

第九章 結論與建議

9.1 本研究之結論

本文提出三個創新的方法來研究地球重力場及其時變，首先利用低軌衛星上 GPS 接收之 SST 資料開發一個相位法，以相位計算低軌衛星與 GPS 衛星之視線加速度，再配合 GPS 精密星曆求解低軌衛星加速度，由於低軌衛星加速度是地位係數之線性函數，因此可用最小二乘法以非常簡單且高效率來反演地球重力場。

其次，以線性解析擾動理論建立 GRACE 雙星之距離變化率 (RR) 與地位係數之嚴密線性表達式，這些表達式是基於 RR 是兩顆衛星重力位差的函數，並利用 EGM96 及 OSU91A 地位係數模擬 GRACE 雙星之距離變化率，開發程式軟體測試解析擾動理論解算地球重力場之方法。

最後再以直接加速度法探求重力場時變，本法是將低軌衛星軌道直接以數值微分得加速度，扣除各種保守擾動力，而非保守擾動力則以加速度儀觀測量替代，並以經驗參數吸收模式未完善之誤差。再以 CHAMP、GRACE 之軌道分析重力場時變及求解平均重力場。現將相關成果及結論說明如下：

- 1、時間之轉換與坐標轉換，在衛星定軌及探求地球重力場都相當重要，因此在處理各種資料時必須明確瞭解各種資料之時間系統及坐標系統，且時間轉換及坐標轉換都必須高精度且正確地轉換，否則將損失定軌及衛星加速度之精度，也將使求解之地球重力場精度降低。
- 2、在相位法中原始相位未經平滑處理求解之 CHAMP 衛星加速度含有大雜訊，但仍可看到頻率與真值相同，尤其在徑向及緯度向更明顯，顯示理論方法是正確的。又原始相位經過 cycle slip 偵測修正及濾波處理求得之加速度再經平滑處理後與真值之差異已大幅降低，其波形已大致吻合，僅振幅大小不同，也許仍存某些系統誤差。平滑後之加速度顯示出重力變化之訊號。
- 3、求解之帶諧地位係數與 EGM96 比較之相對誤差，在 14 階以下，其相對誤差皆在 0.1 以下，一般來說低階的帶諧地位係數之相對誤差都比高階小，本文求解的 \bar{C}_{20} 的相對誤差為 0.00006， \bar{C}_{20} 的相對誤差為 0.0008。亦可發現 $\bar{C}_{15,0}$ ， $\bar{C}_{30,0}$

有很大的誤差，乃是因其為共振項，較難回復。

- 4、以相位法求解之地位係數所得之全球大地起伏與GFZ EIGEN-1S之訊號趨勢相似，顯示相位法理論可行，但求解之大地起伏值與EIGEN-1S之大地起伏值差異之RMS達38.9cm，而直接加速度法求解之大地起伏值與EIGEN-1S之大地起伏值差異之RMS為26.0cm，故相位法仍有改善空間。
- 5、相位法雖然精度不高，但驗證其方法是可行的，此法之優點為不需要龐大程式如GEODYN、不需要CHAMP之精密軌道、不需要解整數週波未定值及地面追蹤站資料，方法簡單又快速。
- 6、本文以解析之軌道擾動理論，模擬利用GRACE K波段量測之距離變化率求解重力場之方法，利用本文開發之理論預估之殘餘距離變化率（Predict residual rate,理論值），一天當中約8小時在振幅與頻率方面有相當程度與真值較吻合，其它時段振幅與頻率較不吻合，由於衛星Mean anomaly變化相當大，嘗試從Mean anomaly著手解決頻率問題，振幅問題應從數值解決（ $\dot{\psi}_{nmpq}$ 值太小），又為解決高階擾動及共振效應，本文以經驗公式，利用5參數及10參數來修正殘餘之距離變化率，其修正後殘餘距離變化率之振幅與理論值吻合程度均較未修正前吻合程度為佳，且以10參數修正較5參數修正為佳。
- 7、分析GRACE 4個月資料發現GRACE_A及GRACE_B的 J_2 變化趨勢幾乎一致，此乃是二者求解之軌道精度相同所致，由此可證明本章之直接加速度法理論方法正確，否則無法得到如此一致性的結果。為與JPL同時段之 J_2 變化比較，吾人將GRACE18個弧段求解之 J_2 變化及JPL之 J_2 變化標準化後，發現二者 J_2 變化趨勢相似度甚高，皆有夏天變大冬天變小之趨勢，但二者約有10天的位移，可能是因為JPL一個月才計算一個 J_2 值，其計算之時間段與吾人計算之時間段未必完全相同。
- 8、以直接加速度法分析CHAMP一年之資料將 J_2 變化以時間序列排序，經與NASA利用SLR同期觀測之 J_2 變化比較，發現二者皆有季節性之變化且趨勢相同，在夏天 J_2 變大，而冬天變小。證明本法可用於研究地球重力場之時變。
- 9、本文利用CHAMP一年之資料所計算之 $\dot{J}_2 = -2.9 \times 10^{-10} / yr$ ，而JPL之 $\dot{J}_2 = -5.4 \times 10^{-11} / yr$ 。可能的原因有：本文所分析之資料僅一年，時間不夠長

，且只採用CHAMP一顆衛星的資料，而NASA是利用SLR技術同時追蹤多顆衛星資料計算所得，又NASA 資料時間長，本研究只反應短時間之變化，在NASA 30年之 J_2 變化，某些時段也可能是 $10^{-10} / \text{yr}$ 數量級。

10、在CHAMP每個月計算之大地起伏與全年解算之大地起伏值的全球差異分布圖，由圖中可發現大地起伏會隨著時間變化，2002年8、9、10、11、12月份發生較大之變化，可能與全球環境變遷、海水質量變化或大氣質量變化有關，值得注意的是，在南美洲及西藏地區的變化相當明顯。另在CHAMP每個月計算重力異常與全年解算之重力異常全球差異分布圖中，同樣在上述之地區與時間段皆與大地起伏差異趨勢相同。綜上分析，本章所提之直接加速度法分析CHAMP衛星資料，可藉由大地起伏及重力異常之變化看到地球重力場隨時間而變之現象。

11、利用GRACE衛星資料每月解算之大地起伏與4個月解算之大地起伏差異之變化，在全球某些地區，如秘魯與智利交界外海、西藏地區、塔里木盆地西邊及巴拿馬群島北方海域（大西洋）等地區，於4個月內都有明顯的變化，尤其在2003年9月、10月差異更明顯，例如9月在上述地區大地起伏大，但10月就變小，而在9月份大地起伏小的地區，10月份反而變大，上述地區大地起伏變化相當明顯且一致。而從重力異常變化，亦可看到重力場之訊號變化。由本研究可知，由CHAMP及GRACE之資料皆可分析重力場時變，也發現GRACE能看較細緻之重力場變化，另一現象是變化較大之區域都是在約北緯 50° ~南緯 50° 之間，尤其在熱帶及亞熱帶地區，而在寒帶及南、北極地區重力場變化訊號較小。

12、本文利用CHAMP資料解算至20階與GFZ解算重力場之大地起伏差值，最大差異約在1公尺左右，差值之RMS值為25cm。最大差值皆發生在南北兩極附近，其它地方大約在20cm左右。又本文解算之重力異常與GFZ重力場之重力異常之差異，最大差異約2.7mGal，差異之RMS值為0.7mGal，最大差異仍是在南北極附近，這是因為CHAMP傾角僅 87° ，在南北極資料會有極溝(Polar gap)問題。

13、本文將CHAMP及GRACE資料聯合解算之重力場時，重力場之精度比個別資料解算時精度較高，在8階以上本文解算之三種模型皆比EIGEN-1S精度高，又EIGEN-1S在20階以內比EGM96精度高，計算平均地球重力場模型，發現大

地起伏精度在空間解析度1000公里時為5 mm，精度比EIGEN-1S及EGM96佳。顯示純由衛星資料反演地球重力場，在重力訊號長波長貢獻極大。

14、在本文求解之WCG_CHAMP、WCG_GRACE及WCG_CHAMP+GRACE三種地球重力場模型之大地起伏誤差，在空間解析度1000km時，分別為6mm、8mm及5mm，可知觀測量愈多，精度愈高，也說明CHAMP及GRACE軌道品質一致。又可證明直接加速度法理論方法正確，用於探討重力場時變極為快速、便利，本法在衛星定軌道及地球重力場之方法中是屬於兩步法之第二步，因此本法解算精度之關鍵在於衛星軌道之精度及其它擾動力模式之正確，未來COSMIC任務中，可以本研究之直接加速度法來探求地球重力場及其時變。

9.2 後續研究之建議

- 1、由於相位法之一次差分所得之精度不佳，後續可進行二次差分之研究，最佳的方法為配合地面站或是GRACE一對衛星，以相位二次差分的方法求解加速度，或許可消除一些系統誤差而改善精度。
- 2、本文提出以解析之軌道擾動理論，模擬利用GRACE K波段量測之距離變化率求解地球重力場之方法。後續可以真實之觀測資料研究。
- 3、本文建議可利用GRACE提供之大氣潮球諧係數，以驗證大氣潮修正模式並應用於地面重力測量改正之研究，以利我國重力測量之發展。
- 4、我國已購置超導重力儀建置重力基準站並加入國際GGP (Global Geodynamics Project) 計畫進行連續觀測，可利用GRACE 每月重力場時變之分析與地面超導重力儀觀測之時變比對之研究，驗證GRACE推求重力時變之精度，但先決條件必須超導重力儀各項改正皆完善。
- 5、我國COSMIC衛星任務之福衛三號上裝載GPS接收儀並無裝載加速度儀，但如果各種擾動力模式化精確且其他運作都正常的情况下，COSMIC的幾何優勢應有可能解算出良好的地球重力場模型，且應比GRIM5、EGM96模型有顯著的改進。
- 6、福衛三號有段時間執行雙星計畫，應用LL-SST衛星追蹤衛星技術，兩顆微衛星彼此間距離約200~400公里，目的在於模擬GRACE衛星推求地球重力場，

進行大地測量的科學研究任務，福衛三號為GRACE任務結束後最重要的重力衛星任務，適合用於觀測地球重力場之時變，故可延續GRACE任務，擔起探求地球重力場時變之重責大任，故在COSMIC任務中應更加重視地球重力場之產品開發，尚待後續之努力。



