

# 目 錄

中文摘要 .....	i
英文摘要 .....	iii
誌謝 .....	v
目錄 .....	vii
表目錄 .....	x
圖目錄 .....	xii
第一章 前言 .....	1
1.1 研究緣起與背景 .....	1
1.2 重力場的研究回顧 .....	2
1.3 衛星定軌與重力方法探討 .....	4
1.4 衛星追蹤衛星技術發展 .....	7
1.5 本文研究方法與內容概述 .....	9
第二章 時間系統與坐標系統 .....	11
2.1 時間系統 .....	11
2.2 坐標系統 .....	20
第三章 CHAMP、GRACE 任務簡介 .....	35
3.1 CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload)簡介 .....	35
3.2 GRACE (Gravity-Recovery and Climate Experiment)簡介 .....	42
第四章 衛星軌道擾動力分析 .....	53
4.1 低軌衛星的保守擾動力 .....	54
4.2 低軌衛星的非保守擾動力 .....	73
4.3 其他非保守擾動力 .....	75
4.4 經驗加速度 .....	76
4.5 CHAMP、GRACE 衛星加速度儀量測之非保守擾動加速度 .....	77

4.6	加速度儀應用之探討 .....	83
第五章	以相位法推求地球重力場 .....	85
5.1	相位法之理論 .....	85
5.2	利用相位法推求衛星之加速度 .....	91
5.3	CHAMP 衛星觀測量分析 .....	94
5.4	利用衛星加速度求解地位模式 .....	106
第六章	以 GRACE 衛星距離變化率求解地球重力場：軌道解析理論之應用... ..	121
6.1	基本原理 .....	121
6.2	線性化建立觀測量與未知數關係 .....	124
6.3	軌道坐標與慣性坐標之轉換及其偏導數 .....	131
6.4	求解地位係數 .....	142
6.5	高階及共振效應 .....	144
6.6	GRACE 資料及計算結果分析 .....	144
第七章	以直接加速度法分析地球重力場時變：CHAMP 及 GRACE 衛星任務為例 .....	149
7.1	重力場時變之意義及研究回顧 .....	149
7.2	研究方法及實驗數據 .....	151
7.3	結果與分析及低階之地位係數之時變 .....	156
7.4	由大地起伏及重力異常探討重力場之時變 .....	163
7.5	低階係數變化之探討 .....	174
第八章	地球重力場之比較分析 .....	177
8.1	重力場模型之表達方式 .....	177
8.2	CHAMP 及 GRACE 重力場模型之比較 .....	178
8.3	本研究解算之平均地球重力場 .....	187
第九章	結論與建議 .....	203
9.1	本研究之結論 .....	203

9.2 後續研究之建議 .....	206
參考文獻 .....	209
作者簡歷 .....	217
學術著作目錄 .....	219



## 表目錄

表 2-1	常用振盪器特性比較.....	17
表 2-2	CIS 定義.....	24
表 2-3	CTS 定義.....	27
表 2-4	RTN 定義.....	31
表 2-5	SBF 定義.....	31
表 2-6	IFX 定義.....	32
表 4-1	衛星受到各種擾動力的影響.....	53
表 4-2	常見由太陽或月亮引起之海潮模式.....	59
表 4-3	潮汐對固體潮球諧係數修改之參數值.....	63
表 4-4	STAR 與 SuperSTAR 比較.....	79
表 4-5	CHAMP 所載 STAR 加速度儀的技術參數.....	79
表 4-6	不同方式處理非保守擾動力對定軌精度之比較.....	84
表 5-1	原始相位求得之加速度未經過濾波處理與真值之差異.....	99
表 5-2	原始相位經過濾波處理求得之加速度與真值之差異.....	99
表 5-3	經過週波脫落修正及濾波處理之相位求得之加速度再經濾波處理後與真值之差異.....	99
表 5-4	經過週波脫落修正及濾波處理之相位求得之加速度再經濾波處理後與真值經濾波處理後之差異.....	100
表 5-5	經過週波脫落修正及濾波處理之相位求得之加速度再經濾波處理後減去差值的平均值後與真值經濾波處理後之差異.....	100
表 7-1	不同階數及不同參數求解之 $\bar{C}_{20}$ 的偏值及中誤差.....	158
表 7-2	GHAMP 全部弧段解算之 $\bar{C}_{20}$ 值與各弧段 $\bar{C}_{20}$ 之平均值之差異.....	159
表 7-3	本文 WCG_GRACE 模型大地起伏單月平均值與四個月平均值的差值比較結果.....	165

表 7-4	本文 WCG_GRACE 模型重力異常單月平均值與四個月平均值的差 值比較結果 .....	165
表 7-5	各種地球重力模型之 $\bar{C}_{00}, \bar{C}_{10}, \bar{C}_{11}, \bar{S}_{11}, \bar{J}_2, \bar{J}_3, \bar{J}_4$ 比較 .....	176
表 8-1	重力場展開之最大階數與波長分類及空間解析度關係 .....	178
表 8-2	本文 WCG_CHAMP 模型與 CHAMP 公布模型的大地起伏差值比較 結果 .....	196
表 8-3	本文 WCG_CHAMP 模型與 CHAMP 公布模型的重力異常差值比較 結果 .....	196
表 8-4	本文 WCG_GRACE 模型與 GFZ 公布模型的大地起伏差值比較結果 .....	201
表 8-5	本文 WCG_GRACE 模型與 GFZ 公布模型的重力異常差值比較結果 .....	201
表 8-6	各種重力場模型空間解析度及精度之比較 .....	202



## 圖目錄

圖 2-1	時間誤差對於衛星大地測量之影響.....	12
圖 2-2	恒星時的定義.....	14
圖 2-3	天球示意圖.....	20
圖 2-4	天球直角坐標系與天球球面坐標系.....	22
圖 2-5	歲差影響.....	23
圖 2-6	章動影響.....	24
圖 2-7	Kepler 軌道元素與慣性坐標系.....	26
圖 2-8	直角坐標系與大地坐標系關係.....	28
圖 2-9	地極平面直角坐標系.....	29
圖 2-10	SBF 與 IFX 坐標系統.....	32
圖 3-1	CHAMP 衛星任務發展歷程.....	36
圖 3-2	CHAMP 衛星任務合作組織.....	37
圖 3-3	CHAMP 衛星前視圖 (含酬載儀器).....	38
圖 3-4	CHAMP 衛星後視圖 (含酬載儀器).....	39
圖 3-5	CHAMP 衛星主體結構及儀器配置.....	39
圖 3-6	GRACE 衛星於太空中執行任務示意圖.....	43
圖 3-7	GRACE 衛星內部構造.....	44
圖 3-8	GRACE 衛星底部結構.....	45
圖 3-9	GRACE 衛星頂部結構.....	45
圖 3-10	GRACE 資料處理流程.....	47
圖 3-11	GRACE 團隊資料處理分工.....	48
圖 4-1	CHAMP 衛星 2001 年 5 月 21 日所受多體擾動加速度.....	57
圖 4-2	CHAMP 衛星 2001 年 5 月 21 日所受海潮擾動加速度.....	61
圖 4-3	CHAMP 衛星 2001 年 5 月 21 日所受固體潮擾動加速度.....	64

圖 4-4	垂直積分法所用徑向分量 $r$ 示意圖 .....	69
圖 4-5	CHAMP 衛星 2001 年 5 月 21 日所受相對運動擾動加速度.....	72
圖 4-6	CHAMP 衛星計畫軌道高度.....	76
圖 4-7	加速度儀之原始觀測量.....	80
圖 4-8	加速度儀之原始觀測量經洛倫茲力加速度及 X 方向 (IFX) 改正後之加速度.....	81
圖 4-9	加速度儀之原始觀測量經洛倫茲力加速度、X 方向 (IFX) 改正、尺度因子及偏移改正後之加速度.....	81
圖 4-10	旋轉至 SBF 坐標系統之加速度.....	82
圖 4-11	旋轉至 CIS 坐標系統之加速度.....	82
圖 4-12	旋轉至地固坐標系 $(r, \varphi, \lambda)$ 之加速度.....	83
圖 5-1	CHAMP 衛星同時觀測兩顆 GPS 衛星空空中一次差示意圖 .....	90
圖 5-2	CHAMP 衛星與 GPS 衛星間之距離、視線速度與加速度的示意圖 ....	92
圖 5-3	計算衛星加速度之流程.....	97
圖 5-4	由相位訊號經濾波處理與未經濾波處理求得之視線加速度比較上圖為 CHAMP 對 GPS 1 號衛星，下圖為對 2 號衛星.....	101
圖 5-5	由一次差原始相位求解之加速度 (共 3 個方向) 未經過濾波處理與真值之差異.....	102
圖 5-6	經過週波脫落修正及濾波處理之相位求得之加速度再經濾波處理後與真值之差異.....	103
圖 5-7	經過週波脫落修正及濾波處理之相位求得之加速度再經濾波處理後與真值經濾波處理後之差異.....	104
圖 5-8	經過週波脫落修正及濾波處理之相位求得之加速度再經濾波處理後減去差值的平均值後與真值經濾波處理後之差異.....	105
圖 5-9	加權約制求解之低階帶諧地位係數與 EGM96 之差異 .....	113
圖 5-10	未加權約制求解之低階帶諧地位係數與 EGM96 之差異 .....	114
圖 5-11	七天 CHAMP 快速軌道推求之重力場計算全球大地起伏等值圖 $30^{\circ} \times 30' 50$ 階 .....	115

圖 5-12	EGM96 重力場計算全球大地起伏等值圖 30'*30' 50 階.....	115
圖 5-13	本章求解之地球重力場計算之大地起伏 (n=20) .....	116
圖 5-14	GFZ EIGEN-1S 地球重力場計算之大地起伏 (n=100) .....	116
圖 5-15	本章求解之大地起伏與 EIGEN-1S 求解之大地起伏之差異 .....	117
圖 5-16	加權約制求解之帶諧地位係數與 EGM96 之相對誤差 .....	119
圖 5-17	利用 CHAMP 七天資料求解地球重力場之大地起伏誤差與 EGM96 之比較.....	119
圖 6-1	衛星追蹤衛星之幾何關係.....	122
圖 6-2	克卜勒軌道面坐標系 .....	132
圖 6-3	模擬的 GRACE-A 衛星七天的軌跡.....	146
圖 6-4	模擬一天 GRACE-A 和 GRACE-B 兩衛星的距離.....	147
圖 6-5	利用 EGM96 地位係數模擬之 GRACE-A、GRACE-B 軌道之距離 變化率 (range rate, $\dot{\rho}_{12}$ ) .....	147
圖 6-6	利用 EGM96 和 OSU91A 地位係數模擬之 GRACE-A、GRACE-B 軌道之距離變化率差異 (residual range rate, $\Delta\dot{\rho}_{12}$ ) 與本文理論預 估之距離變化率差異的比較.....	148
圖 6-7	利用經驗公式 10 參數、5 參數修正 residual range rate 與修正前之 比較.....	148
圖 7-1	本文由軌道求解地位係數之流程圖.....	155
圖 7-2	自 2003 年 7 月至 2003 年 10 月 GRACE-A 與 GRACE-B 觀測之 $J_2$ 變 化.....	160
圖 7-3	自 1976 年至 2004 年 NASA 利用 SLR 觀測之 $J_2$ 變化.....	160
圖 7-4	自 2002 年 3 月至 2004 年 3 月 NASA 利用 SLR 觀測之 $J_2$ 變化.....	161
圖 7-5	自 2002 年 3 月至 2004 年 3 月本文計算 CHAMP 之 $J_2$ 變化.....	161
圖 7-6	自 2002 年 3 月至 2004 年 3 月本文計算 CHAMP 之 $J_2$ 變化與 NASA 利用 SLR 觀測之 $J_2$ 變化之比較圖 .....	162
圖 7-7	自 2003 年 7 月至 2003 年 10 月 NASA 利用 SLR 觀測之 $J_2$ 變化.....	162
圖 7-8	自 2003 年 7 月至 2003 年 10 月 GRACE 觀測之 $J_2$ 變化 .....	163
圖 7-9	CHAMP 每月解算之大地起伏與全年一起解算之大地起伏差異之 變化.....	167



圖 7-10	CHAMP 每月解算之重力異常與全年一起解算之重力異常差異之變化.....	169
圖 7-11	GRACE 每月解算之大地起伏與 4 個月一起解算之大地起伏差異之變化.....	170
圖 7-12	GRACE 每月解算之重力異常與 4 個月一起解算之重力異常差異之變化.....	171
圖 7-13	GRACE 每月解算之大地起伏與 4 個月解算之大地起伏差異之等值圖.....	173
圖 8-1	CHAMP 資料解算之重力場模型大地起伏誤差.....	180
圖 8-2	CHAMP 重力場模型大地起伏累積誤差.....	180
圖 8-3	GRACE02S 與 EIGEN-03S EGM96 精度比較.....	181
圖 8-4	純由 GRACE 資料解算之重力場模型大地起伏誤差.....	182
圖 8-5	純由 GRACE 資料解算之重力場模型大地起伏累積誤差.....	182
圖 8-6	CG01C 結合的地面資料全球區域分布.....	184
圖 8-7	CHAMP、GRACE 結合地面資料大地起伏誤差.....	184
圖 8-8	CHAMP、GRACE 結合地面資料大地起伏累積誤差.....	185
圖 8-9	GGM01S 與 EGM96 各計算至 70 階所造成之大地起伏誤差.....	186
圖 8-10	利用 GGM02S 70 階次之變方—協變方預估大地起伏誤差全球分布圖.....	187
圖 8-11	本文解算之重力場與 CHAMP 重力場大地起伏誤差.....	188
圖 8-12	本文解算之重力場與 CHAMP 重力場大地起伏累積誤差.....	189
圖 8-13	本文解算之重力場與 CHAMP 重力場帶諧係數相對誤差.....	189
圖 8-14	EIGEN-1S 重力場模型展開至 100 階之大地起伏（上圖）及重力異常（下圖）.....	191
圖 8-15	本文利用 CHAMP 資料計算之重力場模型展開至 20 階之大地起伏（上圖）及重力異常（下圖）.....	192
圖 8-16	本文利用 CHAMP 資料計算之重力場模型與 EIGEN-01S 各展開至 20 階之大地起伏差值（上圖）及重力異常差值（下圖）.....	193
圖 8-17	本文利用 CHAMP 資料計算之重力場模型與 EIGEN-2 各展開至 20 階之大地起伏差值（上圖）及重力異常差值（下圖）.....	194
圖 8-18	本文利用 CHAMP 資料計算之重力場模型與 EIGEN-03S 各展開至	

	20 階之大地起伏差值（上圖）及重力異常差值（下圖） .....	195
圖 8-19	EIGEN-GRACE01S 重力場模型展開至 100 階之大地起伏（上圖）及重力異常（下圖） .....	197
圖 8-20	本文利用 GRACE 資料計算之重力場模型展開至 20 階之大地起伏（上圖）及重力異常（下圖） .....	198
圖 8-21	本文利用 GRACE 資料計算之重力場模型與 EIGEN-GRACE-01S 各展開至 20 階之大地起伏差值（上圖）及重力異常差值（下圖） .....	199
圖 8-22	本文利用 GRACE 資料計算之重力場模型與 EIGEN-GRACE-02S 各展開至 20 階之大地起伏差值（上圖）及重力異常差值（下圖） .....	200

