 A 之大小」和「檔案 B 之大小」。以網格大小由 $5^\circ \times 5^\circ$ 改成 $4^\circ \times 4^\circ$ 為例，其檔案大小增加率 = $[(11295 - 7249) / 7249] \times 100\% = 56\%$ ，其餘類推。

表 4-8 四種網格大小改變之檔案大小增加率的情形

項目 網格 大小	網格地理 緯度範圍	網格地理 經度範圍	網格數	電離層模型 檔案大小	檔案大小 增加率
$5^\circ \times 5^\circ$	$5^\circ \sim 40^\circ$	$105^\circ \sim 140^\circ$	64	7,249KB	N/A
$4^\circ \times 4^\circ$	$4^\circ \sim 40^\circ$	$104^\circ \sim 140^\circ$	100	11,295KB	56%
$3^\circ \times 3^\circ$	$6^\circ \sim 39^\circ$	$105^\circ \sim 138^\circ$	144	16,240KB	44%
$2^\circ \times 2^\circ$	$6^\circ \sim 40^\circ$	$104^\circ \sim 138^\circ$	324	36,469KB	125%

3、綜上所述，就網格大小改變時，同時考量其精度增加率及檔案大小增加率兩項因素，網格大小由 $5^\circ \times 5^\circ$ 改為 $4^\circ \times 4^\circ$ 時，其平均精度增加率為 22.09%（最大），而檔案大小增加率為 56%（居中）；網格大小由 $4^\circ \times 4^\circ$ 改為 $3^\circ \times 3^\circ$ 時，其平均精度增加率為 16.91%（居中），而檔案大小增加率為 44%（最小）。是以，適合台灣地區即時的區域電離層模型之較佳網格大小為 $4^\circ \times 4^\circ$ 或 $3^\circ \times 3^\circ$ 。

第三節 探討參考站 IPP 之地理經緯度範圍及涵蓋率

一、實驗結果

IPP 點的地理經緯度，是指 GPS 衛星訊號傳遞路徑與中心電離層相交之處的經緯度，可由測站地理經緯度，及被觀測 GPS 衛星之方位角及高程角，經由方程式 2-21、2-22、2-23 計算得到，而以 GPS 觀測量所能遙測電離層的範圍為測站之 IPP 點的地理經緯度範圍。

本實驗以 91 年 4 月 5 日至 14 日計 10 日，台南縣白河鎮 S804、R096、PH19 測站，及內政部 GPS 衛星追蹤站 YMSM、PKG M、KDNM、TMAM、FLNM、KMN M、MZUM 之 GPS 觀測資料，依上述方式計算出這 10 天期間，各測站之 IPP 最大地理經緯度範圍，進而求出各參考站之涵蓋率，其實驗說明及結果如下：

(一)實驗說明

1. 緯度最小值、經度最小值：為 91 年 4 月 5 日至 14 日計 10 天期間，各測站之 IPP 地理經緯度最小值。
2. 緯度最大值、經度最大值：為 91 年 4 月 5 日至 14 日計 10 天期間，各測站之 IPP 地理經緯度最大值。
3. 最大緯度範圍 = 緯度最大值 - 緯度最小值。
4. 最大經度範圍 = 經度最大值 - 經度最小值。
5. 台灣地區之最大經緯度範圍：以全部測站之經緯度最小值及最大值，當作台灣地區之最大經緯度範圍。
6. 涵蓋率：各測站之最大經緯度範圍佔台灣地區之最大經緯度範圍之百分比。以 TMAM 追蹤站為例，涵蓋率 = $(28.7540 / 30.1383) \times (26.4717 / 32.0272) \times 100\% = 78.86\%$ 。

(二)實驗結果

表 4-9 91 年 4 月 5 日至 14 日各參考站之 IPP

最大地理經緯度範圍及涵蓋率（單位：度）

測站	緯度最 小值	緯度最 大值	經度最 小值	經度最 大值	最大緯 度範圍	最大經 度範圍	涵蓋率
S804	13.6858	30.7959	109.9284	130.7631	17.1101	20.8347	36.93%
R096	13.5723	30.7124	109.9753	130.7907	17.1401	20.8154	36.96%
PH19	14.0641	30.7753	110.029	129.6473	16.7112	19.6183	33.96%
YMSM	17.4556	31.0905	114.3795	129.8664	13.6349	15.4869	21.88%
PKGM	12.5001	32.4854	110.5226	132.0861	19.9853	21.5635	44.65%
KDNM	13.2147	28.9530	111.4602	129.1581	15.7383	17.6979	28.86%
TMAM	6.2806	35.0346	108.6224	135.0941	28.7540	26.4717	78.86%
FLNM	7.8973	35.1198	109.0673	136.5479	27.2225	27.4806	77.50%
KMNM	11.3012	34.0607	104.5207	129.506	22.7595	24.9853	58.91%
MZUM	14.4071	36.4189	107.9543	135.1568	22.0118	27.2025	62.03%
台灣地區	6.2806	36.4189	104.5207	136.5479	30.1383	32.0272	100%

二、實驗結論

- (一)內政部衛星追蹤站陽明山 (YMSM)、北港 (PKGM)、墾丁 (KDNM)、太麻里 (TMAM)、鳳林 (FLNM)、金門 (KMNM)、馬祖 (MZUM)，用 91 年 4 月 5 日至 14 日觀測資料計算，以 TMAM 之 IPP 涵蓋率 (78.86%) 最高，FLNM 之 IPP 涵蓋率 (77.50%) 居次，所以，內政部衛星追蹤站中，以 TMAM、FLNM 追蹤站所能遙測電離層的範圍較大。
- (二)由方程式 2-21、2-22、2-23 可知，測站之 IPP 點的地理經緯度範圍與測站地理經緯度有高度相關；依實驗結果顯示，S804、R096、PH19 之地理經緯度相近，故其 IPP 點的地理經緯度範圍亦相近。另一方面，

由圖 2-3 知，若參考站之 IPP 地理經緯度範圍相近，參與計算網格節點 VTEC 值之 IPP 數量較多，其由方程式 2-30、2-32 計算得到的網格節點 VTEC 值之精度較佳。因此，在實際執行時，可參考上述內政部衛星追蹤站之 IPP 最大地理經緯度範圍，選擇與測區距離較近之測站（或追蹤站）及 IPP 涵蓋率較高之測站（或追蹤站）當作參考站，以提昇區域電離層模型的精度。

(三)台南縣白河鎮 S804 (涵蓋率 36.93%)、R096 (涵蓋率 36.96%)、PH19 (涵蓋率 33.96%) 三個測站所構建之電離層模型無法涵蓋全台灣，僅為台灣南部地區之區域電離層模型。