

GPS 衛星精密軌道計算

The Precise Orbit Computation of GPS Satellites

何慶雄¹ 翁錦堂² 景國恩²

1 國立成功大學航太系

2 國立成功大學衛星資訊中心

蔡俊雄 林昭儀 林添財

中央氣象局地震測報中心

摘 要

GPS 軌道誤差對百公里以上之長基線計算深俱影響，IGS 精密星曆可達預期的二十公分誤差，因此適合長基線計算。本研究採取兩種軌道估算策略，進行軌道計算研究。其一是運用一全球分佈的國際追蹤網，可稍微改善測區基線精度。雖然台灣網所計算的軌道精度很差，但仍然可以解算出超過十公分的地表位移。

Abstract

The GPS orbit error affects the accuracy in computing a long baseline over hundred kilometers. The precise orbits computed by IGS meet the expectation of less than 20 centimeters in error and are suitable for long baseline task. This study provides two strategies in estimating GPS orbits. Using a globally distributed tracking network, the baseline accuracy can be slight improved. Although the orbit accuracy is poor, a local tracking network is capable of resolving a ground surface displacement of more than ten centimeters.

壹、前言

台灣位處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊之交界邊緣，沿著琉球、呂宋兩大島弧系統的板塊隱沒與碰撞等交互作用，造成此區地震頻繁，地殼變動劇烈。為監測此長期(板塊運動)與短期(地震前後)所造成地殼的變動，並提供變動分析與必要的及時預警，中央氣象局(CWB)已積極進行地表地動觀測計畫，包括將設置約 100 個以上的全球定位系統(Global Positioning System，以下簡稱 GPS)追蹤站。另外，我國內政部(MOI)基於國土重測的需要，建立 GPS 永久追蹤站，以計算與全球同基準的新國家坐標系統，並以此為框架，重新施測及計算全國各三角點及控制點之坐標[1]。然而，亦因長期與短期的地表變動，需經年修正，以維持可正常運作的坐標系統，因此也須處理每日的追蹤站資料。

計算方法上大同小異，不過著重點有些差異，板塊運動研究者較著重於長期的地表變動，資料處理是含整年或數年之跨板塊大區域，以尋求速度場及板塊相對速度。地震研究者觀察地震前後的小區域地表快速變化，資料處理以基線(或所謂的相對位置)變化為主，追蹤站數據以日或小時甚至分秒為單元。內政部的需求是坐標(或所謂的絕對位置)，因此在最終整合平差上，須以國際已知坐標之追蹤站為框架，將八個追蹤絕對位置架在其定義的系統上。

因而計算策略亦有不同，基本上有兩種方向：一種是不假設任何站的坐標為已知，解算全球各測站之間的相對位置，以及 GPS 衛星軌道，此方法被稱為"自由網法" (Free Network Approach)。1992 年，JPL (Jet Propulsion Laboratory, USA) 的研究者在不使用任何基準站的情況下，處理分佈於全球測站的數據，結果顯示相關基線長度從 100 到 12,000 公里，測站坐標值的重覆性(不論在經度、緯度或高程向)約為 1cm [2]。另一種方向是透過由已知坐標的基準站(Fiducial Sites)所建構的參考基準，可用於計算精密星曆和基線，此方法被稱為"基準網法" (Fiducial Network Approach)。基準網法可用於全球網(Global Network)及區域網(Regional Network)，區域網所估算的軌道，僅適合於該區域使用[3]。

不管長期亦是短期，只要基線長達上百公里，若非如上述自行調整軌道，便須採用精密星曆進行解算。目前國際上有 IGS (International GPS Geodynamic Service)免費提供精密星曆(Precise Ephemeris)，該機構提供三種精密星曆供人下載：最終(Final)精密星曆(代號 igs)、快速(Rapid)精密星曆(代號 igr)、和預估(Predict 或 Ultra Rapid)精密星曆(代號 igu)等三種，其相關資訊如表一：

Orbit Type	Quality (m)	Delay of Availability	Available at
Broadcast Orbits	3.00 m	Real Time	Broadcast Message
CODE Predicted Orbits	0.20 m	Real Time	CODE through FTP
CODE Rapid Orbits	0.10 m	After 16 Hours	CODE through FTP
CODE Final Orbits	0.05 m	After 5-11 Days	CODE, IGS Data Centers
IGS Ultra Rapid Orbit	0.20 m	After 3 Hours	IGS Data Centers and CBIS
IGS Rapid Orbit	0.10 m	After 19 Hours	IGS Data Centers and CBIS
IGS Final Orbit	0.05 m	After 13 Days	IGS Data Centers and CBIS

表一：三種 IGS 精密星曆資訊[4]

要達到表一所描述的精度，IGS 運用以全球 300 個以上分佈均勻之 GPS 連續記錄追蹤站資料，計算每日 GPS 高精度軌道，以供全世界使用。所計算的成果包括精密星曆、極運動資料和原始觀測資料，皆送到 CDDIS (Crustal Deformation and Dynamics Information System) 或 IGSCB (IGS Center Bureau)等電腦，該資料是開放讓使用者下載的。文獻[5]採用精密星曆與廣播星曆，研究軌道對基線精度的影響。

結果指出，由不同機構計算之精密星曆，求解的基線精度大致相同，水平精度 2cm 以內，長度約在 0.03 ~ 0.04 ppm 之間，約比廣播星曆成果改善 30~50%。

從以上分析似乎意指 IGS 精密星曆已十分完善，然而以全球追蹤站分佈來看，在台灣地區 IGS 追蹤站數量並不多，可能尚可利用台灣站，來改進 GPS 衛星軌道，這也是本研究的目的。本研究基本上將採基準網法策略，但在追蹤站資料處理上，利用網際網路下載 CDDIS 之 RINEX 數據。若要計算 GPS 軌道，全球網追蹤站位置參數的先驗約制(A Priori Constraints)需加考量，由於其坐標值已由其他測量方式(例如 VLBI、SLR 等)或長期 GPS 之重覆施測而準確求知，將對這些追蹤站的位置參數給予緊約制(Tight Constraints)，估算時它的調變空間小，等於提供一參考基準(Reference Frame)。至於其他的狀態參數如軌道參數及台灣站坐標，其先驗制約將採弛約制(Loose Constraints)。

貳、資料收集與處理

目前 CDDIS 之精密星曆資料，有三種供人下載：最終版(igs)、快速版(igr)、和預估版(igu)等，其中 igu 檔含 48 小時軌道(後 24 小時軌道為預估)，因此本研究下載 igu 檔後，先將前 24 小時軌道刪除，只保留預估軌道部份。另外，igu 檔每 6 小時更新一次，為方便計，本研究只下載零時那一時段。一般而言，最終(igs)與快速(igr)精密星曆的提供時機較落後，無法作近即時性的運算，而預估(igu)的後 24 小時軌道則可以。

至於 GPS 追蹤站資料，以 IGS 國際站作為參考基準，全球均勻分佈追蹤站包括：ALGO、GUAM、FAIR、YELL、KOKB、GOL2、SANT、TSKB、USUD、WUHN、KOSG、MADR、TROM、WTZR、YAR2、TID2 等 16 個站。國內則含：YMSM、KMNM、MZUM、DONS、TMAM、KDNM、FLNM、BANC、CHIA、GAIS、HSIN、HENC、ILAN、LANY、LIUC、CK01、S01R、CHEN、GAIS、SUAO 等 20 個站，收集的時段包括：

時段	事件	時段長
1	2004 甲仙地震	2004 年 4 月 21 日 2004 年 4 月 25 日
2	2003 成功地震	2003 年 12 月 7 日 2003 年 12 月 12 日
3	2002 花蓮地震	2002 年 3 月 28 日 2001 年 4 月 2 日
4	1999 集集地震	1999 年 9 月 19 日 1999 年 9 月 23 日

Bernese4.2 資料處理流程可參考[4]，而相關參數考量可參考[6]，唯一須要注意的是，衛星軌道先驗約制(A Priori Constraints)的設定，表二為 GPS 軌道力學模型及預估誤差，因此微調中以 Y-Bias 誤差大小為準則，八個調整參數(包括軌道六

元素、直接太陽輻射壓、Y-Bias)中，給半長軸(Semi-major Axis)1m 之先驗約制。

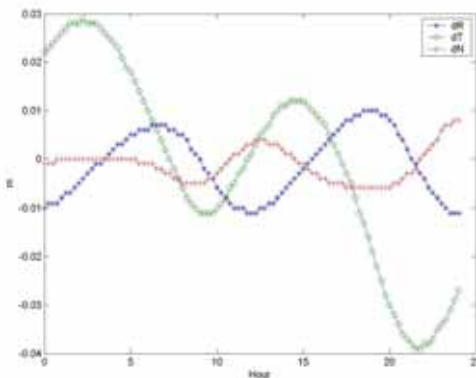
Perturbation	Acceleration m/s ²	Orbit Error after one Day (m)
Two-Body Term of Earth's Gravity Field	0.59	∞
Oblateness of the Earth	$5 \cdot 10^{-5}$	10'000
Lunar Gravitational Attraction	$5 \cdot 10^{-6}$	3000
Solar Gravitational Attraction	$2 \cdot 10^{-6}$	800
Other Terms of Earth's Grav. Field	$3 \cdot 10^{-7}$	200
Radiation Pressure (direct)	$9 \cdot 10^{-8}$	200
Y-Bias	$5 \cdot 10^{-10}$	2
Solid Earth Tides	$1 \cdot 10^{-9}$	0.3

表二：通用 GPS 衛星軌道力學模型及預估誤差[4]

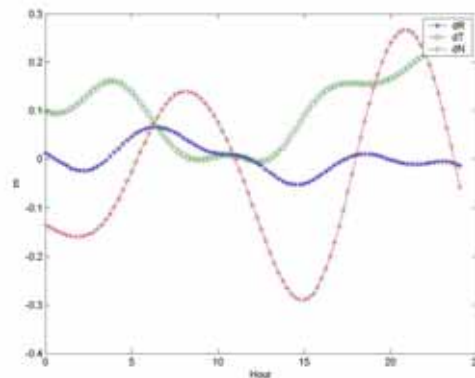
參、結果分析

3.1 三種精密星曆比較

首先比較最終精密星曆(igs)、快速精密星曆(igr)、和預估精密星曆(igu)三種，首先分析三種精密軌道(igs、igr、igu)比較結果，圖一 a 及 b 分別 2004 年 4 月 22 日 GPS 衛星 17 號之 igr-igs 與 igu-igs 三方向(R、T、N) 24 小時軌道差值圖，其中 R 為距離軸向(Radial)，T 為沿軌跡向(Along Track)，N 為垂直軌道面的法向(Normal)。從圖一 a 中可以明顯看出 igr 與 igs 差距很小，且沒有尾端發散現象，結果與表一預估的星曆精度符合。圖一 b 為 igu 與 igs 的差值圖，軌道差值比預期精度稍大，尾端有些增大但仍沒有明顯發散現象，顯示軌道追蹤與估算皆相當穩定。綜觀其他衛星軌道差值亦與上表預期精度符合，除了有日蝕情況，亦即衛星有部份時間會運行在地球陰影當中，大部份衛星軌道差值皆相當穩定。

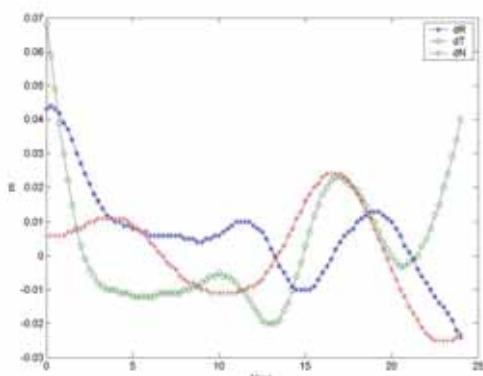


圖一 a 2004/4/ igr SV17 軌道差值圖

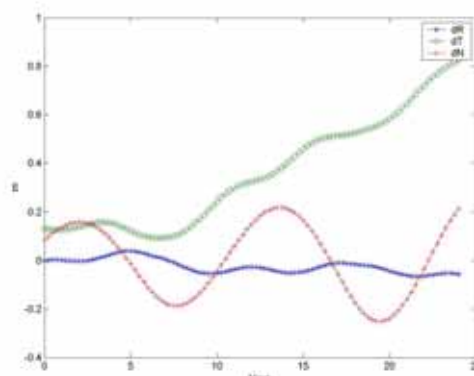


圖一 b 2004/4/ igu SV17 軌道差值圖

這個時段衛星 3、6、7、19、31 號軌道有日蝕情況，一般而言，估測誤差通常會較大，因此可用來測試軌道計算。圖二 a 及 b 分別為 2004 年 4 月 22 日 GPS 衛星 31 號之 igr-igs 與 igu-igs 三方向軌道差值圖，圖二 a 顯示快速版精密星曆軌道差值大多在 5 cm 以內，與預期精度吻合，但圖二 b 說明預估軌道之差值尾端有明顯增大，但尚不至於對基線解造成影響。

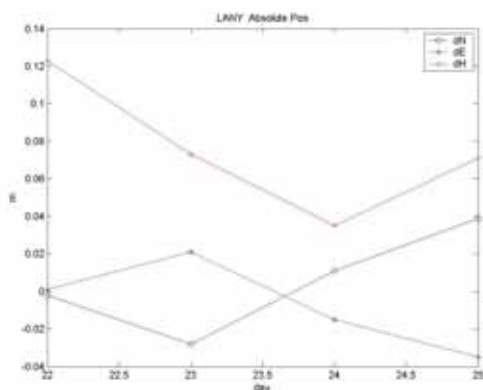


圖二 a 2004/4/igr SV31 軌道差值圖

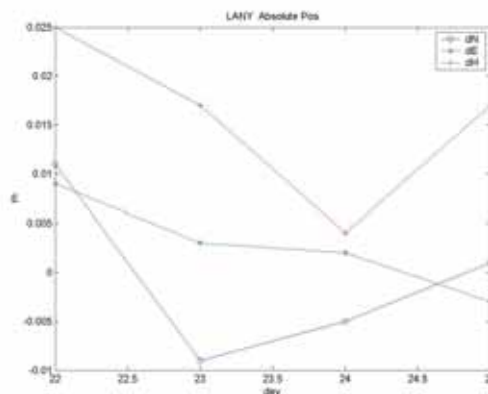


圖二 b 2004/4/igu SV31 軌道差值圖

接著用 Bernese 軟體處理每日 GPS 數據，由於其輸出是三維站坐標，因此將分析三種精密軌道對坐標(或絕對位置；Absolute Position)及基線(或相對位置；Relative Position)之影響。首先在軌道固定下處理 2004 年甲仙地震資料，並分別固定(以下"固定"皆代表 1mm 的緊約制)TSKB 及 WTZR 坐標，坐標值取自 itrf2000[7]。圖三 a(固定 WTZR)及 b(固定 TSKB)為 2004 年 4 月自 22 日至 25 日 LANY 坐標變化圖(相對於 4 月 21 日解)，軌道採取最終版(igs)之精密星曆。比較兩圖發現變化大小相差四倍以上，說明固定站離測區越遠，所估算的坐標值越不準確。反過來可推測，若要估算軌道，地面追蹤站不能離測區過遠，否則測區上方的軌道會越不準確。

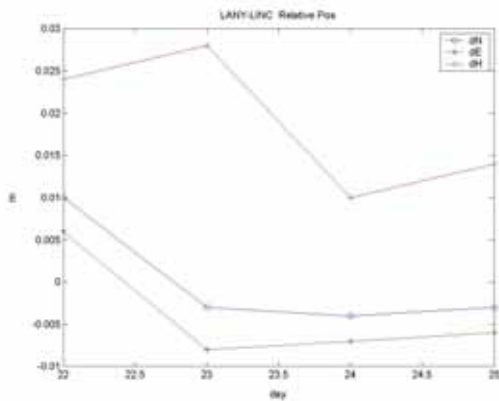


圖三 a 2004/4/固定 WTZR 坐標變化圖

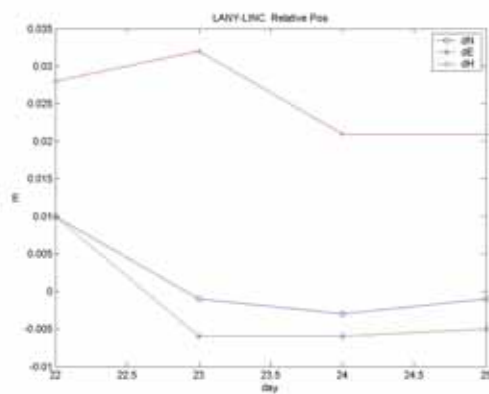


圖三 b 2004/4/固定 TSKB 坐標變化圖

至於基線方面，圖四 a(固定 WTZR)及 b(固定 TSKB)為 LANY 相對於 LIUC 基線變化圖(相對於 4 月 21 日解)，軌道採取最終版(igs)之精密星曆。兩種結果並無明顯差異，也間接說明前述之"自由網法"可行，以下討論亦將以基線變化為分析重點。

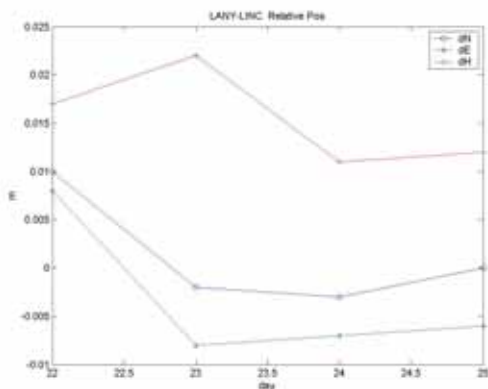


圖四 a 2004/4 固定 WTZR 基線變化圖

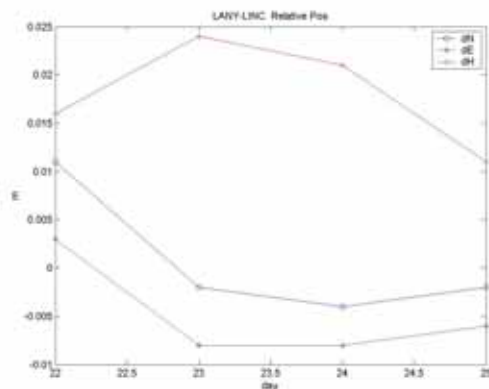


圖四 b 2004/4/固定 TSKB 基線變化圖

至於不同精密軌道之影響，可以用圖五來說明。同樣是 LANY 相對於 LIUC 基線，圖五 a 是固定快速版(igr)之精密星曆，圖五 b 是固定預估軌道(igu)，兩者並無太大差異，其他基線亦顯示，固定預估軌道其基線結果會稍差，但固定快速版與最終版其基線精度幾乎一致，此與上述軌道比較結果符合。



圖五 a 2004/4/igr 基線變化圖



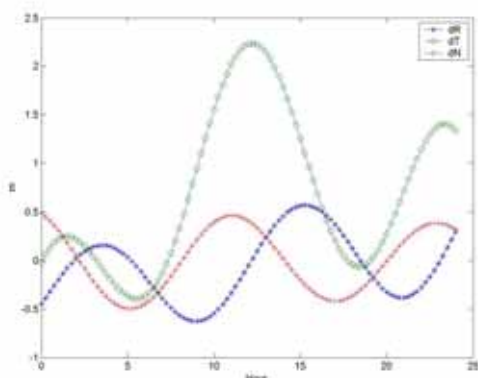
圖五 b 2004/4/igu 基線變化圖

3.2 軌道調整

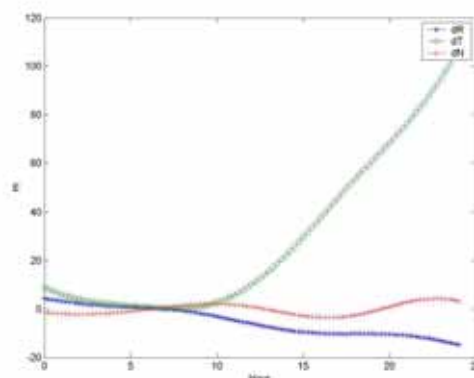
IGS 所公佈之三種精密軌道，是以 IGS 國際站來框架其坐標，亦即採用"基準網法"來計算每日軌道。本研究進行兩種軌道調整策略，其一是固定(1mm 緊約制)IGS 國際站，此策略為一般軌道調整及衛星追蹤的方式；另一是僅固定台灣站，模擬無 IGS 精密軌道時，小區域如何計算適合該區的精密軌道。由於不同時段國

際站的資料不一，國際網固定站數在 9 到 12 站之間，不過這小差異對基線影響並不大，真正影響較大的則是固定站的資料品質。台灣網固定站基本上是 YMSM、KMMN、MZUM、KDNM、S01R，不過亦因時段而異，但至少維持三站。

圖六 a 及 b 分別 2004 年 4 月 22 日 GPS 衛星 17 號之國際網軌道及台灣網軌道與 igs 三方向(R、T、N) 24 小時軌道差值圖。國際網軌道差值 (見圖六 a)比預估 IGS 精密軌道 (見圖一 b)精度稍差，後半段有些增大，最大超過 2m，但尾端仍沒有明顯發散現象，顯示軌道追蹤與估測皆相當穩定。從圖六 b 中可以明顯看出台灣網軌道差距很大，且尾端有顯著發散現象，評估若用兩種追蹤網來預估星曆，其精度將會很差，無法達到如圖一 b 或圖二 b 的預期精度，因此也建議不自行預估軌道。

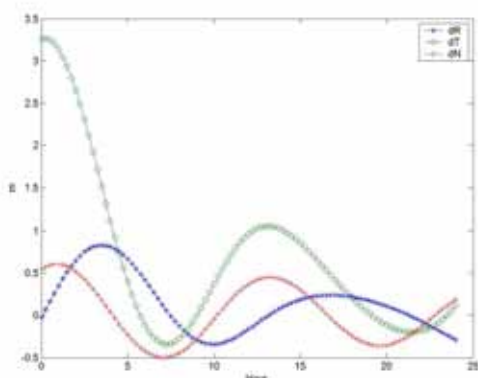


圖六 a 2004/4/國際網 SV17 軌道差值圖

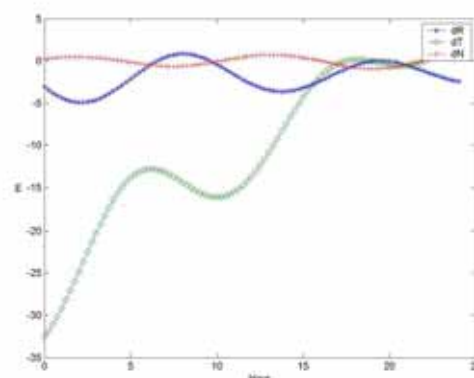


圖六 b 2004/4/台灣網 SV17 軌道差值圖

至於此時段衛星 31 號軌道有日蝕情況，其 2004 年 4 月 22 日軌道差值表現於圖七 a(國際網)及圖七 b(台灣網)。圖七 a 顯示國際網軌道精度受日蝕影響，而比較圖六 b 與圖七 b 則說明小區域網形的影響遠超過日蝕影響。

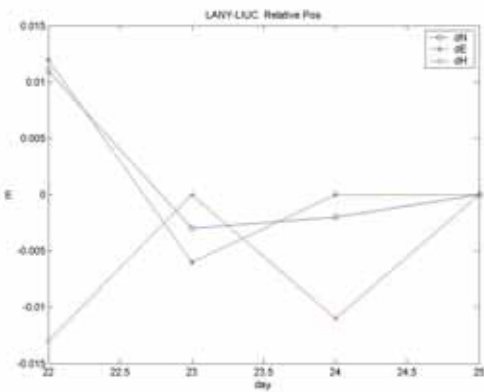


圖七 a 2004/4/國際網 SV31 軌道差值圖

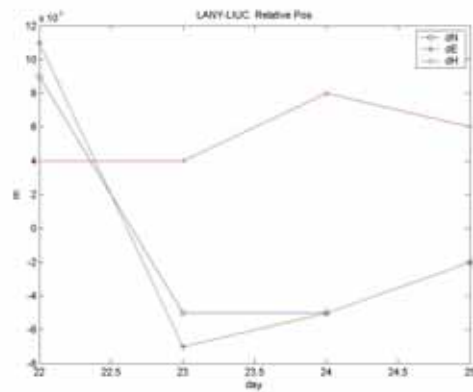


圖七 b 2004/4/台灣網 SV31 軌道差值圖

將此二網形軌道用於基線計算，以評估軌道品質是否如上述般差。圖八 a (國際網)及圖八 b (台灣網)為 LANY 相對於 LIUC 基線變化圖(相對於 4 月 21 日解)。比較國際網 (見圖八 a)與前述最終版(igs)之基線變化 (見圖四 b)，自行計算之國際網軌道略改善基線計算，事實上整體而言，雖然軌道差值較大，但國際網基線解略有改善，推測是因為改善測區內軌道之故。從圖八 b 看似台灣網提供最佳基線解，但統計所有基線解，台灣網比預估版 IGS 精密軌道之基線解略差，但精度仍大多在 2cm 以內。不過圖八 b 要強調的是，雖然其 24 小時的軌道差值非常大，但基線測區內軌道品質仍然不錯。



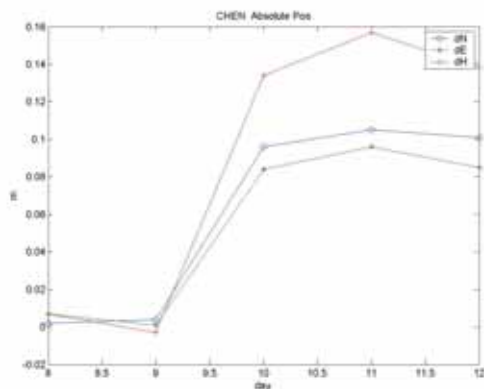
圖八 a 2004/4/國際網基線變化圖



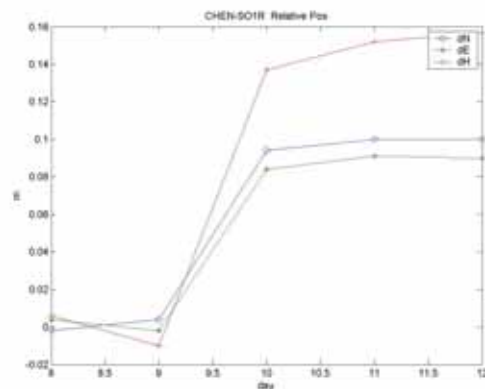
圖八 b 2004/4/台灣網基線變化圖

3.3 成功地震

地震發生於 2003 年 12 月 10 日，地表有明顯位移。採取最終版(igs)之精密星曆並固定 TSKB 站，不論是坐標變化(見圖九 a)或是相對於 S01R 基線變化(見圖九 b)，皆可看出 CHEN 站 E 方向約變化 8cm，N 方向約變化 10cm，H 方向變化最大約 14cm，此結果與文獻[6]相似。其他本研究採用的接收站皆無法看出位移。

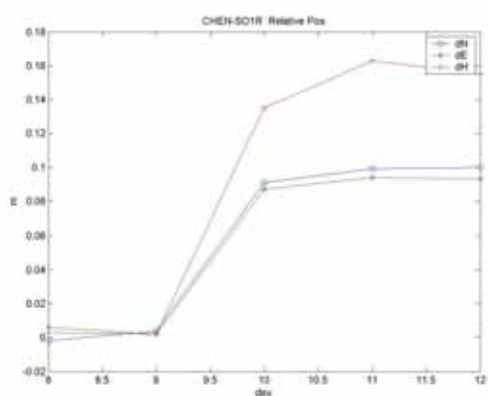


圖九 a 2003/12/固定 TSKB 坐標變化圖

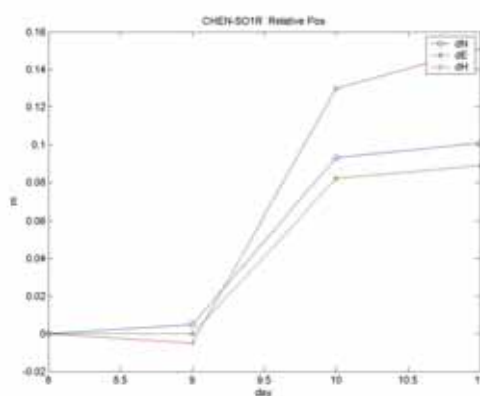


圖九 b 2003/12/固定 TSKB 基線變化圖

對成功地震數據進行兩種軌道調整，圖十 a 為採取國際網 CHEN 站相對於 S01R 基線變化，如此大的地表變動，即使是採用台灣網(見圖十 b)，亦可得到不錯的結果。至於 2002 花蓮地震 GPS 資料，計算結果並無法看出位移，因此不做更多描述。



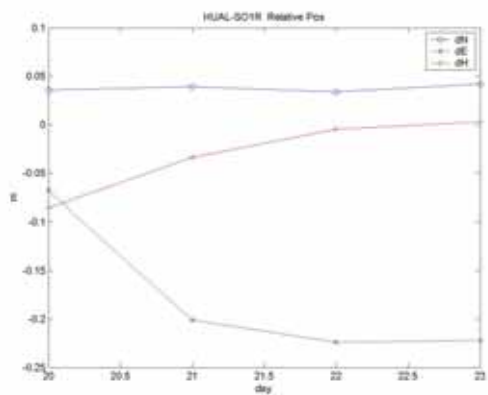
圖十 a 2003/12/國際網基線變化圖



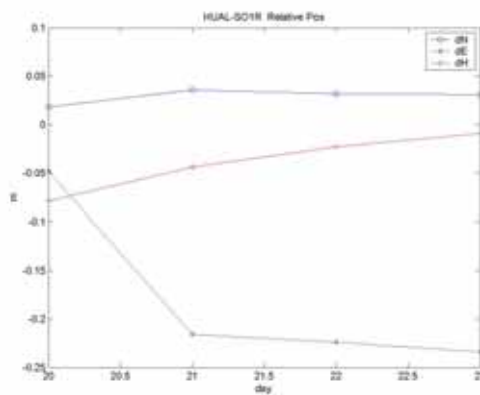
圖十 b 2003/12/台灣網基線變化圖

3.4 集集地震

1999 年 9 月 21 日台灣發生近百年來最大的地震，較大之地表變動都發生在中部由東到西地區[8]，同樣採取兩種軌道調整策略，圖十一 a 為採取國際網 CHEN 站相對於 S01R 基線變化，較顯著的是 CHEN 站向西移動約 25cm，與與文獻[8]的位移量及方向相近，而採用台灣網(見圖十一 b)亦可得到相近的結果。



圖十一 a 1999/9/國際網基線變化圖



圖十一 b 1999/9/台灣網基線變化圖

肆、結論

比較最終版精密星曆(igs) 、快速版精密星曆(igr) 、和預估版精密星曆(igu)三種，24 小時軌道比較結果與星曆精度表符合。基線結果顯示預估版結果會稍差，但固定快速版與最終版其基線精度幾乎一致，此與上述軌道比較結果符合。自行估算之國際網軌道及台灣網軌道，軌道比較結果都比預估版差，尤其是台灣網軌道誤差可達百公尺，但基線結果顯示不比預估版結果差，而國際網基線結果亦稍有改進，推斷是因有較多測區內追蹤站之故。即使是簡單的台灣網，亦可求得如成功地震與集集地震之十幾公分的地表變動。

伍、參考文獻

- 1) 曾清涼等，內政部「二等衛星控制點測量平差工作(三)」計畫期末報告，1998。
- 2) Blewitt, G. and Lichten, S., "GPS Carrier Phase Ambiguity Resolution Up to 12,000 km: Results from the GIG' 91 Experiment", Proceedings of the Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Columbus Ohio, 1992.
- 3) 何慶雄、張志仁、鄧君儀，"利用改進之區域性 GPS 軌道進行高精度地區性基線估算"，第十三屆測量學術及應用研討會論文集，33 至 42 頁，1994。
- 4) User Menu for Bernese Software, 2000.
- 5) 郭晨隆和余水倍，"台灣地區 GPS 連續觀測資料之精度分析"，第十二屆測量學術及應用研討會論文集，89 至 99 頁，1993。
- 6) 陳鶴欽、饒瑞鈞、曾清涼、劉至忠、吳萬順，"2003 Mw 6.5 台東成功地震 GPS 變位監測"，第二十三屆測量學術及應用研討會論文集，465 至 472 頁，國立中興大學，9 月 9 日至 10 日，2004。
- 7) <ftp://igs.ensg.ign.fr/>
- 8) Ho, C.S., Weng, C.T., Liu, C.C., and Tsai, J.H., "Preliminary GPS Solutions in Measuring Surface Deformation by 1999 Chi-Chi Earthquake", Proceedings of the Institute of Navigation, National Technical Meeting, Long Beach, California, January 22-24, 2001.