

第一章 前言

1.1 研究緣起與背景

地球重力場是地球外部大氣層與內部各物質空間分佈、運動和變化的一種表現，而地球上一切生物皆在這個重力場下活動，也是人類解釋許多自然現象的基礎。在大地測量領域，地球重力場是確定高程坐標、研究地球形狀的主要資訊；在地球物理領域，利用地球重力場觀測資料可以探勘地下礦藏資源；在海洋學領域，重力場資訊能夠輔助計算海洋洋流和其時空變化。所以地球重力場是自然科學中的基礎研究，對大地測量學、地球物理學、地球動力學、地質學和海洋科學等的研究以及空間科學技術的發展有著十分重要的意義[Anderson et al., 1990]。

從地球重力場的資訊中可以推算出地球的形狀和大小。對於測定地球形狀，重力測量要比幾何大地測量更為有利，由重力測量可以求出比較可靠的地球扁率。又大地水準面是高程系統最重要的參考面，是地球重力場中的一個等位面。所以研究地球重力場，是大地測量學的主要科學任務之一。

從地球重力場的資訊中也可以反演出地球內部物質的分佈狀況，可以推測地球內部的豐富內涵，尋找地下礦藏，可以研究地球的內部構造、板塊運動、地幔對流、核幔耦合、地核振蕩、地震和火山爆發等，所以研究地球重力場也是地球物理學之主要任務之一。

由於地球並非剛體，而是帶有一定粘滯性的彈性體，在各種內力和外力的作用下，地球處於運動的狀態。因此，研究和探測地球外部重力場隨時間的變化，能夠為研究地球的動力效應提供必要的觀測資料[Torge, 1989]，然而，要探測重力場之時變，必須要具備長時間的觀測且是分布全球的，當然傳統的地面重力測量是無法達成的，唯一可靠的工具是衛星，因而從 1970 年代初期，科學家大量運用衛星資料來探求地球重力場。

從最近 30 年來在不同軌道高度和傾角的幾十顆衛星之追蹤資料已逐漸改善我們對地球重力場的認識，雖然這些傳統的方法提供我們地球重力場長波長部分正確的訊息，但是對廣泛應用而言，這些資訊在精度及時間解析度上仍嫌不足，這些限制對大部分衛星而言，主要是由於重力訊號隨衛星高度而衰減、追蹤資料之空間覆蓋不足及非引力造成擾動之模式化誤差所造成。

隨著衛星追蹤衛星技術的發展，2000年7月背負著重力衛星任務的 CHAMP 衛星升空，其特性是低軌且近極軌道（傾角 87° ），又首次攜帶直接量測非引力擾動之加速度儀，克服了先前衛星測定地球重力場之限制。2002年3月 GRACE 雙星計畫更是近極軌道（傾角 89° ）幾乎是全球任何地方均可覆蓋，除了攜帶比 CHAMP 衛星更高精度之儀器外，特別的是兩顆衛星各攜帶 K 波段測距系統，直接量測與重力場高度敏感之距離及距離變化率，每 30 天可提供在空間解析度至少 400 km 的一個空前精度之地球重力場。至此，利用衛星研究重力場時變之夢想得以實現，也因為 CHAMP 及 GRACE 衛星追蹤資料之獨特性及空前之精度引發本文研究之動機。

1.2 重力場的研究回顧

16 世紀義大利物理學家 Galileo 利用自由落體原理進行重力測量。17 世紀 Newton 根據萬有引力定律和地球自轉運動，得出地球應該近似為兩極略扁、赤道隆起的旋轉橢球。19 世紀，Stokes 提出了著名的 Stokes 定理，並推導出著名的 Stokes 公式，即利用重力異常的積分計算擾動位和大地起伏。德國的 Bruns 推導大地水準面與地球正常重力場及擾動位之間的數學關係，即著名的 Bruns 公式。20 世紀初，荷蘭的 Vening Meinesz 依 Stokes 公式推出以大地水準面為參考的垂線偏差公式。前蘇聯學者 Molodensky 提出直接利用地面重力觀測值研究地球形狀的理論，但 Molodensky 理論計算相當複雜，而且地面重力資料嚴重缺乏，無法實用[胡明城、魯福，1993]。60 年代美國的 Goodkind 研製超導重力儀，現在 GWR 公司的超導重力儀具有較小的線性漂移，也具有較高的精度和靈敏度，用以建重力基準站。現今的絕對重力儀多是採用自由落體測定絕對重力，如美國的 JILA 重力儀、FG-5 重力儀等，準確度可達幾個 μGal 。相對重力儀精度也可達 $10 \mu\text{Gal}$ ，但在高山地區、海域或兩極地區進行相對或絕對重力測量十分困難，於是船載重力測量、航空重力測量因而發揮了重要作用，但船載重力測量還是相當耗時。空載重力測量是一門可大規模獲取重力資料的技術，因其有不受地形限制的優點，又能填補衛星無法涵蓋之兩級極溝地區，再加上近年來飛機定位技術的突破發展，使得空載重力測量近十年來在全世界得以蓬勃發展。目前世界上已實施過空載重力測量的區域包括了瑞士[Verdun et al., 2003]、日德蘭半島[Kearsley et al., 1998]、克里特島[Olesen et al., 2001]、北極海[Childers et al., 2001] [Forsberg et al., 2003]、波羅地海[Forsberg and Solheim, 2000]、南極[Bell et al.,

1999]、格陵蘭島[Olesen et al., 2000]、澳洲[Sproule et al., 2000]、加拿大落磯山脈[Wei and Schwarz, 1998]、加拿大東部[Novak et al., 2003]、馬來西亞、外蒙古及台灣等地，絕大部分是在歐洲地區。但全球之重力資料還是相當缺乏，尤其是海洋地區，唯一之方法只有靠衛星。為此，美國、法國等相繼實施了多個衛星測高計劃，如 Geos-3、Seosat、Geosat、ERS、Topex/Poseidon、GFO (Geosat Follow On)、Jason-1、EnviSat-1 (Environmental Satellite, EnviSat)、WSOA (Wide Swath Ocean Altimeter) 等，採集了大量海洋衛星測高資料。衛星測高資料所包含的資訊主要用於海洋動力學現象的探測，諸如海平面高度、海洋重力場、海面浪場、風場、流場、潮汐、溫度場以及海冰監測等，比由純重力測量資訊要豐富，因為衛星測高資料所包含的資訊中含有大量的高頻成分，可用來解算和改善地球重力場之中、短波長訊號。

科學家收集了包括陸地重力測量、船載重力測量、空載重力測量、衛星追蹤資料及衛星測高資料，同時展開地球重力場中、短波場之探討。隨著衛星大地測量的發展，地球重力場模型的精度和解析度不斷提高；同時，高精度的地球重力場模型也不斷地提高衛星定軌精度。美國 GSFC (Goddard Space Flying Center, NASA) 利用衛星追蹤資料或地面重力資料計算得 GEM (Goddard Earth Model) 系列重力場模型。而提供 TOPEX/POSEIDON 定軌之用的重力場模型 GEM T3 完全到 50 階次，完全可以滿足 0.1 m 的定軌精度要求。美國德州大學奧斯汀分校太空研究中心 (Center for Space Research, CSR) 利用衛星追蹤、衛星測高和地面重力觀測資料，建立了 TEG 系列重力場模型[Tapley et al., 1996]。美國 OSU (Ohio State University) 提出了 OSU 系列重力場模型，如 OSU91A[Rapp and Pavlis, 1990][Rapp et al., 1991]。法國 GRGS (Groupe de Recherche de Géodesie Spatiale) 和德國 DGFI 聯合研製了 GRM 系列模型[Wenzel, 1985]。法國國家空間研究中心 CNES (Centre National d'Etudes Spatiales)、GRGS 與德國慕尼黑工業大學和 DGFI 合作推算出 GRIM 系列重力場模型[Reigber et al., 1984]。美國 GSFC、馬里蘭大學、CSR、Hughes STX 公司、OSU 和法國 CNES 等六個機構聯合研製了 JGM (Joint Gravity Model) 系列模型，提供 TOPEX/POSEIDON 衛星精密定軌之用[Nerem et al., 1994]。德國 Hanover 大學研製了 GPM 系列模型。其中，EGM96[Lemoine et al., 1998]和 GRIM5 為應用較為廣泛的兩種重力場模型。

1.3 衛星定軌與重力方法探討

隨著衛星時代的來臨，衛星在大地測量上有四大用途：定位、由軌道求重力場、地球自轉參數及遙感探測平台[Rummel, 2001]。所以衛星大地測量學是研究利用人造衛星解決大地測量學問題的學科，是現代大地測量學的重要組成部分。衛星大地測量學中，用觀測衛星的方法要解決的問題，按其性質基本上可分為：

1. 確定地面點或衛星的位置（定位）
2. 研究地球形狀和地球重力場
3. 研究地面點位置和地球重力場隨時間的變化

衛星大地測量學和大地測量學所要解決的問題是相同的，但與傳統的大地測量方法相比，在衛星大地測量快速的發展下能在短期內以較高的精度使上述問題得到解決[Reigber, 1989]。衛星大地測量以原理上可分為幾何法和動力法。將衛星作為高空目標，由幾個地面站同步觀測，即可按三角三邊測量方法計算這些地面點之間的相對位置。這種方法不涉及衛星的運動，稱為衛星大地測量幾何法。如果把衛星作為運動的天體，並利用衛星離地球較近的特點，將它作為地球引力場的探測器進行軌道擾動觀測，就可以推求地球形狀、地球自轉參數和地球引力場參數，同時可以精確計算衛星軌道和確定地面觀測站的地心坐標。這種方法稱為衛星大地測量動力法[胡明城、魯福，1994]。

衛星定軌是衛星任務執行的關鍵，綜合利用天體力學、天文動力學、數學、物理學等描述人造地球衛星軌道。由於大多數衛星都位於 300~1500 km 高度的近圓軌道上運行[Montenbruck and Gill, 2001]，而重力場與衛星定軌息息相關，二者相輔相成。軌道愈低，愈能偵測到重力訊號，但由於大氣阻力影響，衛星軌道誤差較大，低軌衛星壽命較短。但軌道較高，衛星對地球重力場的敏感度就降低，為了獲得最大的地面覆蓋和較高的解析度，衛星設計時傾角較大且在 500~1500 km 高度的極軌上運行。為了獲得數量較多、精度較高的衛星追蹤觀測，先後有照相、SLR（Satellite Laser Ranging）、DORIS（Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite）、GPS（Global Po）、PRARE（Precise Range and Range Rate Experiment）等衛星追蹤技術。

衛星上載有 GPS 接收儀之定軌或反演重力場技術與其他衛星追蹤技術的重要差別是：同一時刻有多個接收儀（地面和星載）同步觀測多顆 GPS 衛星。因此，由單個觀測可組成一次差（Single Difference）、二次差（Double Difference）

、三次差 (Triple Difference) 等。通常有兩種方法利用 GPS 技術進行低軌衛星精密定軌：即兩步法和一步法[朱聖源、施闢，2003]。茲分述如下：

1.兩步法：第一步先由 IGS (International GPS Service) 地面站求 GPS 衛星軌道，也可直接利用 IGS 提供的 GPS 精密軌道；第二步利用求解或已知的 GPS 衛星軌道進行 LEO (Low Earth Orbit) 衛星定軌。第二步常用的方法有零次差法 (Zero Difference) 和二次差法 (Double Difference)。

(1) 零次差法採用 GPS 的原始觀測量進行單點定位，與 IGS 地面站無關，但需要已知 GPS 衛星時錶誤差，且整數週波未定值 (Ambiguity) 只能作為實數進行求解。求解每個觀測時刻 LEO 衛星的三維坐標，在不進行數值濾波時，其定軌精度可到 10~20 公分。定位方式又可分 (a) 幾何法又稱動態法 (Kinematic)：直接對單點定位結果進行數值濾波，精度優於 10 公分；(b) 半動力法 (Reduced Dynamic)：採用單點定位的 LEO 衛星坐標值，做為“虛擬觀測量”，進行動力法或半動力的求解。JPL (Jet Propulsion Laboratory) 即採用這種方法；(c) 完全動力法 (Dynamic)：不預先做單點定位，直接用零差觀測量，用動力學積分，求解軌道元素和其他動力學參數。定軌精度取決於重力場模型，也可達幾公分。這一方法最適合解重力場參數，GFZ、UTX 即採用這種方法。

(2) 二次差法不需要已知 GPS 衛星時錶誤差和也不需要解 LEO 衛星的時錶誤差，但需要利用 IGS 地面站的 GPS 觀測資料，組成二次差觀測量，解算整數週波未定值。二次差法存在的問題是地面站的大氣對流層改正比較困難，可利用地面氣象資料加模式改正，誤差可達 10 公分，亦可用 IGS 發佈的產品 (TRP 檔) 進行改正。利用二次差法進行定軌也有動態法、半動力法和等效觀測法。Bernese 軟體採用的就是動態法，精度可達公分級，但無法解算地球重力場模型。德國慕尼黑科技大學 (Technical University of Muenchen) 修改 Bernese 軟體，使 Bernese 5.0 版可做 LEO 衛星動力學解算，定軌精度可到 2~3 公分。並可用動態法 (Kinematic) 解重力場，但解得的重力場精度不高 [Svehla and Rothacher, 2003]。Geodyn II 軟體可採用等效觀測法進行定軌，即在預處理將 GPS 觀測量換算成其他技術 (如雷

射)的“等效觀測量”，再對 LEO 衛星定軌同時可求解地球重力場模型，但 GPS 預處理中仍然不能解出全部的整數週波未定值和周波脫落，部分整數週波未定值必需作實數解。

2.一步法：是採用 LEO 衛星以及地面站的 GPS 原始觀測資料，而其他資訊如 GPS 軌道、衛星時錶誤差、地面站大氣折射改正等都無需預先知道，將 LEO 衛星作為“運動的測站”與其他地面站一起求解，解算的參數包括 GPS 衛星軌道、LEO 衛星軌道、地面站坐標、大氣折射參數、EOP 參數等。目前只有 GFZ 有能力採用這種方案進行 LEO 衛星的定軌。其優點是無依賴性，且 LEO 衛星定軌精度高於其他各種方法；另對 GPS 定軌及地面站坐標減小系統誤差，提升精度。缺點是軟體設計相當複雜且計算工作量巨大，對電腦 CPU 要求較高。

利用衛星作重力測量其基本方法為在定軌過程中將完全正規化地位係數 $\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$ 視為未知數解，觀測方程式中對 $\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$ 求偏導數係用數值法，而不是用解析法或半解析法。在上一世紀，由於受衛星追蹤技術、衛星高度和傾角等條件的限制，無法只由一顆衛星的追蹤觀測資料來求解一個完整的重力場，只能求部分參數，因此，要採用多顆衛星、多種觀測技術、幾十年的觀測資料進行綜合處理，每顆衛星有若干年的觀測資料，不能把若干年作為一個長弧段，一方面是受電腦 CPU (硬體) 的限制；另一方面弧段長雖對提取重力場資訊有利，但定軌誤差太大，使重力場估值的精度降低。因此通常要分割成若干子弧段，子弧段長度依衛星而不同，每一顆的每一個子弧段單獨形成法方程組，最後把所有子弧段的法方程組累加。但由於種種因素，只有低階係數及部分高階“共振”項，才能有較高的精度。如要全面解 70 階，甚至更低階，法方程組就會出現秩虧或病態，因此要在法方程式對角線上加約制條件，即所謂的 Kaula 約制條件。以計算 GRIM5 模型為例，在第 6 階後就開始加入 Kaula 約制條件[朱聖源、施闖，2003]。

除了純由衛星資料解算重力場模型外，還可加入地面重力觀測資料(如 NIMA 的重力資料)，整合成一個高階的重力場模型(如 360 階)，所得的重力場模型，中、長波長部分主要是衛星追蹤資料的貢獻，短波長部分則是地面重力測量的貢獻，中間部分則是二者的加權組合[朱聖源、施闖，2003]。GRIM5 和 EGM96 是 20 世紀末衛星重力測量成果的高峰，在過去 30 年左右的地球重力場發展過程

中，展開階數從 3 階提高到 70 階，精度從 10^{-7} 提高到 10^{-9} 。這歸功於近 30 年衛星觀測資料的累積及多種觀測技術的綜合應用，其他擾動模式及觀測量改正模式的不斷修正。

其他衛星重力測量方法有能量積分法[Jekeli, 1999]、解析法、半解析法等，能量積分法需已知衛星精密軌道及非保守力，在CHAMP之前，只能用這些方法來求解 J_2 、 J_3 等少數係數，在CHAMP之後，雖可解算到較高階數，但精度要比動力法低一個量級左右，僅作某些方面的學術研究、教學等應用[Zhu and Shi, 2003]。

目前衛星定軌及重力場計算的軟體主要有下列幾種[Reigber, 1989][郭金運, 2004]：

1. GEODYN II，NASA，美國。
2. UTOPIA，CSR，Texas University，美國。
3. GIN/DYNAMO，GRGS/CNES，法國。
4. DOGS，DGFC，德國。
5. EPOS，GFZ，德國。



1.4 衛星追蹤衛星技術發展

應用地面對衛星觀測的數據研究地球重力場已取得很大的進展，然為了長時間由地面觀測衛星以得到良好的資料覆蓋，衛星就必須在較高軌道上，但高軌道衛星對於地球重力場的訊號較難分辨出來。因此對於測定地球重力場的目的而言，則要求衛星的軌道要低，才能更加細微的觀察到重力場的變化，但因地面站所能觀測到低軌衛星的軌跡弧段很小。要進行全球追蹤和良好的資料覆蓋，必須設立許多地面站，這是一個難題，因此科學家急於尋求解決之道，即是衛星追蹤衛星技術（Satellite-to-Satellite Tracking, SST）。

目前所提出的衛星追蹤衛星測量(SST)有兩種形式。第一種是 Baker 於 1960 年提出即由高軌衛星追蹤低軌衛星，稱為高一低 SST (High-Low SST, HL-SST)；另一種是 Wolff 於 1969 年提出在相同的低軌上的兩顆衛星的連續地相互追蹤，稱為低—低 SST (Low-Low SST, LL-SST)。衛星追蹤衛星測量有下列優點[胡明城、魯福，1994]：

1. 衛星之間可以連續追蹤；

2. 避免對流層折射影響；
3. 衛星間的距離變率直接敏感到地球重力場的細部結構；
4. 衛星可以保持良好的幾何結構。

高一低型衛星追蹤衛星 (HL-SST) 中之高軌衛星主要受地球引力場低階球諧係數的影響，受大氣阻力影響小，因而可以由地面追蹤站精確測定其軌道。低軌衛星的軌道則由高軌衛星連續追蹤並以較高的精度測定。由於低軌衛星是在低的軌道上運行，對地球引力場有較大的敏感度。當低軌衛星在高軌衛星星下點附近時，二衛星之間的距離變率主要受地球重力場影響，因此用都卜勒測速儀測定二衛星之間的距離變率，據以推算地球重力場。

低—低型衛星跟蹤衛星 (LL-SST) 是二個質量、大小和形狀完全相同的低軌衛星在同一個軌道運行，二星相距約 200 公里，裝載 K 波段測距系統，不斷地測定二衛星之間的距離及距離變率，由於這二個衛星總是一前一後在不同地區出現，在任一瞬間，二個衛星下點處重力異常的變化，就必然會在它們之間的距離及距離變化率上反映出來。利用測得的二衛星之間的距離變化率，就可以確定地球重力場。

1960 年 Baker 根據建立軌道資料中繼系統的設想和 Apollo 計畫軌道測定的需要，首先提出 LL-SST 觀念，即由幾顆高軌衛星追蹤一顆低軌衛星[胡明城、魯福，1994]。1975 年 4 月，美國國家太空總署 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 進行了首次 HL-SST 試驗，用 ATS-6 作為高軌衛星，以軌道高度為 800 km 的 GEOS-3 作為低軌衛星，由此求得的重力異常精度在衛星高度上達到 mGal 級精度。其追蹤資料用於改進太平洋地區的重力場[Marsh et al., 1981]，並用於改進非洲和印度洋地區的 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 平均重力異常。1975 年 7 月又進行了一次試驗，也是以 ATS-6 衛星作為高軌衛星，以軌道高度約為 240 km 的 Apollo-Soyuz 作為低軌衛星，採用 Doppler 方法測量距離變化率。其追蹤資料獲得南太平洋地區 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 重力異常。HL-SST 改進人們對地球重力場的認識。但是由於技術上仍無法完全克服，重力場的精度提升效益並不大，而且從幾何上來說，HL-SST 與地面站追蹤並無很大的差別，因此必須改變衛星追蹤衛星之幾何結構，因而產生 LL-SST 的構想。

1969 年 Wolff 年首先提出 LL-SST 的理論[Wolff, 1969]。1975 年 7 月，NASA 進行了 LL-SST 試驗，試驗衛星為 Apollo 和 Soyuz，其軌道高度約為 225 km，但

任務失敗。1978 年，ESA 就提出了一項 SLALOM 方案，設想利用太空梭對一低軌衛星進行雷射追蹤飛行，在南北緯度 50° 之間地區的全球覆蓋。在 80 年代初，美國 NASA 提出了 GRAVSAT 計畫，後改為 GRM 計畫，該計畫是通過在低軌（軌道高度為 160 km）、近圓、近極軌道上的兩顆衛星連續約 6 個月的衛星追蹤衛星，目標是獲得在空間解析度 100 km 時重力異常及大地起伏精度分別可達 2.5 mGal 和 7 cm [Colombo, 1984]，可惜精度無法提升很多，原因是很多技術無法克服。儘管地球重力場的階次可展開至高階，但由於追蹤資料精度、解析度和覆蓋等因素，利用衛星推求之重力場精度仍無法完全滿足某些學科的要求。直到 21 世紀初，在 NASA 和 ESA (European Space Agency) 的努力下，CHAMP 及 GRACE 重力衛星之升空，開創了衛星重力測量的新紀元，也因為 CHAMP 及 GRACE 低軌衛星的特性，使得地球重力場的精度及空間解析度的提升已是不可言喻，且任務壽命各長達 5 年，使其具備另一項任務—觀測地球重力場之時變之能力。地球重力場之時變研究，可追溯到 1970 年代末，利用 SLR、DORIS 等技術追蹤衛星開始持續探討低階係數之變化。1980 年代末期，超導重力測量及絕對重力測量也加入了觀測地球重力場時變行列，雖然精度高，但僅限於局部的某一點。1990 年代中，GPS 全面進入成熟運作階段，也加入了探討 J_2 的行列，隨之而來即是 CHAMP 及 GRACE 衛星，尤其是 GRACE 更是背負著探求重力場時變的重責大任。ESA 的 GOCE 衛星攜帶重力梯度儀也計畫於 2006 年發射。臺灣和美國聯合進行的利用 GPS 技術研究大氣層的衛星任務，稱為福爾摩沙三號衛星任務 COSMIC，將於 2005 年執行。此四種衛星任務分別採用 HL-SST、LL-SST、SGG (Satellite Gravity Gradient) 及 HL-SST 方式探測地球重力場，其中 GRACE 和 GOCE 也同時具備 HL-SST 功能，至此衛星重力測量技術發展已達空前之盛況。將於第三章專章介紹此四種衛星任務。

1.5 本文研究方法與內容概述

本文針對 CHAMP 及 GRACE 衛星提出三個創新的方法來探求地球重力場並探討分析重力場之時變，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 雙星之距離變化率與地位係數之嚴密

線性表達式，這些表達式是基於 GRACE 雙星之距離變化率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。茲將本文內容概述如下：

第一章：說明本文研究之動機、重力場研究之回顧及衛星重力場技術之發展。

第二章：說明衛星運動學中很重要的時間系統與坐標系統。

第三章：詳細介紹目前 CHAMP 及 GRACE 衛星之特性、目的及產品，並說明即將升空之 GOCE 及 COSMIC 衛星任務。

第四章：說明衛星定軌及計算重力場關鍵之各種擾動力，及本文計算之各種擾動力數量級，最後再詳述人類第一次將加速度儀裝置於衛星上，以測定衛星表面所受到擾動力，並說明本文處理加速度儀資料之方式及其數量級。

第五章：提出一個新的方法即相位法，利用衛星上 GPS 接收之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，利用低軌衛星加速度是地位係數之線性函數計算重力場，並推導應用於 GRACE 衛星之相位法公式。

第六章：提出以解析軌道擾動理論，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。

第七章：提出一直接法，以 Bernese 解算之低軌衛星軌道，直接求解重力場時變之簡便、快速之方法，並以 CHAMP、GRACE 之軌道分析重力場時變之可能性。

第八章：說明 CHAMP、GRACE 目前成果，並以累加法方程式方法聯合 CHAMP、GRACE 衛星不同時段之觀測量，求解一靜態重力場並分析其精度。

第九章：說明本研究之心得與提出後續研究之建議。