

## 衛星大地測量基礎及應用研究

### Basic Research and Applications in Satellite Geodesy

計劃編號：NSC87-2211-E-009-026

執行期間：86年8月1日至87年7月31日

主持人：黃金維 國立交通大學土木工程系 教授

#### 一、中文摘要(關鍵詞：衛星大地、軌道、雷射測距、Geodyn II)

本計畫原提議以三年時間進行衛星大地測量基礎研究，本年度以(86/8~87/7)以研究衛星動力學與軟體開發為主。NASA 的精確定軌軟體 Geodyn II 已成功地安裝於 HP750 電腦中，並成功運轉約一年。本計畫以 S-band range rate, 衛星雷射測距(SLR)等實際及模擬資料，進行高精度定軌計算，被測試的衛星為中華二號衛星。本研究並成功地開發一快速軌道積分技術，將地球擾動力至 360 階的積分計算提昇約 145 倍；此技巧已發表於 Journal of Geodesy。

英文摘要：(Keywords: Satellite geodesy, orbit, SLR, Geodyn II)

This project proposes a basic study in satellite geodesy. In the first year the aim was to conduct research in satellite orbit dynamics and to develop software for use in satellite geodesy. The NASA orbit determination software Geodyn II has been successfully installed on a HP750 computer and it has been running for a year. Using real and simulated S-band range rates, satellite laser rangings, orbit determinations using Geodyn II have been performed for ROCSAT-2 satellite. A fast method to integrate orbit perturbed by the earth's nonsphericity to harmonic degree 360 has been developed. This technique speed ups the orbit integration by 145 times and was published in the Journal

of Geodesy.

#### 二、計畫緣由與目的

台灣在衛星大地測量方面，除 GPS 外甚少有深入的研究。隨著提昇國家競爭力及二十一世紀來臨的壓力，加上中華衛星系列的陸續發射，衛星大地測量基礎研究已不容忽視。目前世界頂尖衛星大地研究機構，無一存在於亞洲。本計畫目的即嘗試在三至五年間提昇我國在衛星大地測量方面的國際水準。其重點為軟體開發及衛星資料之分析；本年度的工作為安裝 NASA 定軌軟體於 HP750 電腦上並以實際及模擬資料進行高精度軌道計算。另一重點則為發展衛星動力學理論並以之完成相關軟體。此兩項工作已於本年度順利完成並寫成一碩士論文及一 Journal of Geodesy 的文章。

#### 三、研究方法與結果

##### 3.1 GEODYN II 軟體

台灣過去除處理 GPS 衛星觀測資料外，對於其他衛星資料的處理卻都少有研究。故本文計算使用 GEODYN II 軟體來進行衛星高精度定軌。目前許多衛星的高精度定軌，如 TOPEX/POSEIDON，皆以 GEODYN 計算為準。此軟體處理問題主要的功能可分為軌道預估及參數估計兩種模式，且能同時處理不同衛星不同觀測資料如 GPS, SLR, VLBI, DORIS 等。在軌道預估時需提供地位、其他擾動力模式及衛星特定時刻的狀態向量

(位置及速度)，經由積分運動方程得到衛星軌道。積分所使用的演算法是高階固定時間步長的 Cowell 預估糾正法。而在參數預估模式則是經由追蹤資料求解出特定模式的參數，如大氣阻力係數  $C_D$  和太陽輻射壓係數  $C_R$  等。求解這些參數所用的方法是貝式 (Bayesian) 最小二估計法。

GEODYN II 軟體在執行時可分為 TDF、GEODYN II S 和 GEODYN II E 三大步驟，其亦能建立一批次檔，將之串連起來執行。目前 GEODYN II 經由編譯後安裝於本所的 HP 750 工作站上，所使用的 TDF 版本為 94 年 4 月，GEODYN II S 和 GEODYN II E 則為 96 年 11 月版。

### 3.2 模擬軌道與觀測資料

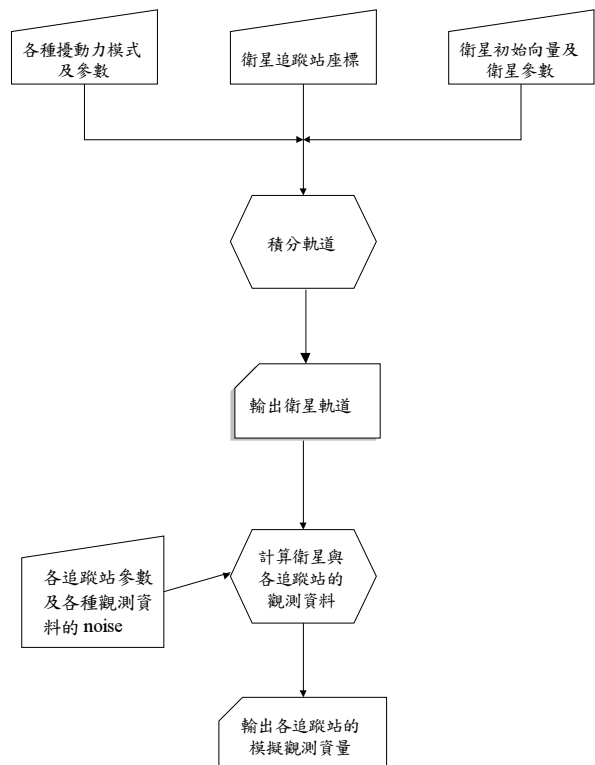
在使用 GEODYN II 在精密定軌時須用到許多模式，因此本實驗在模擬衛星軌道時，所使用的模式都盡可能參照 TOPEX/POSEIDON Standards (Tapley et al., 1994) 及 IERS Standards (McCarthy, 1992)。本實驗首先引用各種精確模式經由數值積分得到模擬的中華二號衛星軌道，並由模擬的軌道計算衛星與地面追蹤站間的 S 波段和 SLR 兩種觀測資料，模擬衛星軌道及模擬觀測資料的流程見圖一。

而在衛星參數方面，由於目前中華二號衛星的部份的細節資料尚在規畫階段。因此在計算中華二號衛星軌道時除根據國家太空計畫室規畫的規格外，並自行假設參數以便於計算，所使用的衛星參數列於表一。軌道計算時如太陽通量、地球自轉等參數資料需隨時間而更新，雖然這些參數可以預估，但長時間的預估值將會造成軌道計算時極大的差異 (Dow et al., 1993)。因此中華二號衛星雖預計於 2001 年發射，但為使軌道計算時能根據實際觀測的太陽通量、地球自轉等參數資料進行運算，因此將衛星發射

日期模擬於 1997 年 2 月 14 日。按表一之參數，中華衛星之軌跡如圖二所示，圖三則為使用的 SLR 追蹤站分布圖，圖四為模擬之追蹤資料(S-band 及 SLR)分布圖。

### 3.3 模擬時所使用之模式參數

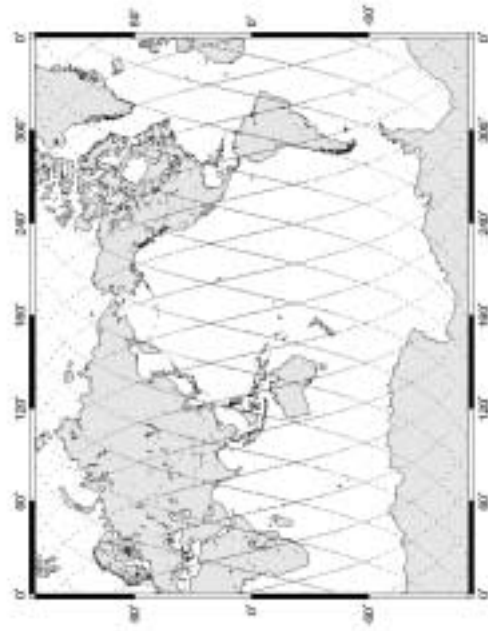
在 GEODYN II 計算前，需先準備各項計算所需的資料。這些資料除了各種擾動力模式外，還包含有衛星觀測資料、行星星曆、太陽通量、地磁活動、A1-UTC、A1-UT1 及地球自轉參數等資料，這些資料需隨時間一再更新，而各種資料皆可透過網際網路取得。所有取得的參數資料都需自行轉換成 GEODYN II 所需的格式。所使用的擾動力模式與參數列於表二。在考慮大地位模式各階球諧係數對中華二號衛星的影響時，根據 Hwang 和 Lin(1998)公式計算，當展開至  $70 \times 70$  階時  $\text{relative power } \rho_k \approx 1$ ，因  $1 - \rho_k \approx 10^{-14}$  已達到 IEEE 的雙精度限度，因此本實驗所使用大地位模式計算展開至  $70 \times 70$  階。



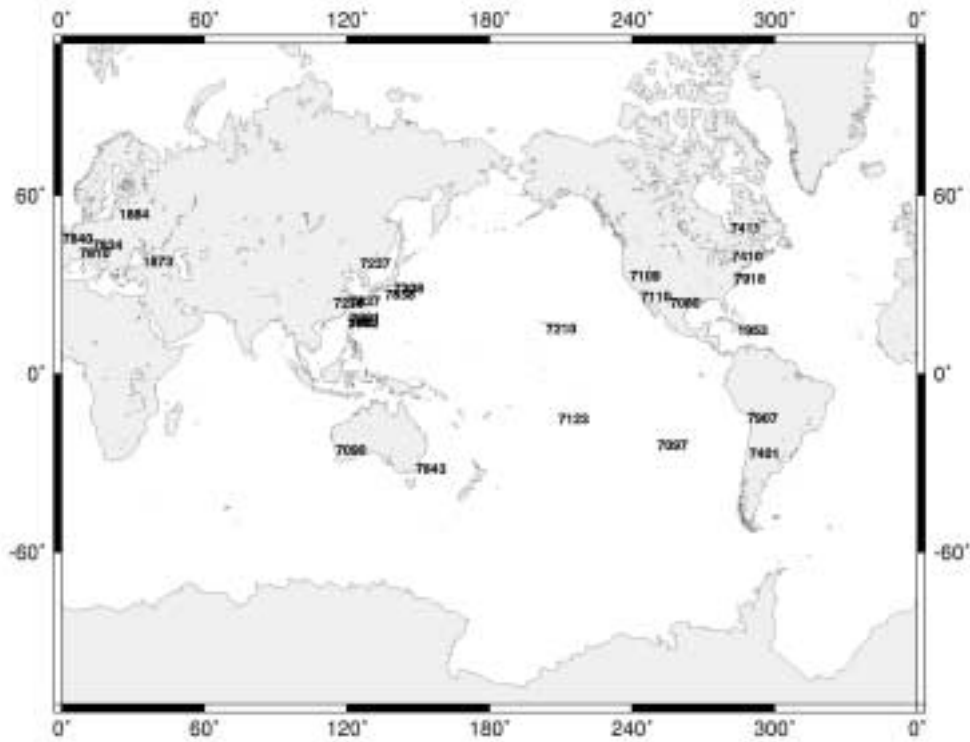
圖一 模擬中華二號衛星軌道與觀測資料流程圖

表一 中華衛星軌道參數

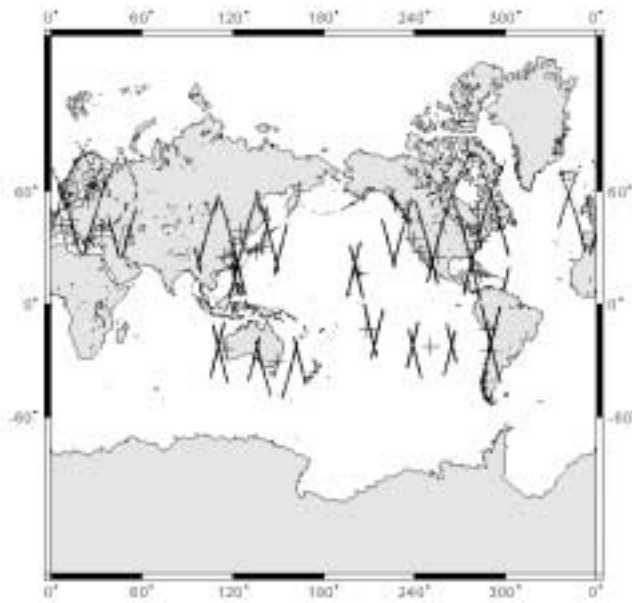
發射日期	1997年2月14
衛星編號	9702302
高度	891公里
偏心率	0.001
傾角	98.99°
質量	850公斤
截面積	13.82 m <sup>2</sup>
軌道重覆週期	一天 每天 14 個 pass
週期	約 102.8 分鐘



圖二 模擬中華二號衛星一天軌跡圖



圖三 中華二號衛星的模擬追蹤站(SLR 及 S-band)全球分佈圖



圖四 模擬觀測資料位置分佈圖

### 3.4 初始向量及擾動力模式引起之軌道誤差分析

表二所示的衛星擾動力模式均含有誤差，而此些模式計算出之軌道因而含有誤差；再者，積分使用之初始向量亦將引起軌道誤差。初始向量引起之軌道誤差大小主要和觀測量之精度及幾何強度有關，表三列出中華二號衛星追蹤資料的可能選擇。最差的為第一情況，若 S-band 的 range rate

精度為 0.16 cm/s，用此資料計算得之初始向量所引起的一天軌道誤差為 4.11 公尺。表四列出主要擾動力模式引起之誤差，其中以大地位模式引起者最大。若綜合初始向量及擾動力引起之誤差，預估二號衛星一天之軌道精度為 4.37 公尺。

### 3.5 低軌衛星軌道快速積分

本方法的理論及計算等細節可見 Hwang and Lin (1998)。低軌衛星(其高度約自 200 到 400 公里)，於軌道計算時需考慮高階(如到 360 階)的地球擾動力，而此力在軌道積分計算時，非常耗時，先前的國外若干研究均無突破。本文則將地球擾動力分成低頻及高頻兩分力；對一約 200 公里高度衛星，50 階為此兩分力之分界點；低頻分力以嚴密的公式計算；高頻分力則首先以快速富立葉轉換將三個力的分量計算在規則之網格上，視衛星之高低及偏心率，在涵蓋衛星運動的徑向範圍內，組成若干層之網格，在空間任一點的高頻分力則自此多層網格以三維多項內插而言，在一高度 170 公里，偏心率= 0.0007，傾角為 60 度之測試衛星中，吾人使用 50 階為力之分階，考慮地球引力場至球諧函數 360 階。使用分力計算的技術，可使軌道積分比傳統方法增快 145 倍。

表二 計算中華二號衛星使用的模式

模式	
參考橢球體	$a_e=9378136.3m$
協議慣性座標系	J2000
歲差	IAU 1976
章動	IAU 1980
行星星曆	JPL DE-200
地球自轉參數	IERS Bulletin B
GM	$398600.4415 \text{ km}^3/\text{s}^2$
光速	$C=299792.458 \text{ km/s}$

大地位模式	EGM96 展開至 70×70 階
多體 (N-Body)	太陽、月球、水星、金星、火星、木星、土星、天王星、海王星，根據 JPL DE200 行星星曆
固體潮	$K_2=0.3$
海潮	EGM-96 海潮模式
大氣阻力	French DTM 模式
太陽輻射壓	太陽輻射壓 1AU= 1367.2035 W/m <sup>2</sup>
地球輻射壓	Albedo
追蹤站座標	台灣追蹤站：TWD67
板塊運動	Nuvel(NNR)
海水負載	根據 IERS 測站實測值

表三 觀測資料的選擇組合  
(S 波段分別以含 15cm/sec 及 0.16cm/sec 雜訊觀測資料計算)

Case	S-Band (台灣 2 追蹤站)	SLR (台灣 1 追蹤站)	SLR (全球)
1	有	無	無
2	有	有	無
3	有	有	有

表四 各種擾動力模式誤差造成一天的軌道誤差

擾動力	Total RMS(m)	模式
大地位模式	1.4741	JGM2-EGM96
海潮	0.1061	JGM2-EGM96
大氣阻力	0.0620	DTM-Jacchia
合計	1.4792	

#### 四、討論與結論

本研究具體的成果為：成功地以 Geodyn II 模擬計算高精度軌道，並訓練學生熟悉此軟體操作及利用其為衛星大地測量重要的研究工具。本研究亦成功發展一快速軌道積分理論及軟體。與本計畫執行成果之相關著作如下：

1. 陳俊德, 1998。以 Geodyn II 模擬精密軌道計算, 國立交通大學土木工程系碩士論文。
2. 黃金維, 陳俊德, 1998。以 Geodyn II 模擬精密軌道計算, 第十七屆測量學術及應用研討會論文集, pp.330 – 309。

3. Hwang, C. and M. J. Lin, 1998. Fast integration of low orbiter's trajectory perturbed by earth's nonsphericity, Journal of Geodesy, in press.

欲使用本計畫研發出之定軌軟體，請送 e-mail 至：

[hwang@geodesy.cv.nctu.edu.tw](mailto:hwang@geodesy.cv.nctu.edu.tw)

#### 五、參考文獻

AlliedSignal, 1997. Paper presented in NSPO, Hsinchu.

Dow, J. M., R. Zandbergen, S. Martin, M. Romaymerino, R. Piriz, and S. Casotto, 1993. ERS-1 Orbits: the Routine Operation and High Precision Products, Adv. Space Res., Vol.14,

pp.105-114 .

Engelis, T., 1987, Radial Orbit Error Reduction and Sea Surface Topography Determination Using Satellite Altimetry, Rep. No.377, Dept. of Geod. and Surv., Ohio State Univ., Columbus.

Hwang, C. and M.J. Lin, 1998. Fast Integration of Low Orbit's Trajectory Perturbed by Earth's Nonsphericity, Journal of Geodesy, in press.

McCarthy D. D., 1992. IERS Standards, Observatoire de Paris, IERS Tech. Note 13.

McCarthy, J. J. et al., 1993. GEODYN II System Operation Manual, vol. 1-5, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt.

NSPO 1997. <http://www.nspo.gov.tw/>

Tapley, B.D. et al., 1994. Precision Orbit Determination for TOPEX/POSEIDON, J. Geophys. Res., 99, 24383- 24404