

國 立 交 通 大 學

土木工程學系
博士論文

以雷達干涉技術偵測地表變形之研究
Detecting terrain deformation with radar interferometry



研究生：謝嘉聲
指導教授：史天元 教授

中華民國九十五年七月

以雷達干涉技術偵測地表變形之研究

Detecting terrain deformation with radar interferometry

研 究 生 : 謝 嘉 聲

Student: Chia-Sheng Hsieh

指 導 教 授 : 史 天 元

Advisor: Dr. Tian-Yuan Shih

國立交通大學

土木工程學系



A Dissertation
Submitted to Department of Civil Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Doctor of Philosophy
in
Civil Engineering
July 2006
Hsinchu, Taiwan, Republic of China.

中華民國九十五年七月

以雷達干涉技術偵測地表變形之研究

研究生：謝嘉聲

指導教授：史天元 教授

國立交通大學 土木工程學系

摘要

合成孔徑雷達干涉技術(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)為利用不同時間或不同位置的雷達天線所獲得的兩幅或多幅複數影像，再藉由相位值的差異量來量取地表的三維資訊。目前主要的應用包含數值地形模型(Digital Elevation Model, DEM)的產生、地震變形量(Deformation)的研究、地層下陷(Subsidence)的量測及火山監控、冰川漂移等。

台灣地區因位於地震帶上，地震發生的頻率相當頻繁，特別是一些較大規模的地震，常造成地表的嚴重變形現象，而威脅到人民生命財產的安全，如何有效的探討及監控其變形狀況，遂為一重要的研究課題。在變形量的監控上，傳統所使用方法的是以精密測量設備來進行，但因受限於儀器的精度及人力、物力的需求，所以不太容易進行大範圍、高精度、高密度的測量。雷達差分干涉技術(Differential InSAR, D-InSAR)利用不同時期的衛星影像進行偵測的處理，影像內容涵蓋的範圍大，且可以獲得高精度地表變動量的量測結果，是非常適合的偵測工具。

因為合成孔徑雷達干涉處理的步驟多，過程複雜不易了解，因此許多研究人員均以昂貴的套裝軟體進行處理。為有效的推廣干涉處理技術在各個領域的應用，本研究以公用程式為主，期有興趣及需求的使用者能廣泛應用。由於處理的過程繁複，為有效掌握處理結果，本研究探討處理的流程及產生結果的差異，並提出處理步驟中不同的處理方法及討論不同方法間的差異，藉以選擇較佳的處理模式。

為瞭解雷達干涉技術在台灣地區進行變形偵測的可行性，本研究以台灣中部地區集集地震及屏東平原地區的地層下陷兩不同區域、不同變形量特性案例進行研究分析。在集集地震所產生的地表偵測部分，因為台灣中部地區繁密的植物覆蓋及地震引起的變動產生不相關性，使得斷層東邊地區因低相關性而無法偵測變動情形；但斷層西部因地勢較平坦且變動量亦較小，因此以干涉技術可以清楚的偵測出其變化情形。D-InSAR 與 GPS 資料都具有高精度的偵測結果，在垂直方向的比較結果均方根誤差為 3.3 cm，兩者具有相當的一致性，因此在地震的變形偵測中，兩者的量測資料可以有良好的互補作用。

屏東平原位於台灣西南部，由於地體構造背景特殊，屬於快速沉降與堆積的區域，又由於近年來在沿海地區超抽地下水造成嚴重的地層下陷情形，因此，本研究利用 ERS 衛星雷達影像的差分干涉技術來偵測屏東地區的地表變形量，並與 GPS 資料及水準測量資料做比較，探討 D-InSAR 技術在台灣地區地層下陷偵測的精確度，並分析屏東地區的下陷狀況。實驗結果說明由 D-InSAR 技術計算的下陷量平均值與 GPS 及水準的下陷量平均值差異量均小於 1 cm，且變化的趨勢一致；從干涉圖中可以明顯的看出林邊溪河口附近海岸為下陷最嚴重的地區，且該屏東平原地區在乾、濕季的下陷量明顯的不同，乾季的的下陷量大於濕季的下陷量。

Detecting terrain deformation with radar interferometry

Student : Chia-Sheng Hsieh

Advisor : Dr. Tian-Yuan Shih

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

Interferometric Synthetic aperture radar (InSAR) is an imaging technique for measuring the topography of surface, its changes over time, and other changes in the detailed characteristics of the surface. A radar sensor above the Earth detects tiny changes on the ground by very accurately measuring changes in the time delay, or phase, of a radar echo. Interferometric synthetic aperture radar and its spatially dense, accurate deformation measurements have advanced studies of the Earth's crust. This technique has been widely used to produce digital elevation model (DEM) and to measure terrain deformation. This technique has also been applied to measure ocean currents, map hazards, and detect glacier motion.

Taiwan lies at the boundaries of the Philippine Plate to the east and the Eurasian Plate to the west. The earthquakes occur often in Taiwan area and may cause heavy casualties and building damages. It is an important issue to determine the magnitude of deformation and monitor the fault movement. Researchers can avoid the limitations of the survey approaches and can begin to think about measuring the entire area's deformation. Differential InSAR (D-InSAR) and its spatially dense, accurate deformation measurements have advanced studies of the Earth's crust. A significant advantage of this technique is that it provides a comprehensive view of the motion detected for the entire area affected. It is expected that this type of result will supplement ground-based measurements, which are made at a limited number of locations.

The processes of D-InSAR are complicated and difficult to be understood. To effectively promote the applications of D-InSAR, this study mainly applies the public programs to modeling the processes. This study emphasizes on the processes of D-InSAR and the differences of the results in order to effectively realize the experiment results. Moreover, we propose many alternative methods in the steps of the processes, and discusses the differences among them. Based on the comprehensive discussions among the alternative methods, a best method can be selected to apply on the actual practices.

To realize the possibility of applying D-InSAR on the deformation detection in Taiwan, this study analyzes two particular cases located on different regions and characterized with different deformations. One case is the earthquake on 21 September 1999 near Chi-Chi in central Taiwan. The other case is the land subsidence in the Pingtung plain. We chose ERS radar images to detect the Chi-Chi earthquake's deformation by D-InSAR technique. The data were used to generate a high-resolution, wide-area map of displacements in flat or semi-flat areas. The interferograms show radar line contours indicating line-of-sight changes corresponding to surface displacements caused by earthquake ruptures. These results were compared to synthetic interferograms generated by GPS data. Using a combination of both GPS and D-InSAR techniques, this study showed that the rms value calculated from the differences in vertical displacements between the methods was 3.3 cm. Thus, both techniques can be used to detect that magnitude of displacement. Both D-InSAR and GPS techniques have high precision. In our study, the results from using both techniques showed good correspondence, suggesting that these two approaches can be used as complementary tools.

The Pingtung Plain of south-western Taiwan is located in a fast subsidence and deposition area due to its special tectonic setting. Serious land subsidence has occurred recently along coastal regions of Taiwan as a consequence of over-pumping of underground water. We used D-InSAR to detect land subsidence in the Pingtung Plain, southern Taiwan, between 1995 and 2000. The mean error was within 1 cm with comparison with GPS and levelling data. The results revealed that the critical subsidence region was located on the coast near the mouth of Linbien River. Experimental results indicated that subsidence was significantly higher during the dry season than during the wet season.

誌謝

本論文之得以進行，首先要感謝中正理工學院及國科會提供的機會及獎助，併感謝李主任振濤博士的推薦及宋教育長大偉將軍的爭取及支持，才能有機會進行此博士研究。

在研究其間感謝指導教授史天元教授的各项指導，並提供赴史丹福大學訪問研究的機會。在學期間陳春盛教授、黃金維教授在學業及研究上的各項指導；感謝陳錕山教授在雷達知識的教導；在研究上感謝 Stanford 大學 Zebker 教授在軟體及實作方面的教導，其悉心指導及觀念的啟發，讓我在合成孔徑雷達的相關知識受益良多。感謝口試委員廖揚清教授、陳良健教授、胡植慶教授、廖志中教授、潘以文教授對論文細心的指導與建議，使本論文能更趨完備。

在實作上，感謝胡植慶老師及台大地質系佩芬、孟涵等遙測研究室各位同學協助，讓辛苦的研究有良好成果。

感謝歷任測量組的學長、學弟妹們，特別是宏揚、金聰、中偉、松安、立信等學長在各方面的支援，及各位測量組學弟妹在各方面的討論，都讓自己受益匪淺。感謝趙錫民老師在生活及精神上的打氣，張嘉強老師提供的資料數據及鼓勵，驥文學長在研究及論文寫作的協助，同時感謝中正理工學院所有長官、老師的關懷與支持。

最後，當然要感謝父母無怨的付出與支持，及在背後默默付出辛苦持家的老婆煌珠，在女兒婷婷出生不久就獨自赴美讓妳一人單獨持家，並在這段辛苦的歲月裡，照顧弟弟忠霖，騰出時間讓我完成論文，這份辛苦的榮耀一定與妳共同分享。

目錄

中文摘要	i
英文摘要	iii
致謝	v
目錄	vi
表目錄	ix
圖目錄	x
符號說明	xii
第一章 前言	1
1.1 研究動機	1
1.2 InSAR 發展歷程	2
1.3 文獻回顧	4
1.4 研究方法	6
1.5 論文貢獻	8
1.6 論文架構	10
第二章 雷達干涉技術原理介紹.....	12
2.1 InSAR 模式	12
2.1.1 橫軌式干涉	12
2.1.2 沿軌式干涉	13
2.1.3 重複軌道式干涉	14
2.2 InSAR 原理	15
2.3 D-InSAR 的原理	17
2.4 InSAR 的應用	21
2.4.1 數值地形模型	22
2.4.2 變形量測	23
2.5 形成干涉之限制條件及影響因素	24
2.5.1 基線	26
2.5.2 大氣效應	27
2.5.3 處理過程	27
2.5.4 影像資料同調性	28
2.6 誤差來源分析	29
2.7 最佳基線	31
第三章 大氣效應處理.....	35
3.1 簡介	35
3.2 理論依據	36
3.2.1 折射率	36
3.2.2 大氣延遲	37
3.3 大氣模式	38

3.3.1	對流層	39
3.3.2	電離層	42
3.4	大氣效應對干涉影響	43
3.5	大氣效應偵測	45
3.6	移除大氣效應	46
3.6.1	利用 GPS 資料移除大氣效應	46
3.6.2	利用氣象資料移除大氣效應	48
3.6.3	以堆疊的方法消除大氣效應	49
3.7	結論	49
第四章	雷達干涉技術處理流程.....	51
4.1	基線計算	52
4.1.1	以精密軌道資料計算基線	54
4.1.2	以 DEM 計算基線	54
4.1.3	以控制點計算基線值	54
4.2	影像套合	55
4.2.1	初步套合	56
4.2.2	精密套合	58
4.3	產生干涉圖	59
4.4	平坦化處理	60
4.4.1	以橢球模式計算	61
4.4.2	以 DEM 進行平坦化計算	61
4.5	全相位回復	62
4.5.1	畸點隔離法	64
4.5.2	最小自乘法	64
4.5.3	價值統計及網路流程演算法	65
4.6	相位至高程轉換	65
4.7	座標定位	66
4.7.1	都普勒斜距法	67
4.7.2	影像幾何轉換法	70
4.8	計算三維變形量	74
4.8.1	多角度影像法	75
4.8.2	GPS 約制法	78
4.9	以 GPS 變形量資料模擬雷達變形干涉圖	80
第五章	資料選取及處理.....	81
5.1	資料來源	81
5.2	ERS 衛星	83
5.3	SAR 影像格式	85
5.4	影像選取	86



5.4.1	Descw 軟體	87
5.4.2	利用網站資料查詢	87
5.5	前級處理	87
5.6	基線計算	90
5.7	套合處理	91
5.8	產生干涉圖	92
5.9	平坦化處理	93
5.10	干涉圖微調處理	95
5.11	全相位回復	96
5.12	座標定位	97
第六章	集集地震同震變形研究.....	99
6.1	簡介	99
6.2	研究區介紹	101
6.3	研究方法	103
6.3.1	資料獲取	103
6.3.2	處理流程	104
6.4	成果評估及分析	106
6.4.1	產生干涉圖	106
6.4.2	GPS 變形分析	109
6.4.3	變形量比較分析	113
6.5	結論	115
第七章	屏東地區地層下陷研究.....	116
7.1	簡介	116
7.2	研究區介紹	116
7.3	差分干涉處理及其結果	119
7.3.1	研究方法	119
7.3.2	資料獲得	120
7.4	成果評估	121
7.4.1	干涉圖結果	122
7.4.2	與 GPS 資料及水準測量成果比較	125
7.4.3	屏東平原下陷量分析	127
7.5	結論	132
第八章	結論及建議.....	134
	參考文獻	136
	附錄 A 平坦化處理程式.....	146
	附錄 B 座標定位計算程式.....	154
	作者簡歷	156

表目錄

表 4.1	干涉技術處理時不同應用的實用基線長度	55
表 5.1	ERS-1 衛星各項任務的名稱及時間	82
表 5.2	ERS 衛星的相關資料	83
表 5.3	ERS 衛星的各項系統參數	85
表 5.4	影像對計算的各項幾何參數值	90
表 6.1	集集地震變形研究像對基本資料	104
表 6.2	28 個 GPS 點位集集地震變形量	113
表 7.1	屏東地區地層下陷研究採用影像對	121
表 7.2	影像對乾季及溼季的平均下陷量。	132



圖目錄

圖 2.1	橫軌式干涉幾何示意圖	12
圖 2.2	沿軌式干涉幾何示意圖	13
圖 2.3	重複軌式干涉幾何示意圖	14
圖 2.4	雷達干涉幾何示意圖	15
圖 2.5	雷達差分干涉的幾何示意圖	17
圖 3.1	以 GPS 資料修正大氣效應流程圖	47
圖 3.2	天頂方向延遲與斜距延遲關係圖	47
圖 4.1	差分干涉技術處理流程圖	51
圖 4.2	重複軌道干涉模式的基線幾何關係	52
圖 4.3	基線各項參數的幾何關係	53
圖 4.4	相位平坦化之幾何關係	60
圖 4.5	以 DEM 進行平坦化處理流程圖	61
圖 4.6	四點環繞檢測示意圖	63
圖 4.7	地形面、橢球面及大地水準面的示意圖	66
圖 4.8	地圖座標與雷達座標的幾何轉換關係圖	67
圖 4.9	雷達衛星成像的地心座標系統示意圖	68
圖 4.10	雷達影像幾何示意圖	71
圖 4.11	GPS、SRD 與垂直變化量幾何關係示意圖	79
圖 4.12	以 GPS 資料模擬雷達變形干涉圖流程	80
圖 5.1	衛載 SAR 系統觀測任務時間序列圖	81
圖 5.2	ERS SAR 成像幾何配置圖	84
圖 5.3	台中地區的雷達振幅影像	88
圖 5.4	台中地區 96/3/6 及 96/3/7 影像都普勒中心值	89
圖 5.5	初步形成的干涉條紋	93
圖 5.6	從 DEM 模擬產生的干涉圖	94
圖 5.7	經過平坦化處理的干涉圖	94
圖 5.8	經過微調處理的干涉圖	95
圖 5.9	雷達影像同調性圖	96
圖 5.10	經過全相位回復的干涉圖	97
圖 5.11	座標定位的干涉圖	98
圖 6.1	集集地震的地質及地形概況圖	102
圖 6.2	差分干涉處理及計算垂直位移量流程圖	105
圖 6.3	變形對的初步處理結果	107
圖 6.4	1999/5/6-1999/10/28 像對同調性圖	107
圖 6.5	1999/5/6 - 1999/10/28 ERS 雷達影像變形干涉圖	108

圖 6.6	台灣中部地區集集地震 GPS 點位的同震變形向量圖	109
圖 6.7	以 GPS 量測的集集地震水平變動量的分層設色圖	110
圖 6.8	由 GPS 的點位資料模擬雷達干涉圖的處理流程	111
圖 6.9	由集集地震 GPS 量測水平變動量模擬雷達干涉圖	112
圖 6.10	GPS 與差分干涉技術計算垂直變形量的差異圖	114
圖 7.1	屏東平原的地形圖及 ERS 衛星影像拍攝台灣地區的軌道分佈圖	117
圖 7.2	研究區的地質結構圖	118
圖 7.3	屏東平原 GPS 站從 1996 至 1999 年的垂直變化向量圖	119
圖 7.4	產生地形或地表形變干涉圖流程	120
圖 7.5	屏東地區 1995~2000 年降雨量直方圖	122
圖 7.6	乾季影像對的差分干涉結果	123
圖 7.7	濕季影像對的差分干涉結果	124
圖 7.8	水準點位置圖	125
圖 7.9	測線 A 水準測量、GPS 與 D-InSAR 結果之高程變化量折線圖	126
圖 7.10	測線 B 水準測量、GPS 與 D-InSAR 結果之高程變化量折線圖	126
圖 7.11	由 GPS 資料顯示每年上升及下降速率曲線圖	128
圖 7.12	由 D-InSAR 獲得差分干涉條紋	128
圖 7.13	剖面位置示意圖	129
圖 7.14	屏東地區乾季剖面變形量	130
圖 7.15	屏東地區濕季剖面變形量	131



符號說明

a	地球長半徑
A_1	雷達 1
A_2	雷達 2
b	地球短半徑
B	基線長
B_V	垂直基線
B_H	水平基線
B_{\perp}	雷達視距垂直基線
$B_{//}$	雷達視距平行基線
B_{opt}	最佳基線
c	真空中的光速(299792458 m/s)
d_{ta}	獲取全幅影像的時間
dt_r	最後像元減第一像元的兩倍時間
e	水汽的壓力
e_0	水汽分壓
f	頻率
f_{DC}	都普勒中心頻率
f_e	為橢球的扁率。
f_s	雷達斜距方向取樣頻率。
H	航高
I_a	計算的雷達影像方位像元值
I_r	計算的雷達影像斜距像元值
L, P	DEM 或影像的像元座標(Line, Pixel)
n	反射指標
n_e	立方米中的電子數密度
N	反射率
N_{d0}	為地面大氣折射率的乾分量
N_d	乾分量
N_L	影像方位像元數
N_p	影像斜距像元數
N_w	濕分量
P_e	地面點的位置向量
P_t	大氣壓力
P_d	乾空氣的部份壓力
R	斜距



R_a	雷達方位方向的解析度
R_e	地球半徑。
R_p	位於極的地球半徑
R_r	雷達斜距方向的解析度
S	電磁波傳遞過程中，由地面向上沿天頂方向的傳播路徑
S_a	感測器的位置向量
$S_k^{t_1}$	雷達波在 t_1 時間受大氣影響，在斜距方向的距離延遲量
t_l	第一個斜距像元的時間
t_{a1}	獲取第一行影像的時間
t_{al}	獲取第 l 行影像的時間
t_{r1}	獲取第一個像元的時間
t_{rl}	獲取第 l 個像元的時間
T	溫度
v	為衛星速度
V_p	地面點的速度向量
V_s	感測器的速度向量
W	地面解析像元投影至斜距垂直方向的分量
W	液態水常數
x_p, y_p, z_p	點位座標
z	地面點位相對於橢球的高程
λ	雷達波長
θ	視角
θ_0	近距點視角
α	基線傾斜角
ϕ	相位值
ϕ_f	經平坦化處理的相位值
ϕ_{topo}	因地形效應產生的相位值
ϕ_{motion}	因地表移動產生的相位值
ϕ_{noise}	因雜訊產生的相位值
$\phi_{p,geom}^{t_i}$	因幾何產生相位差
$\phi_{p,prop}^{t_i}$	傳播速度改變產生的相位差
$\phi_{p,scat}^{t_i}$	地面地位散射的相位差
$\phi_{p,q}$	干涉圖中 p 及 q 兩個像元的相位差
Δn	地距的像元間距
Δr	地面點移動量在雷達斜距方向的投影量
$\Delta\phi_d$	地表變形量產生的相位值
$\Delta\phi_a$	大氣影響量產生的相位值
$\Delta\phi_{te}$	因地形產生的誤差
$\Delta\phi_{oe}$	因軌道產生的誤差



$\Delta\phi_{dc}$	因幾何及時間產生的不相關
$\Delta\phi_n$	因雜訊及處理產生的不相關
δ	距離差
δS	沿著天頂方向電磁波傳播路徑的距離差
δS_d	距離差的乾分量
δS_w	距離差的濕分量
$\delta_{p,q}$	干涉圖中 p 及 q 兩個像元的延遲差異量
$\delta_{p,q}^z$	干涉圖中 p 及 q 兩個像元在天頂方向的延遲量
δ^z	天頂方向的延遲量
Λ	表示觀測點的緯度
τ	雷達波在斜距的行進時間
φ	軌道與正北間之傾斜角



第一章 前言

1.1 研究動機

主動微波系統(Active Microwave Systems)能自行發射並蒐集微波訊號，不論任何氣象條件及日夜均能進行觀測，故具有全天候、全天時且與可見光截然不同的數據獲取能力，除可彌補可見光遙測系統之限制，亦能獲取不同特性之數據資料，以提昇監督管理之能力。

合成孔徑雷達干涉技術(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)利用兩幅同一地區不同時間(位置)所拍攝的影像進行干涉處理，此項技術能產生高精度的數值地形模型，更能進一步利用雷達差分干涉技術(Differential InSAR, D-InSAR)，精確的量測地表變形量。目前該項技術主要應用於火山監控、冰川漂移、地震變形、地層下陷偵測等。

台灣地區因位於地震帶上，地震發生的頻率相當頻繁，特別是一些較大規模的地震，常造成地表嚴重的變形，而威脅到人民生命財產的安全；近年來，台灣地區由於地殼結構特性及超抽地下水的原因，造成地層下陷狀況嚴重，如何有效探討及監控地表變形狀況，遂成為重要的研究課題。

因為衛星的軌道固定及其週期規律，利用衛載的雷達資料進行監控，可週期性的拍攝各地區的影像，並且雷達具有穿透雲層的特性，亦能在天候不佳時拍攝影像，不必擔心缺乏地震前資料的問題。因雷達拍攝影像涵蓋範圍大，可以獲得大區域且全面性的資料，配合差分干涉技術將可獲得高精度的資料，因此雷達差分干涉技術是一項偵測地震變形強而有力的工具。

在變形量的監控上，傳統上以精密測量的方法來進行，但因受限於儀器的精度及人力、物力的需求，所以不太容易進行大範圍、高精度、高密度的測量。最近，雖然 GPS 技術快速發展，可以較快速的獲得高精度的成果，但仍受限於必須親臨現場且僅能測得單點資料的限制；若測區範圍擴大，則人力和物力的要求都要相對增加。

相對這些傳統測量方法的限制，就是以雷達差分干涉技術來獲得地表變形量的優點。以衛星來拍攝地表影像，能不間斷的重複拍攝，因此無論地震發生在何時，都可以利用地震發生前後的影像來進行計算，且有連續性資料可使用，並且變形的量測精度更可以達到公分甚或公厘級的精度，不受日光及天氣的影響，是相當好的變形偵測工具。所以本論文就利用 D-InSAR 的方法來進行台灣地區地震變形及地層下陷的研究。

1.2 InSAR 發展歷程

雷達干涉技術利用雷達複數資料(Complex Data)的相位(Phase)值來萃取出地表的三維資訊，可用以決定高精度的地形資料，此技術最早是應用在觀測金星(Venus)及月球的表面 [Rogers and Ingalls, 1969]，Graham 首先利用合成孔徑雷達的資料製作地形圖，他在傳統的空載 SAR 系統上再加裝一個橫軌方向上的天線，利用兩個天線同時獲得的雷達訊號相位值形成干涉效果，以類比的方法計算地面的高程值[Graham, 1974]。

為克服雷達影像的資料量愈來愈大，及提升處理的方式，美國噴射推進實驗室利用數位的方法來記錄雷達系統的振幅(Amplitude)及相位(Phase)資訊。利用數位的方法記錄每一個點位的複數資料，並直接計算地面的高程資訊，此研究利用側視空載雷達成功的獲得解析力為 10 m 的數值型模型 [Zebker and Goldstein, 1986]。

Goldstein 等(1988) 以空載的觀念處理 Seasat 衛星影像的資料，利用重複軌道模式處理日期前後差三天的雷達影像資料，所獲得的地形圖等高線與 USGS(United States Geological Survey)的地形圖等高線相當吻合。

Gabriel 等學者首先證實利用雷達差分干涉的方法可以獲得公分級的變形情形，在其研究中，以三幅 Seasat 的雷達影像產生出兩幅干涉條紋圖(Interferogram)，再以此兩幅干涉圖利用差分干涉的技術推求出地表的變形量。在處理的過程中，對於產生兩個不同的干涉條紋圖，都使用相同的處理步驟，以避免產生不同的誤差[Gabriel et al., 1989]。

Massonnet 等則以 ERS 兩幅地震前後的雷達影像產生干涉條紋，利用現有 DEM 資料消除地形效應，使計算後之條紋為僅受地震變動影響之干涉圖，有效的偵測出 1992

年美國加州 Lander 地區 7.3 級地震的變形量。該研究亦以彈性錯移模型 (Elastic Dislocation Model) 計算結果與干涉的處理結果相比較，得到公分級的精度 [Massonnet et al., 1993]。

1994 年 Zebker 等 (1994a) 則利用三幅 ERS 的雷達影像，以兩幅干涉條紋圖的差分處理來計算其變形量，該法亦成功的偵測出 Lander 的地震變形量。該研究並以 GPS 及 EDM 的地面量測資料來進行比對，得到其變形量的相關係數高達 0.96，比較結果得到公分級的精度。有上述之結果後，許多有關地震變形的研究陸續的被發表出來，證實了該技術的實用性。

在地層下陷 (Subsidence) 方面的研究應用，1997 年 Massonnet 等利用 InSAR 的技術來偵測加州 East Mesa 地熱區的地層下陷情形。該研究使用四幅 ERS 的衛星影像，分別為 1992/1/3、1992/1/27、1994/2/21 及 1994/2/29 的影像，此四幅影像共可形成 6 幅干涉圖。該研究利用此六幅干涉圖分別進行短時間間隔及長時間間隔的分析，並與水準測量進行比較，得到相同的下陷結果 [Massonnet et al., 1997]。

其後則有針對加州 Antelope Valley 區、Las Vegas 地區及義大利 Napoli 城市地區等分別作不同的研究 [Galloway et al., 1998; Amelung et al., 1999; Tesauro et al., 2000]。Amelung 針對在農業及都市地區因大量抽取地下水造成含水層 (Aquifer) 下陷的問題進行研究，此問題是目前全世界所共同面對的問題。在 Las Vegas 地區，雖因氣候乾燥可以減少大氣的影響，但仍以不受大氣影響的 DEM 資料來移除地形效應，以確定變形量與大氣無關。因此推測 D-InSAR 量測位移量的精度，理想上應可達到 2-4 mm 之間，在理想的狀況下，主要的誤差來源應只有地面散射特性的些微改變及處理上所產生的誤差。

利用雷達差分干涉技術可以應用在斷層 (Fault)、地震及火山等方面的研究。在地表變形部份，雷達差分干涉技術是唯一可以全面性、大範圍且探討細微變化的技術 [Massonnet and Feigl, 1998; Rosen et al., 2000]。

1.3 文獻回顧

台灣位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊之接合處，地震發生的頻率相當頻繁，特別是一些較大規模的地震，常造成地表嚴重的變形，而威脅到人民生命財產的安全；近年來，台灣地區由於地殼結構特性及超抽地下水的原因，造成地層下陷狀況嚴重，如何有效探討及監控地表變形狀況，遂成為重要的研究課題。

在台灣地區，因高低起伏的地形和稠密的植物，不易產生良好的干涉圖，但仍有部分研究成功使用雷達差分干涉技術有效偵測出台灣地區地表的變形量，研究成果包括集集地震同震變形[Suga et al., 2001; Pathier et al, 2003; Liu et al, 2004; Chang et al, 2004a]、屏東地區地層下陷[Chang et al., 2004b]及台南台地的抬升[Fruneau et al., 2001; Huang et al., 2006]等。

有關雷達差分干涉技術在集集地震同震變形相關的研究，首先 Suga 等(2001)最先發表研究成果，該研究以影像的同調性(Coherence)圖來評估災害地區的受損狀況，再利用 1999/1/21、1999/9/23 及 1999/5/6、1999/9/23 兩個不同時間對的影像，進行干涉的處理。研究結果顯示，因災區的建物嚴重受損，所以從同調性圖中可以有效的判讀出災區的區域；在變形干涉的部分，藉由所產生出西部平坦地區災害變形狀況的干涉條紋，計算出在雷達視距方向的最大變形量約為 22 cm。研究成果並以成大的 GPS 資料進行驗證，證實斷層下盤的位移量為向右移動，上盤的變動量為向左移動，移動的型態一致。

該文為震後最先發表的地震變形干涉圖，僅以變形趨勢驗證與 GPS 的量測結果一致，並未進行干涉處理的精度比較及評估。且由於干涉的變形量無法直接推算垂直及水平變形量，因此，作者利用粗估的方式來計算，將所有的變化量以入射角 θ 值的三角函數換算，乘以 $\sec\theta$ 作為垂直的變形量，乘以 $\csc\theta$ 為水平變形量。因 ERS 的影像中心入射角約為 23° ，所以簡略以 1.09 及 2.56 的倍數計算，得最大的垂直變形量為 56 cm，水平變形量為 24 cm。

稍後各研究團隊陸續發表以差分干涉技術利用不同的處理方法偵測集集地震的同震變形成果，都僅能產生西部平坦地區的變形干涉圖。其中 Pathier 等(2003)以二軌跡法

來進行干涉處理，在分析變形趨勢時，發現干涉圖中含有軌道誤差，因此以 28 個 GPS 量測的變形結果當約制條件，將原始干涉圖進行修正處理，結果顯示校正後的干涉圖與原始干涉圖在雷達視距方向的差異都在 4.5 cm 以下，且九幅干涉對與 GPS 的量測結果比較，均方根誤差為 1.7 cm。因本研究係以 GPS 的資料來修正干涉圖結果，所有的結果都強制約制至 GPS 資料處，所以評估的結果本應相當良好。但 GPS 的高程點位精度較平面精度差，將三維資料全部轉換至雷達視距方向的計算方法亦可能將較大的誤差量帶入計算結果。

Liu 等(2004)進行地震前及同震引起變形量的探討，先利用震前 2 至 3 年的變形像對進行偵測，結果顯示震前有一條干涉條紋，估計其變形量約為 32 mm。並以三軌跡法偵測同震變形結果，結果顯示變形量為 10 條干涉條紋。為降低大氣效應，得到雜訊較少的結果，作者進一步將兩幅影像平均，偵測得地震同震變形為 28.3 cm。為評估偵測結果精度，將 19 個 GPS 的點位變化量資料轉換至雷達視距方向，並與干涉的變形量相比較，得到的均方根誤差為 1.3 cm，最後並與彈性錯移模型的模擬結果進行比較，在橫切的兩條剖面上得到的均方根誤差為 2.5 cm 及 0.9 cm。本研究雖有進行 D-InSAR 與 GPS 結果的比較，但座標轉換方式乃以影像中心的投影量 $[-0.3753, 0.0789, -0.9235]$ 為轉換向量，將 19 個 GPS 的點位變化量轉換至雷達視距方向，此一作法忽略不同點位須有不同轉換向量的原理，僅以近似的轉換值計算，計算結果會包含轉換誤差。

Chang 等(2004a)將 GPS 變形資料模擬差分干涉條紋圖與雷達差分干涉圖比較，並將雷達差分干涉技術偵測結果以剖面圖的方式與 GPS 資料及彈性錯移模型的資料進行比較，在雷達視距方向的比較結果，從剖面圖的顯示結果判斷，三種資料的趨勢走向類似，其中誤差最大值約為 5 cm 左右。本研究的座標轉換方式仍直接以向量相乘的方法模擬至雷達視距方向，亦忽略不同點位須有不同轉換參數的實際狀況，且最後結果的比較僅以剖面圖表示，缺乏點位精確的比較結果。

另一研究區屏東平原位於台灣西南部，由於地體構造背景特殊，屬於快速沉降與堆積的區域，由於近年來在林邊到東港等沿海地區超抽地下水，造成嚴重的地層下陷情

形。Hu 等(2006) 利用 1996 年至 1999 年的 GPS 資料調查地層下陷狀況，評估屏東平原內 GPS 點位的水平位移量相對於澎湖白沙站為每年 54 mm，將垂直變形量區分為靠近山區及沿海地區兩種狀況，在屏東市以北的地區為上升地區，上升率最大為每年 8 mm，屏東市以南至沿海地區為下陷區，最大的下陷率為每年 16 mm。

Chang 等(2004b)以雷達差分干涉技術進行研究，發現該地區的下陷狀況與季節相關，在乾季有明顯的地層下陷狀況，在濕季則幾乎沒有下陷的現象，且地層下陷的情形與地下水位有明顯的相關。可惜本研究沒有雷達差分技術產生下陷量的結果，也未進行評估。

綜合以上的文獻探討，合成孔徑雷達干涉技術在臺灣的地殼變形研究上，尚在起步的階段，且前人研究大多使用套裝軟體，對於合成孔徑雷達影像的處理無法確實掌握每個環節，且難以針對個別狀況及特殊需求進行處理。因此本研究利用史丹佛大學所發展的 ROI 及 SNAPHU 等公用軟體，配合本人所撰寫的平坦化處理、座標定位等程式，期能建立系統性的雷達差分干涉技術。因深入了解處理過程的原理及自行開發相關程式，因此可以精確的計算每個點位的變形結果及座標轉換量；亦可以準確的將 GPS 的變形量模擬成變形的干涉條紋圖，能有效的比較地震變形量與 GPS 的量測結果。

同時過去的研究只能得到雷達視距方向的位移，由於臺灣 GPS 測網密集，因此本研究也建立利用 GPS 所測得的水平變形量，將差分合成孔徑雷達干涉(D-InSAR)的雷達視距方向位移轉換成垂直變形量的研究，將研究成果配合 GPS 資料及水準測量資料進行比較，以評估 D-InSAR 技術在台灣地區地層下陷偵測的精確度，並探討屏東地區地層下陷狀況。

1.4 研究方法

本研究旨在探討雷達差分干涉技術應用於台灣地區地表變形偵測的可行性。所採用雷達影像以歐洲太空總署(European Space Agency, ESA)的 ERS 衛星影像為主，資料的處理則使用 Stanford 大學的 InSAR 處理軟體 ROI 來進行。雷達差分干涉技術處理的成果

則以 GPS 資料來進行檢驗，本研究將蒐集內政部土地測量局、經濟部中央地質調查所、交通部氣象局及各相關單位地震前後所測得的 GPS 的資料來進行比較，期能獲得客觀之結果。

因為合成孔徑雷達干涉處理的步驟多，處理的過程繁複不易了解，因此許多研究人員均以昂貴的套裝軟體進行處理，為有效的推廣干涉處理技術在各個領域的應用，本研究以公用程式(ROI, DORIS, SNAPHU, GETORB)等現有免費軟體為主，期使有興趣及有需求的使用者能廣泛應用。同時，為有效掌握處理結果，本研究探討處理的流程及產生結果的差異，並在處理步驟中提出不同的處理方法，討論這些不同方法的差異，藉以選擇較佳的處理模式。

本研究採用雷達影像資料的格式為原始影像格式(Raw Data)，如此可以避免因不同都普勒相位中心處理所產生的差異，以增加干涉處理的可行性。另因 SNAPHU 為機率式的全相位回復處理，所以可以獲得整幅的影像變形量。

在資料的檢核部份，因為以雷達差分干涉技術所獲得的變形量為在雷達斜距方向的變形量，與一般傳統測量所獲得的地面資料不同，要進行精確的比對必須將兩者轉換至同一座標系統中。為能獲得全面性的比較資料，本研究擬將所獲得的 GPS 資料進行內插處理，再將此內插後的變形量轉換至雷達斜距的方向，並計算其形成的干涉條紋。在同一座標系統下的兩幅干涉條紋影像，進行套合的處理後，即可比較全幅影像各位置的變形情形。

台灣地區近年來在自然環境之管理上，廣受地震及地層下陷之威脅，1999 年 9 月 21 日發生在台中、南投的集集地震，為規模 7.6 的強烈地震、震源深度 6.9 km，是台灣近年來規模最大的地震，造成鄰近地區的重大傷亡及財產損失。雖有許多地表變形量的實地測量結果，但都為點狀的變形量，缺乏面狀的全區資料，本研究將探討雷達差分干涉技術偵測變形量，提供更多、更詳細的變形資料，提供研究及分析比對。

屏東平原位於台灣西南部，由於地體構造背景特殊，屬於快速沉降與堆積的區域，近年來在沿海地區更因超抽地下水，造成嚴重的地層下陷情形。因此本研究將利用 ERS

衛星雷達影像的差分干涉技術來偵測屏東地區的地表變形量，分析屏東地區的下陷狀況，研究的結果將與傳統的水準資料及 GPS 量測的資料進行比較。

1.5 論文貢獻

合成孔徑雷達差分干涉技術是一項可以獲得高精度地表變形的的方法，該項技術雖具有相當大的應用潛力，但因處理的過程複雜且條件要求嚴格，目前除應用高價的商業軟體外，一般研究人員不易投入該項技術的研發及應用。本論文深入研究差分干涉量測技術的理論基礎，利用公用軟體(ROI, SNAPHU 等)配合自行研發的處理程式，提出差分干涉處理的流程與方法，並以南投地區的集集地震及屏東平原地層下陷的實例進行地表變形的研究，驗證本文發展的流程與方法可以計算出高精度的地表變形量。

本論文的貢獻可歸納為下列幾項：

1. 深入研究D-InSAR的關鍵技術及理論基礎，對已有的方法進行研究，並從實用的角度出發，發展出一套可行的流程與方法。研究的內容包括：基線計算、影像套合、平坦化處理、全相位回復、相位至高程轉換及座標定位等一系列的方法與理論，並研究分析影響精度的潛在因素。
2. 開發處理程序中的相關程式，包含有：
 - (1) 在平坦化的處理程序中，推導 DEM 座標系統與雷達座標系統的轉換方式，實現以現有 DEM 進行平坦化處理的程式，使干涉的量測結果更貼近實際地形。推導方法的處理步驟於 4.4.2 節內詳述，程式碼如附錄 A。
 - (2) 利用雷達成像的幾何原理作為座標轉換的依據，推導兩座標系統間轉換公式，實現更有效率的座標轉換的處理。推導的原理於 4.7.2 節內有詳細介紹，程式碼如附錄 B。

3. 提出差分干涉量測技術偵測地表垂直變形量的方法。

以雷達差分干涉技術進行變形量的偵測，其結果僅能顯示地表變動在雷達視距方向的投影量，但在實際的研究工作中，座標的三維變動量則較適宜後續的分析及探討。因此本研究提出利用GPS在平面量測高精度的特性，將GPS平面資料內插處理成二維影像資料，當作轉換計算的約制條件，再將視距方向的變形量計算至垂直方向，達到推求高程變動量的目的，以利進行高程的變動量評估。

4. 以兩研究區不同應用實例的驗證，評估所提方法的精度。

(1) 地震變形偵測的應用：

在集集地震所產生的地表變動偵測部分，因為台灣中部地區繁密的植物覆蓋及地震引起的變動產生的不相關性，使得斷層東邊地區因低相關性而無法偵測變動情形，但斷層西部因地勢較平坦且變動量較小，因此以雷達差分干涉技術可以有效的偵測出其變化情形。D-InSAR 技術偵測的變形量與 GPS 資料顯示類似的變形趨勢，D-InSAR 技術偵測垂直變形量與 GPS 的垂直變形量相比較，點位的變動均方根誤差為 3.3 cm，兩者的資料有良好的一致性。

本實驗的成果為第一個以點位計算的方式，精確的將 GPS 的資料模擬成變形的干涉條文圖，並將集集地震的變動量在垂直方向上與 GPS 的資料相比較。且在處理的過程中，因透過微調的方式修正精密軌道的誤差量，使得變形的結果精度提升。

(2) 地層下陷偵測的應用：

從屏東地區的下陷研究中可知，D-InSAR 技術所推求的垂直高度變化值與水準測量及 GPS 量測的結果比較，其平均值差異量均小於 1 cm，且變化的趨勢一致，證實 D-InSAR 技術所推求的垂直高度變化值精度良好。從干涉圖的分析中可知，乾季的差分干涉圖色彩圖環較為明顯，干涉效果較好，顯示乾季時地表的含水量變動較少，影像對的相關性較高，因此有較佳的干涉結果。

從屏東地區的剖面圖分析中可知，有兩條剖面的下陷量從 1996 至 1999 年期

間逐年增加，且在 1998 至 1999 年間的下陷量明顯較前幾年大許多。將時間跨越乾季的影像對與溼季的影像對相比，確實量測到較大的下陷量，表示研究區域中地層下陷情形能反應季節性的變化。此區地層下陷的情況確實受到地下水位升高或降低的影響，也惟有利用 D-InSAR 才能如此有效的觀測全區域整體的變形結果。

本研究以不同的資料來進行評估，顯示本文所提差分干涉處理的流程可以精確的處理地層下陷的變形量，是第一個以差分干涉技術計算屏東平原下陷量的成果。因地層下陷的變化量相當小，處理過程中對精度的要求就比較高，所以透過本研究的處理流程，可以有效的掌握每一個處理程序的準確，以達到高精度的要求。

1.6 論文架構



本論文的第一章為前言，內容包含有研究動機、InSAR 的發展歷程介紹、論文的研方法及貢獻等。第二章介紹雷達干涉技術的方法及原理，先介紹 InSAR 的三種模式並討論 InSAR 的基本原理，接著詳細描述 D-InSAR 的方法及原理，並介紹 InSAR 技術應用的範圍及領域。其後並探討影響資料品質的因素及其限制，詳加討論各項影響 InSAR 結果的因素及其影響量，最後，分析誤差可能的來源及其原因，並討論最佳基線值的計算。

第三章介紹大氣效應的影響及處理方法，介紹大氣層的結構並討論影響雷達波行進的折射率及延遲量的計算方法，分別介紹在大氣層中影響雷達波最大的電離層及對流層。隨後討論大氣效應對干涉處理的影響，並介紹影響的數學模式。最後介紹在干涉圖中偵測及移除大氣效應的方法，讓大氣效應的影響降至最低，提升干涉處理結果的精度。

第四章介紹影像資料來源及處理過程，內容中詳細介紹干涉技術處理流程中每一個步驟的作法及原理，所包含的步驟：基線計算、影像套合、產生干涉圖、平坦化處理、

全相位回復、相位至高程轉換及坐標定位等。本章並提出改進的方法，利用現有的 DEM 進行平坦化的處理可以使產生的地面資料與實際狀況更貼近，用修正的影像幾何轉換法能更有效率的進行座標轉換處理，並提出利用 GPS 資料來產生變形量高程資訊的作法，獲得變形量的高程值。

第五章的內容包含兩部分，前半部份介紹雷達影像的相關資訊，討論可使用影像資料來源及影像格式，並介紹選取適當影像的方法，藉以挑選適合研究的影像資料來源。後半部份則以真實影像對的處理結果呈現，來介紹干涉技術處理過程中每一步驟處理的方法及技巧。

在第六章中，以集集地震為研究對象，利用雷達差分干涉技術及 GPS 資料來研究並比較集集地震在車籠埔斷層下盤的變形量，並將雷達差分干涉技術所產生的變形量與 GPS 量測得變形量進行比較。第七章則利用雷達差分干涉技術來偵測屏東平原從 1995 年至 2000 年的下陷趨勢，為有效比較下陷的垂直變形量，本研究提出利用 GPS 的水平資料進行約制，將雷達差分干涉技術偵測的變形量計算至垂直方向，並將結果與 GPS 及水準資料進行比較。

第八章為則綜合前面章節的內容及實際研究成果，提出結論及建議。

第二章 雷達干涉技術原理介紹

2.1 InSAR 模式

在 InSAR 的資料獲取模式中，依接收天線位置之幾何關係不同，可將其分為橫軌式干涉(Across-Track Interferometry)、沿軌式干涉(Along-Track Interferometry)及重複軌道式干涉(Repeat-Track or Multi Pass Interferometry)等三種模式[Gens and Genderen, 1996]。

2.1.1 橫軌式干涉

橫軌式干涉模式較為大家熟識，本模式需同時裝置兩個雷達天線系統在同一機載平台上，且兩天線所構成的直線方向與飛行方向相互垂直(如圖 2.1)。在單一軌跡模式(Single-Pass Mode)中，此兩個天線是同時裝載也同時運作，運作的實例有 TOPSAR 系統及 SRTM 系統。

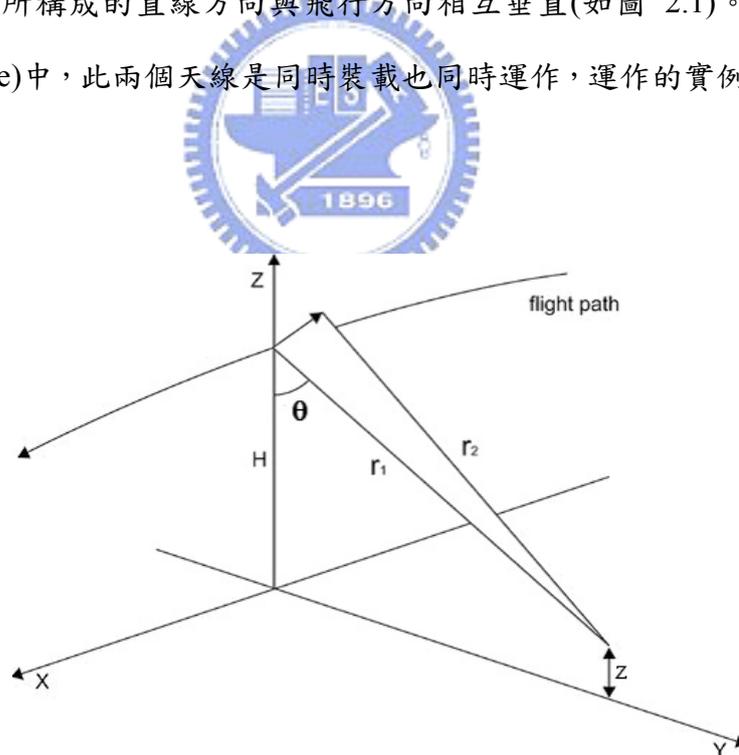


圖 2.1 橫軌式干涉幾何示意圖

如圖 2.1 所示，天線與飛行的方向垂直，其地形高為

$$z = H - r_1 \cos \theta \quad (2.1)$$

其中，

H：航高

r_1 ：斜距

θ ：視角

地距(Ground Range)為：

$$y = r_1 \sin \theta \quad (2.2)$$

此種模式只要全相位回復(Phase Unwrapping)成功的完成，即可獲得高程資料，但無法有效的分辨地形斜坡與飛機傾斜所引起的誤差。在衛載的系統中，則因為衛星飛行較為穩定，此種誤差影響較小。

2.1.2 沿軌式干涉

沿軌式的方式類似於橫軌式的模式，亦須同時裝置兩個雷達天線系統在同一機載平台上，但其差異為兩雷達天線的幾何配置不同，其雷達天線所構成的直線方向與飛行路徑一致，幾何示意圖如圖 2.2。

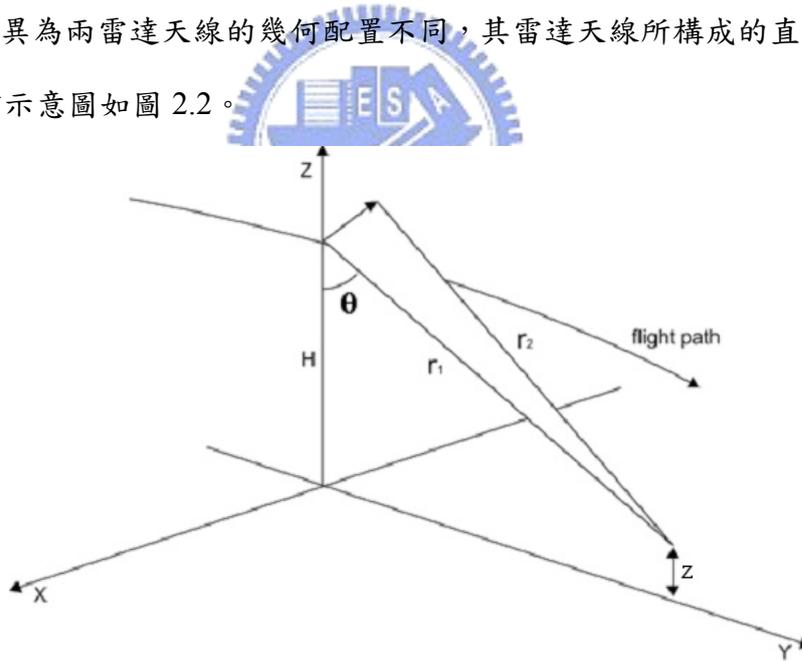


圖 2.2 沿軌式干涉幾何示意圖

因為天線的配置方式與橫軌式的方式不同，所以接收訊號產生的相位差主要來源為物體瞬間的變動量，如水流變動等。由於物體移動將導致天線接收訊號產生都普勒位移的效果，所以利用都普勒的原理可推算出物體的變動量。但是，在該模式中，天線無法分辨固定物體的訊號。

沿軌式模式所產生的相位差主要是因物體相對於感測器移動所致，且飛機的偏斜 (Yaw)與俯仰 (Pitch)亦會影響相位差值，所以必須先進行相位差的率定(Calibration)才能獲得絕對的速度值。

2.1.3 重複軌道式干涉

重複軌道模式的取樣方式如圖 2.3 所示，該模式的載台僅配置一個天線，故需利用載具飛行同一區域兩次的方式進行干涉處理。因取像位置會有些微不同，為能精確的進行干涉處理，在獲取影像瞬間的實際位置需準確的計算，因此該法較適合飛行軌道穩定的衛載系統，如 ERS 及 RADARSAT 衛星。

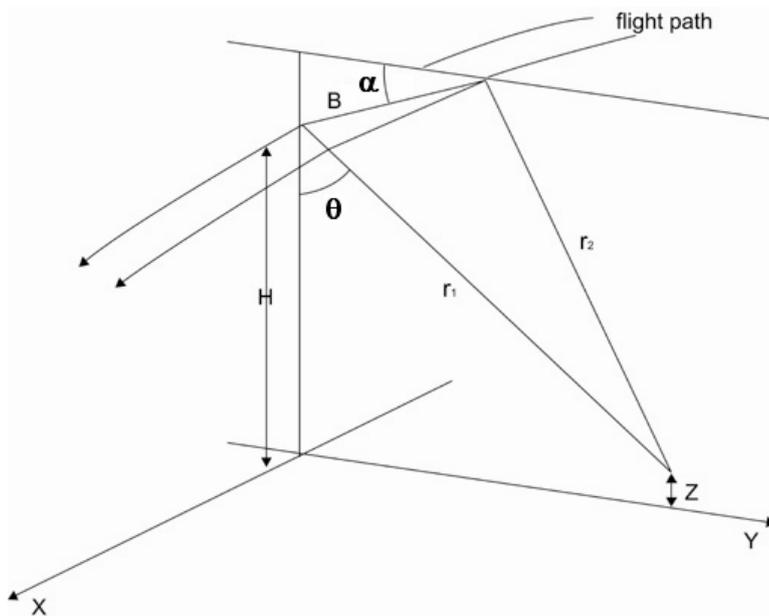


圖 2.3 重複軌式干涉幾何示意圖

此種模式是利用載台通過相同區域時的位置幾乎一樣，可重複拍攝同一區域二次，以僅有些微幾何變化的特性來獲取影像對。以此模式進行干涉處理僅須一個天線，且須有較精確的飛行路徑，因此較適合於衛載的 SAR 感測器，由於衛星位於大氣稀薄的軌道上，可穩定的沿軌道飛行，故較適合此種模式。

目前較成功的是歐州太空總署所發射的 ERS-1/ERS-2 衛星，特別是針對干涉處理設計的串聯任務(Tandem Mission)，任務中兩顆衛星拍攝同一地區前後僅相差一天，有許多結果良好的干涉產品。同樣的，JERS-1 SAR 及由太空梭所裝載的 SIR-C/X-SAR 亦有良好的成果。

在重複軌道的干涉模式中，要獲得適合的干涉資訊必須符合下列三項條件：1. 地形的散射情形沒有改變。2.穩定的幾何關係。3.在訊號的移動補償中，SAR 的處理器必須保持相位的一致性 [Gray and Farrismaning , 1993]。

2.2 InSAR 原理

雷達干涉技術係利用不同時間或不同位置的雷達天線所獲得的兩幅或多幅複數影像，藉由相位值的差異量來獲取地表的三維資訊。為能了解其原理，將合成孔徑雷達干涉技術之簡單幾何關係表示如圖 2.4，其中 A_1 、 A_2 為獲取地表資訊時天線的空間位置， B 為兩天線間的距離，也就是基線長， H 為航高， θ 為視角， r 為第一個天線至地面點的距離， δ 為第二個天線至地面點的距離與 r 的距離差值， α 值為基線與水平線的夾角。

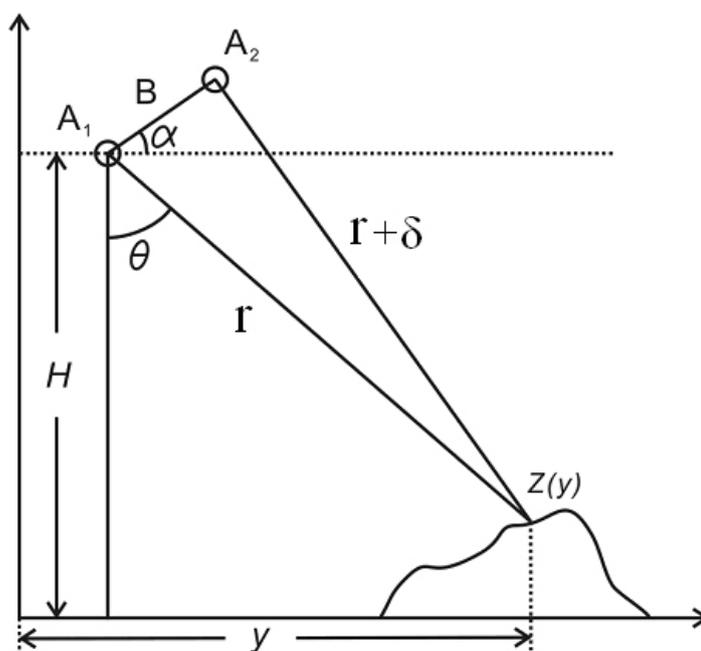


圖 2.4 雷達干涉幾何示意圖

由兩個天線所接收的同一地面點訊號的相位差值為 ϕ ，根據相位差所代表的意義為與距離差值(δ)相當的波長乘以 2π ，其波長的差即相位差，故可得：

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta \quad (2.3)$$

因雷達成像方式為由發射點發射，經待測點折返至接收天線，故其訊號傳播之路徑差為 2δ ，代入上式可得接收訊號時其產生之相位差值為：

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (2\delta) = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \delta \quad (2.4)$$

故可求出其距離差值為：

$$\delta = \frac{\lambda \cdot \phi}{4\pi} \quad (2.5)$$

在圖一中可知 $\angle A_2 A_1 Z = 90^\circ - \theta + \alpha$ ，依三角形之餘弦定理可得：

$$\begin{aligned} (r + \delta)^2 &= r^2 + B^2 - 2rB \cos(90^\circ - \theta + \alpha) \\ &= r^2 + B^2 - 2rB \sin(\theta - \alpha) \end{aligned} \quad (2.6)$$

由第(2.6)式可求得：

$$\begin{aligned} \sin(\theta - \alpha) &= \frac{(r + \delta)^2 - r^2 - B^2}{2rB} \\ &= \frac{r^2 + 2r\delta + \delta^2 - r^2 - B^2}{2rB} \\ &= \frac{2r\delta + \delta^2 - B^2}{2rB} \\ &= \frac{\delta}{B} + \frac{\delta^2 - B^2}{2rB} \\ &= \frac{(r + \delta)^2 - r^2 - B^2}{2rB} \end{aligned} \quad (2.7)$$

移項後可得：

$$\sin(\theta - \alpha) - \frac{\delta}{B} = \frac{\delta^2 - B^2}{2rB} \quad (2.8)$$

根據(2.8)式可推導求得 r 值為：

$$r = \frac{\delta^2 - B^2}{2 \cdot [B \cdot \sin(\theta - \alpha) - \delta]} \quad (2.9)$$

由圖 2.4 中知：

$$Z(y) = H - r \cdot \cos \theta \quad (2.10)$$

將(2.9)代入(2.10)式可得點位之高程值為：

$$Z(y) = H - \frac{\left(\frac{\lambda\phi}{4\pi}\right)^2 - B^2}{2\left[B \cdot \sin(\theta - \alpha) - \left(\frac{\lambda\phi}{4\pi}\right)\right]} \cdot \cos \theta \quad (2.11)$$

在雷達干涉的處理技術中，只要確定軌道之參數值：航高、視角、基線及基線與水平線的夾角等資料，配合雷達波長就可以計算點位的高程值。

2.3 D-InSAR 的原理

D-InSAR 是用來量測地表微小移動的技術，方法為利用不同時期產生的干涉圖中移除地形效應後，得到純粹因變形所產生的相位干涉圖，這個技術可提供至公分級或更少的相對精度。D-InSAR 量測地表移動量(Displacement)的方向並非垂直的方向，而是沿著雷達視距(Line of Sight)方向的變動量。雷達差分干涉的幾何示意圖如圖 2.5。

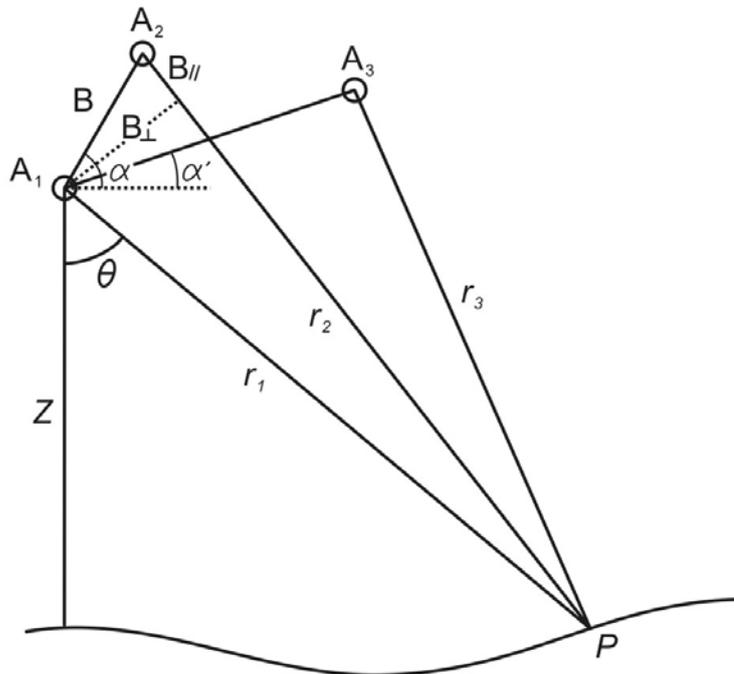


圖 2.5 雷達差分干涉的幾何示意圖

圖 2.5 中，從 A_1 與 A_2 兩天線位置所獲得的影像可形成地形干涉對， A_1 與 A_3 的影像則可形成變形干涉對，變形量產生於 A_3 影像內，故計算的原理為利用 A_1A_3 的變形對資料去除由 A_1A_2 地形對的地表資訊，即可獲得因地表變動導致斜距方向變化(Δr)所產生的干涉相位值。

從 2.2 節中可知，雷達獲取影像的訊號須經發射與接收二倍的路徑長度，所以相位差值與路徑距離差的關係式為：

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \delta \quad (2.12)$$

其中， ϕ 為相位差值， λ 為波長， δ 為路徑差值。

因為 $\delta=r_2-r_1$ ，且在 A_1A_2P 的三角中可知：

$$\begin{aligned} r_2^2 &= r_1^2 + B^2 - 2r_1B \cos(90^\circ - \theta + \alpha) \\ &= r_1^2 + B^2 - 2r_1B \sin(\theta - \alpha) \end{aligned} \quad (2.13)$$

移項後可得：

$$\begin{aligned} r_2 - r_1 &= \frac{2r_1B}{(r_1 + r_2)} \sin(\theta - \alpha) + \frac{B^2}{(r_1 + r_2)} \\ &\cong -B \sin(\theta - \alpha) + \frac{B^2}{2r_1} \end{aligned} \quad (2.14)$$

因 $r_1 \gg B$ ，所以省略第二項得：

$$\delta = -B \sin(\theta - \alpha) = -B_{//} \quad (2.15)$$

式中 $B_{//}$ 為地形對基線的平行分量。

所以地形對的相位差值可以表示為：

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{//} \quad (2.16)$$

因為變形對所產生的相位差值除因高程所產生的路徑差值外，還包含有因變動所產生的距離差值，故關係式可描述為：

$$\phi' = -\frac{4\pi}{\lambda} [r_1 - (r_3 + \Delta r)] = \frac{4\pi}{\lambda} (B_{//}' + \Delta r) \quad (2.17)$$

式中 ϕ' 為變形對影像的相位值， $B_{//}'$ 為變形對基線的平行分量。

從(2.16)式中可知 $-\frac{4\pi}{\lambda} = \frac{\phi}{B_{//}}$ ，代入(2.17)式可得：

$$\begin{aligned}\phi' &= \frac{\phi}{B_{//}} \left(B_{//}' + \Delta r \right) \\ &= \phi \cdot \frac{B_{//}'}{B_{//}} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r\end{aligned}\quad (2.18)$$

因地形對與變形對均須經過平坦化的處理，平坦化處理的方式在 4.4 節中有清楚的介紹，在此先套用處理的公式

$$\phi_f = \frac{4\pi}{\lambda} B [\sin(\theta - \alpha) - \sin(\theta_0 - \alpha)] \quad (2.19)$$

式中 ϕ_f 為經平坦化之相位值， θ_0 為第 1 個像元點位的視角。

變形對的相位值經平坦化處理後為

$$\phi_f' = \frac{4\pi}{\lambda} [B' \sin(\theta - \alpha') - B' \sin(\theta_0 - \alpha') + \Delta r] \quad (2.20)$$

為簡化表示式，令 $\theta - \theta_0 = \delta\theta$ ，(2.19)式可以表示為

$$\phi_f = \frac{4\pi}{\lambda} [B \sin(\theta_0 - \alpha + \delta\theta) - B \sin(\theta_0 - \alpha)] \quad (2.21)$$

令 $\theta_0 - \alpha = \beta$ ，可得

$$\phi_f = \frac{4\pi}{\lambda} [B \sin(\beta + \delta\theta) - B \sin \beta] \quad (2.22)$$

因為 $\delta\theta$ 值很小，所以

$$\begin{aligned}\sin(\beta + \delta\theta) &= \sin \beta \cos \delta\theta + \cos \beta \sin \delta\theta \\ &\cong \sin \beta + \delta\theta \cos \beta\end{aligned}\quad (2.23)$$

根據(2.23)式結果，可以將(2.22)式可以寫成：

$$\begin{aligned}\phi_f &= \frac{4\pi}{\lambda} [B(\sin \beta + \delta\theta \cos \beta) - B \sin \beta] \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} \delta\theta \cdot B \cos \beta\end{aligned}\quad (2.24)$$

將地形對基線在第 1 個像元方向的垂直分量表示為 $B_{\perp_0} = B \cos(\theta_0 - \alpha) = B \cos \beta$ ，則(2.24)式可以表示為

$$\phi_f = \frac{4\pi}{\lambda} \delta\theta \cdot B_{\perp_0} \quad (2.25)$$

同理，變形對經平坦化處理的相位值(2.20)式也可以表示為

$$\phi_f' = \frac{4\pi}{\lambda} \delta\theta \cdot B_{\perp_0}' + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (2.26)$$

式中， B_{\perp_0}' 為變形對基線在第 1 個像元方向的垂直分量。

因為 $\phi_f = \frac{4\pi}{\lambda} \delta\theta \cdot B_{\perp_0}$ ，所以(2.26)式可以成為：

$$\begin{aligned} \phi_f' &= \frac{\phi_f}{B_{\perp_0}} \cdot B_{\perp_0}' + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \\ &= \phi_f \frac{B_{\perp_0}'}{B_{\perp_0}} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \end{aligned} \quad (2.27)$$

透過(2.27)式，已知地形對與變形對的垂直基線值及兩者的相位值，即可計算變動量在雷達視距方向的變形量。

D-InSAR 是建構在兩張不同時期的干涉圖上，其中一張干涉圖為地形對，代表地表高程；另一張干涉圖為變形對，變形對資料則包含了地形效應及地表變形的效應。將兩張干涉圖進行差分的處理，可以移除變形對中的地形效應，得到的結果為僅因地表變形而造成的相位差值。地形資料的獲得因採用的資料來源不同，而有不同的處理方法，處理的方式可分為三種[Zebker, 2000]，分述如下：

1. 二軌跡法(Two-pass Differential Interferogram)

此法以既有的 DEM 模擬成干涉圖，當作地形對；另外選擇在兩張影像拍攝期間發生地表位移變形的 SAR 影像對產生第二張干涉圖，作為變形對。將兩幅干涉圖差分處理後即可得到地表變形量。

在二軌跡法的差分干涉處理中，DEM 的品質將影響干涉處理結果的好壞，處理的技巧在於要將雷達影像與 DEM 所產生的地形影像精確套合。此法的限制是 DEM 的精度及雷達系統的雜訊[Gabriel and Goldstein, 1988]。

2. 三軌跡法(Three-pass Differential Interferogram)

此法選用三張 SAR 影像，假設第一張影像(主影像)與第二張影像(次影像 1)拍攝

期間地表沒有變形情況產生，由此兩張 SAR 影像產生的干涉圖當作地形對；而地表變形發生在第二張影像及第三張影像拍攝期間，此時則由第一張影像與第三張影像(次影像 2)產生當作是變形對的干涉圖，此干涉圖則同時包含了地形效應及變形量所造成的相位值，將兩張干涉圖進行差分處理，可計算出地表變形量的相位值，再轉換成實際的變形量。

此種方法的優點是不用現有的 DEM 資料，也不用擔心 DEM 品質，再加上兩幅影像都計算至同一參考座標系統，不用再進行套合的處理 [Zebker et al., 1994a]。但相對的，因此法必須先將地形對進行全相位回復的處理，在處理的過程中容易引起錯誤，且以干涉圖當地形對會有許多地方因相關性不好而沒有干涉條紋，導致處理的問題及困擾[Massonnet and Feigl, 1998]。

3. 四軌跡法(Four-pass Differential Interferogram)

此法則是選用四張 SAR 影像，由第一張影像(主影像 1)及第二張影像(次影像 1)形成干涉圖作為地形對，此影像對在拍攝期間無地表變形產生。地表變動的情形發生在第三張(主影像 2)及第四張(次影像 2)影像拍攝期間，由此兩張影像作為變形對產生第二幅干涉圖。同樣的，將兩幅干涉影像作差分處理，可以得到因地表變形而產生的相位值。

以上三種處理方式中，值得注意的是三軌跡法及四軌跡法所選用的影像都必須與第一張主影像作精確套合，套合至同一影像的目的是要使地形對及變形對有相同的幾何分佈，在後續進行差分干涉處理時，能準確的尋找出對應像元的位置。

2.4 InSAR 的應用

在雷達干涉技術被大力推展後，已成功的應用在許多領域，包含地形圖製圖、數值地形模型、植物樹高研究、海岸線變化、地表變遷、地層下陷、火山災害監控、地震變形研究、兩極冰川移動、地下水研究及洋流變化等。基本的應用依原理可區分為數值地形模型及變形量測兩大類。

2.4.1 數值地形模型

在 2.2 節中所介紹的雷達干涉技術，其原理主要是利用兩幅雷達影像在斜距方向因路徑差所引起的相位差來計算地面高程值，所以利用 2.2 節中所介紹的計算公式，配合已知的成像幾何關係就可以計算出地面的高程值，也就是數值地形模型。

根據距離差值及相位的關係(2.12)式可知

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \delta \quad (2.28)$$

因成像的基線通常為數公尺至數百公尺，而斜距則長達幾百公里，所以可以合理假設 $B \ll r$ ，經過簡化計算，可以寫成[Rosen et al., 2000]

$$\phi \approx \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{r \sin \theta} z \quad (2.29)$$

式中 B_{\perp} 為基線的垂直分量， z 為地面高程值。

由此公式可知獲得的干涉相位值與地面高程值是直接相關的，從式中也可以直接得知，所求得高程的精度直接與相位值的量測精度相關，當基線值愈長，可以產生精度愈好的 DEM。但在實際的計算過程中，當基線增長時，成像的幾何條件就會改變，所獲取影像的入射角不同，兩幅影像獲取同一像元的雷達背向散射(Backscatter)狀況也會變得不一樣，因而增加相位量測的雜訊，造成資料精度的降低。

當基線的長度超過一個界線值時，此兩幅影像同一像元所產生的背向散射係數就變得完全不相關，也就是說沒有干涉訊號，干涉圖內只有雜訊，此一臨界的基線值就稱為標準基線(Critical Baseline)，此種因基線長度所造成的不相關，就稱為基線不相關[Li and Goldstein, 1990; Rodriguez and Martin, 1992]。以 ERS 衛星的影像為例，其標準基線值為 1100 m，經過各項實驗的驗證結果，當基線值超過 300 m 時，因基線所產生的影響量就會影響結果的品質[Zebker et al., 1994b]。

2.4.2 變形量測

在重複軌道模式中，兩幅影像取樣的時間間隔與取樣的空間距離是一樣重要的，空間的距離用 B 來表示，時間的間隔用 T 來表示時間基線(Temporal Baseline)，當 T 值不為 0 時，則表示地表在兩次的觀測時已有改變。目前通常只有討論相關性的移動，也就是假設在每一個像元內其散射值都有相同的變動量。

此種量測最常見的應用就是偵測高程的變化[Massonnet and Feigl, 1998; Zebker et al., 1994a]。處理的方法為利用不同時間獲得的兩幅影像，並正確的計算出影像的相位干涉圖，當兩幅干涉影像獲得期間地表沒有變動時，則因地表變動產生的相位值為 0；當有變動時，則會將變動量反應在相位值上。如果點位變動量是相關的，則干涉相位值可以表示為：

$$\phi_{\text{int}} = \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{motion}} + \phi_{\text{noise}} \quad (2.30)$$

其中，

$$\phi_{\text{motion}} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r$$

式中 Δr 是地面在雷達視距方向的變動量，而變動量相位值 ϕ_{motion} 與基線的長短不相關，因為 ϕ_{motion} 的計算不用透過地形資料，所以雷達差分干涉技術的精度可以準確到公分級。

當兩幅影像在成像期間，若地表產生變動，則第二幅影像的相位值與第一幅影像相較後，也同樣會有變動量相關的反應值，這樣的結果會顯示在干涉圖環上。因此，當干涉技術應用在產生高程時，其相位的條紋數會因基線的長度而有所不同，但當應用在變形量測時，同樣的條紋數則代表同樣的變形量，每一條紋數代表變動量為波長值的一半，因 ERS 衛星為 C 波段雷達系統，波長為 5.6 cm，所以影像每一條紋代表地表變動量為 2.8 cm。

由此可知，D-InSAR 獲得相位資訊的解析力與感測器的波長有關，Werner 等(1992)指出 ERS-1 的 C 波段(5.6 cm)就較 Seasat 的 L 波段(23.5 cm)具有優勢，對位移量的偵測將可偵測到 4.2 倍甚至更好的精度，顯示對地表變形的敏感度有顯著的改進。

D-InSAR 的敏感度是依賴觀測的幾何關係，基線的長度會影響雜訊的多寡，基線愈短將可偵測愈高精度的變化量。因為干涉條紋都是平行方向所產生，所計算的變化量都只是沿著視距的一維資料的改變。此技術已有多種應用，如地震或火山作用造成的地殼變形，或是地表沉降的長期監控等，應用的範圍相當廣泛。

2.5 形成干涉之限制條件及影響因素

同一地區的 SAR 影像並非所有像對皆有干涉現象，在產生干涉處理的過程中，必須滿足若干條件才能進行可靠的干涉處理，影響及限制干涉的因素如下 [Massonnet and Feigl, 1998]：

1. 必須為複數影像

SAR 影像的格式很多，只有同時包含振幅及相位資訊的複數影像才可作為干涉之用；其中，將振幅影像拿來作套合，相位資料則用來作干涉之處理。

2. 地表資訊保存

如果地表在兩幅影像取樣期間變化太大，致使影像的相位間沒有相關性，就無法進行干涉的處理，此種現象如水面、近海岸線的潮汐、成長快速的農業區等，這些現象會破壞干涉圖中的條紋型態，稱為不相關(Decorrelation)或者無相關性(Incoherence)。要確定處理的影像中是否有這些現象，可以藉由同調性圖來了解變化情形。

3. 相位變化值符合要求

在干涉的設定條件中，鄰近像元間的相位變化值不能超過 1 條干涉條紋(2π)，當變化值超過這個臨界點，像元間就會產生不相關現象，例如地震所產生的變形量太大，超過這個臨界點，就無法在干涉圖上顯示出來。以 ERS 衛星為例，進行偵測變形時，一個條紋代表變形 28 mm，所以在干涉圖中，如果該地區的變動情形在一像元解析度的範圍內，其雷達視距方向變化超過 28 mm，該像元就會有不相關的現象。

4. 不確定值(Ambiguity)

我們所判讀的雷達與地表間距離值，實際上是不確定的，因為在影像中僅保存相位的分數值，其餘的整數部份就是不確定值，這個不確定值就是相位回復要計算回復的整數值。回復最簡單的方法就是沿著一條路徑計算條紋數，雖然目前已有許多自動的方法可以進行全相位回復，但是無法確保最終結果都是正確的。

5. 其他限制

因為雷達為側視成像，訊號發射的角度與地面交互作用後，接收的角度必須能接收反射的訊號，才能紀錄訊號時間及強度值。因此，若因地面為光滑平面而產生鏡面效應，或因地形的坡度無法有效反射訊號，則會因缺乏有效訊號，無法產生同調現象。

上述的各項條件皆會影響 InSAR 的處理及結果，因此確保各項條件在可控制的範圍內，才能產生良好的干涉結果，如果影響的要素超過產生干涉的條件，則不會產生有效的干涉結果，此情形稱為不相關。

在重複軌道干涉技術的處理中，相位量測的品質為精度好壞的要件，但是在兩影像獲得期間，因為獲取影像的條件不一致，如在資料獲取期間不同的大氣狀況、因資料處理所產生的相位差、在資料獲取期間物體相位的改變、觀測位置的輕微變化及熱雜訊等，將會減少一致性，甚至導致同調性的喪失。

影像間的同調性代表地物、地貌的相似性，也就是同一地面點位在不同時間的相關性指標，其值介於 0~1 間。當地物、地貌的變化量小，同一地面點位的雷達回波愈一致，通常同調性高，而此時所產生的干涉條紋效果也愈好。

在成像的過程中，雷達波訊號從發射、經過大氣層、與地面交互作用散射回波、再穿過大氣層回到接收器產生接收訊號，這一連串的過程中，任何一個參數都會影響結果的精度。影響相位量測的因素整理敘述如後[Hanssen, 2001]。

2.5.1 基線

兩雷達天線間的距離稱為基線長，在干涉處理的過程中，基線值是相當重要的一個參數。當所選取影像對的基線值太長時，鄰近像元的相位值變化可能超過 2π ，會引起相位回復計算的誤差，導致錯誤的結果；若基線太短，則因幾何結構不佳，對地形變化的靈敏度較差。因此，基線長度是形成干涉條件的一重要限制因素[Zebker and Villasenor, 1992]。

在沿軌式干涉及橫軌式干涉的模式中，因兩天線的位置固定，故其基線值為固定；但在重複軌道的干涉模式中，載具的高度及天線的位置是不確定的，所以基線值隨著成像位置不同而產生變化，基線的精確值就會影響干涉結果的精確度。以衛星重複軌道干涉模式為例，獲取影像瞬間衛星的實際位置及向量就以軌道的狀態向量(State Vector)來表示。在衛星影像檔頭資料中會提供五個軌道狀態向量值，但因檔頭軌道資料的誤差約為 1 m，精度不符進行精密的地表變形研究所需。因此配合其他定位資料，提供更精確的軌道資料的輔助，才能使雷達差分干涉技術產生高精度的地表變形量。

從衛星的幾何關係中可知，所推求地形高度的精度與衛星的位置有直接的相關性，所以精進軌道的位置可以有效的提昇高程的精度。以 ERS-2 衛星為例，目前根據 ESA 所公佈的精進軌道資料，在沿軌及橫軌的方向精度在 1 m 左右，在垂直方向則可達 15-20 cm 左右。

荷蘭的 Delft 大學利用 TOPEX/POSIDON 的資料來精進軌道位置，因為 TOPEX/POSIDON 的軌道有較多的追蹤資料，且其飛行的高度較高，可減少因空氣產生的阻力，所以有較好的軌道精度，其值可以達到 5 cm 以下。Delft 大學所提供的 ERS-1 的軌道精度在徑度方向(radial)為 5-6 cm，ERS-2 的衛星軌道精度與 ERS-1 的精度相類似，在徑度方向約為 5-6 cm，在沿軌及橫軌方向精度約為 15 cm。在 1999 年 11 月以後，則因太陽能板的展開，所以精度有些微的下降[Scharroo and Visser, 1998]。

軌道的誤差可以表示成沿軌誤差、橫軌誤差及徑向誤差，其中沿軌誤差可以透過精確的影像套合來修正，所以會影響干涉結果的誤差量僅為徑向及橫軌的誤差。因為基線

計算是計算相對於兩個成像位置的長度，所以軌道誤差對基線的影響量可以視為一個誤差向量，此誤差向量含有徑向及橫向兩分量。因此誤差向量可能很小，不易直接偵測出來，但此誤差向量仍會影響干涉條紋的結果，當干涉條紋去除各項相關影響的因素後，剩下的條紋數就是軌道誤差向量所產生的影響結果。通常，在實作的過程中會以經過平坦化處理後的海岸線為等高區，以此來計算軌道的誤差量，進而修正軌道誤差。

2.5.2 大氣效應

因雷達訊號在發射與接收的過程中都必需經過大氣層，大氣對訊號的影響相當重要，影響量包括對訊號產生的訊號衰減及時間延遲，影響的結果會增加影像的雜訊，並會降低像元的同調性。一般而言，如果影像獲得時間的大氣分佈相當均勻，其影響量是可以忽視的，但是當大氣的分佈不均勻或前後取樣時間的大氣條件差別太大，就須將大氣的影響效應去除。

大氣會引起訊號折射效果，導致像元在套合處理時產生誤差且會產生相位的差異 [Tarayre and Massonnet, 1996]，也有些不同大氣的影響是地區局部的現象，會綜合在一起難以區分，如對流層內不同時間不同地區水蒸氣對訊號產生的擾亂 [Goldstein, 1995; Zebker et al., 1997]。大氣效應對干涉處理的影響及降低影響效應方法在第三章中有較完整的介紹。

2.5.3 處理過程

因為干涉技術的處理過程相當繁複，且作業的要求相當嚴格，當處理的過程有些微的疏忽，就會影響結果甚巨。因此，在處理過程中要確保處理過程的正確，才能獲得良好的精度。

同一地面點在兩幅雷達影像的成像過程中，因幾何條件不同會產生成像結果的差異。其中，因合成孔徑雷達係利用都普勒原理來提升方位解析度，所以在方位方向的成像幾何上，為使兩幅影像的方位像元正確的對應，就要應用同一都普勒中心值來產生像

元的複數影像值，使影像的方位幾何能明確對應。如果直接利用單觀點影像來進行干涉處理，就必須利用方位濾波進行修正，否則產生的干涉圖品質會明顯降低。

欲產生干涉相位圖時，必須正確的計算出影像對內每一個像元正確的對應位置，像元位置正確對應，共軛像元間才会有明顯的相關性。如果套合的精度不好，則像元間的相關性會明顯降低，甚至產生不相關現象，根據實際的分析顯示，當套合精度達到 1/10 像元時，可以產生高達 0.98 的相關值[Hanssen, 2001]。

在完成干涉圖處理時，如果干涉圖中含有軌道誤差，則干涉條紋會產生趨勢性改變，如產生與軌道垂直方向或水平方向的平行條紋。此種誤差可以透過微調的處理來修正，如果沒有修正軌道誤差，產生的干涉結果會失真。

處理過程中影響結果最大的處理程序就是全相位回復，因為計算回復值都是整數的波數值，所以只要處理過程有錯誤，產生的誤差量就是整數的波數值，而且一個地方計算錯誤，可能會影響至全幅影像，因此在進行全相位回復計算時，要細心且明確的處理雜訊相關的區域，以確保結果的精度。



2.5.4 影像資料同調性

每一種技術都有其限制條件，雷達干涉處理的必要條件就是要有干涉的效應，如果沒有干涉的效應產生，就無法進行干涉的處理，此種現象就稱為影像不相關，也就是獲取的兩幅影像訊號間沒有任何共同訊息。發生的原因可能為系統產生的雜訊或是處理過程產生的錯誤，也可能是因為地形效應所產生的背向散射訊號沒有相關性。不相關的原因可以綜合歸納成兩大類：因成像幾何造成的基線不相關及因時間變化產生的時間不相關兩類。

當成像的幾何不同時，接收的訊號值就會不同，所以當基線值超過一定界限時，同一地面像元在兩幅影像的散射值就沒有相關性，此種因基線太長所產生的不相關就稱為基線不相關。引起基線不相關的一項重要原因為成像的幾何條件不同，因為成像視角變化太大，產生許多雜訊，所以當基線值增長時，雜訊增加的程度就會明顯增加，到一定

程度時，就會完全沒有相關性，此種因成像幾何不同產生的不相關是無法避免的[Zebker et al., 1996]。

當兩幅影像的取像時間不同，因地面條件的改變所產生的不相關，就稱為時間不相關。時間不相關為重複軌道干涉技術的主要限制條件之一，主要原因為在不同時間獲取影像的地面條件已有實質改變，其中可量測的原因為因為植被及土壤含水量的改變造成介電係數改變，此種變化在熱帶雨林區特別明顯，在沙漠地區則沒有明顯變化[Zebker and Villasenor, 1992]。另外。影像成像時地區的背向散射係數受許多參數影響，如土壤濕度、粗糙度等，所以當兩次成像的條件不同時，就會產生不同的反射值，此種因時間的不同導致背向散射係數改變所引起許多不同的變化，亦稱為時間不相關。

2.6 誤差來源分析

在差分雷達干涉技術的處理中，因訊號從發送至接收的過程中，每一個過程都可能引起誤差，所以進行干涉結果的誤差來源分析，就必須討論各項相關因素。以產生干涉結果的相位差值而言，可能包含的影響量，敘述如下[Pathier et al, 2003]：

$$\Delta\phi = \Delta\phi_d + \Delta\phi_a + \Delta\phi_{te} + \Delta\phi_{oe} + \Delta\phi_{dc} + \Delta\phi_n \quad (2.31)$$

其中

$\Delta\phi_d$ ：地表變形量

$\Delta\phi_a$ ：大氣影響量

$\Delta\phi_{te}$ ：因地形產生的誤差

$\Delta\phi_{oe}$ ：因軌道產生的誤差

$\Delta\phi_{dc}$ ：因幾何及時間產生的不相關

$\Delta\phi_n$ ：因雜訊及處理產生的不相關

在干涉圖的每一個像元中，相位差值 $\Delta\phi$ 代表解析度內包含各種誤差綜合的地表位移量，其中 $\Delta\phi_d$ 為地表變形量投影在雷達視距方向的變形量分量，每一週期 2π 代表的位移量為 $\lambda/2$ 。因為雷達成像相位 2π 模組化的特性，所以實際變形的整數值為未知數，要

回復整數值必須依賴像元的成像品質與週遭像元的關係，若要求品質要達到一定水準， $\Delta\phi_{dc}$ 及 $\Delta\phi_n$ 所產生的影響量就要降低[Massonnet and Feigl, 1998]，因為 $\Delta\phi_{dc}$ 及 $\Delta\phi_n$ 會影響影像像元間的同調性，因此要了解此兩種誤差的影響程度，可以利用同調影像的變化情況來分析。另一方面，一般在選擇影像對時，會盡量要求短空間基線及短的時間基線，因為短空間基線可以減少地形誤差 $\Delta\phi_{te}$ 的影響，而短時間基線則可以減少時間不相關 $\Delta\phi_{dc}$ 項的影響。

在干涉圖的形成過程中，影像的成像幾何、感測器的特性及處理的過程會產生同調性影像，此同調影像值可以預估影像干涉的結果是否良好，但是卻無法表示獲得干涉值的資料品質，例如影響結果最大的軌道誤差及大氣誤差，在同調性影像中就無法有效的表現出來[Hanssen, 2001]。因此，在探討誤差來源時，除以同調性影像來顯示影像獲取期間的相關性外，還要探討軌道誤差及大氣誤差的影響，才能更準確的顯示干涉結果的精確度。從干涉圖的結果中可以進行不同誤差源的分析[Pathier et al, 2003]，包含：

1. 大尺度的誤差

此誤差在干涉圖中產生明顯多餘的平行或垂直的干涉條紋，誤差來源可能為軌道誤差 $\Delta\phi_{oe}$ ，也可能為大比例的大氣誤差 $\Delta\phi_a$ ，甚至可能是這兩種誤差的結合。另外，DEM 誤差 $\Delta\phi_{te}$ 也會引起大比例的誤差，但是此類誤差在不同的干涉圖中都位於同一地區，且其影響的量會隨基線值的長短而改變，當基線值愈短時，其影響愈小。

在實際的處理過程中，雖然 DEOS(Delft Institute for Earth-oriented Space Research) 的精確軌道資料已比 CEOS(Committee on Earth Observing Systems)檔頭的軌道資料精確許多，但仍含有軌道誤差，所以利用 DEOS 精密軌道的資料產生干涉圖，仍必須進行軌道微調的處理，才能確保干涉結果的正確性。

2. 中尺度的誤差

此誤差在干涉圖中會產生不規則的影響，例如原來平滑的干涉條紋突然有不規則變動，此類誤差來源可能為大氣影響或局部特殊地形變動。此類誤差基本上排除軌道誤差的影響，因為中比例的誤差與軌道不相關。直接觀察干涉圖的變化，顯示此類變動要在不同的干涉圖間顯示不同結果，所以此類的影響量主要來源為大氣影響量

$\Delta\phi_a$ 。因此假設大部分的中比例誤差在位置及影響量均為隨機的，並且因為隨機的影響與地表的變形會結合在一起，所以在判讀分析上很難加以區分。並且，其他類別的中比例誤差就較容易分別，如位於河床上的相位值，因為大氣中水蒸氣的含量較大，所以在河流區有不同的相位變化。

3. 小尺度的誤差

相位值在鄰近像元間有快速且巨大的改變，且該像元為低相關性像元，此種誤差來源可能為 $\Delta\phi_{dc}$ 及 $\Delta\phi_n$ ，表示有雜訊影響。

2.7 最佳基線

在重複軌道干涉技術中，成像幾何關係著產生數值地形模型或是地表變形監測的重要參數。精確的軌道參數可以精確的將產生的干涉圖計算至因地表高程或是地表變動所產生在雷達視距方向的距離差值。精確軌道資料的獲得方法很多，但是有其侷限性，在大部分的地區，仍以精密軌道資料為主，因此探討基線對干涉結果的影響，可以讓使用者在選擇影像時，判斷基線的狀況是否能符合其應用所需。

基線的定義是實際裝置在載台上兩分離天線的位置或者是兩重複軌道的距離，基線的長度決定 InSAR 資料的同調性，所以在處理資料前就必須先知道基線的長度及位置。以成像幾何的條件來看，基線長度愈長，對高程誤差的敏感性較低，可以得到較好的高程值；但從產生干涉結果的角度來看，基線愈長則相關性愈差，產生的高程精度也越差，所以最佳基線的值為何，就有待探討。

因為相位差值與高程的關係式為

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{2\pi}{\lambda} (B \cos \alpha \sin \theta - B \sin \alpha \cos \theta) \\ z &= H - r \cos \theta\end{aligned}\tag{2.32}$$

因為

$$\begin{aligned}\cos \theta &= \cos[\alpha + (\theta - \alpha)] \\ &= \cos \alpha \cdot \cos(\theta - \alpha) - \sin \alpha \cdot \sin(\theta - \alpha)\end{aligned}$$

$$= \cos \alpha \cdot \cos(\theta - \alpha) - \sin \alpha \cdot \frac{\lambda \phi}{2\pi} \cdot \frac{1}{B}$$

所以(2.32)式可以整合寫成

$$z = H - r[\cos \alpha \cdot \cos(\theta - \alpha) - \sin \alpha \cdot \frac{\lambda \phi}{2\pi} \cdot \frac{1}{B}] \quad (2.33)$$

從(2.33)式中可以發現影響的參數有 r, B, α, H 及 θ 。因此可以推導得

$$\sigma_z^2 = \left(\frac{\partial z}{\partial r} \sigma_r\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial B} \sigma_B\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \alpha} \sigma_\alpha\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial H} \sigma_H\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \theta} \sigma_\theta\right)^2 \quad (2.34)$$

Li 及 Goldstein (1990) 將所有參數的影響量加以分析，結果顯示在空載系統中 σ_H 、 σ_α 、 σ_B 等三項參數的影響量可以忽略，因此提出一個簡化的模式來進行 InSAR 的誤差分析，其影響評估僅考慮 σ_r 及 σ_θ ，因此(2.34)式可以簡化為

$$\sigma_z^2 = \left(\frac{\partial z}{\partial r} \sigma_r\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \theta} \sigma_\theta\right)^2 \quad (2.35)$$

在雷達接收地面訊號的過程中，通常假設地面的點位為理想的散射體，因此由地面點位反射至兩雷達天線會產生不同相位值的原因為雷達波傳播距離的差異。但因接收訊號的天線位置不同，從天線至地面點間的成像角度不同，因此從雷達的成像角度而言，所對應的地面散射中心就有些微的差異，所以兩雷達天線接收訊號的相位差值就不能單純的視為距離差的影響，所以考慮相位的量測精度受訊號雜訊比、雷達波長及基線值的影響。

所以評估相位量測精度時，將誤差來源區分為量測誤差及因雜訊引起的誤差，量測誤差受地面像元在雷達視距方向投影面積的大小及傳播距離的影響，可以表示為[Mrstik et al., 1996]

$$\sigma_{\theta_w} \approx \frac{0.6W}{r} \quad (2.36)$$

式中， W 為地面解析像元投影至斜距垂直方向的分量。

而雜訊的影響，經過 Mrstik 等(1996)以模擬資料測試後可得

$$\sigma_{\theta_N} \approx \frac{\Delta \theta}{\sqrt{SNR}} \quad (2.37)$$

其中， SNR 為訊號雜訊比。

因此，相位的量測精度為綜合(2.35)式及(2.36)式，表示為

$$\sigma_{\theta}^2 = \left(\frac{\Delta\theta}{\sqrt{SNR}}\right)^2 + \left(\frac{0.6W}{r}\right)^2 \quad (2.38)$$

其中為求有效辨識雷達波訊號， $\Delta\theta$ 取 3dB 頻寬為

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{2B \cos(\theta - \alpha)} \quad (2.39)$$

而雷達天線至地面間的距離則量測精度則與雷達的斜距解析度相關，經模擬測試可以表示為[Mrstik et al., 1996]

$$\sigma_r = \frac{R_r}{\sqrt{12}} \quad (2.40)$$

式中， R_r 為雷達的斜距解析度，該值可以由基線值及標準基線值來決定

$$R_r = \frac{P_y}{(1 - B/B_c)} \quad (2.41)$$

其中 P_y 為地距解析度。

根據 Zebker 等(1994b)推導，標準基線可以表示為

$$B_c = \frac{r \lambda}{2 P_y \cos \theta} \quad (2.42)$$

將(2.41)式及(2.42)式代入(2.40)式可得

$$\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{12}} \frac{P_y}{(1 - 2P_y \cos \theta / r \lambda)} \quad (2.43)$$

從(2.32)高程的公式中 $z = H - r \cos \theta$ ，可以推算得：

$$\frac{\partial z}{\partial r} = -\cos \theta \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial z}{\partial \theta} = r \sin \theta \quad (2.45)$$

將(2.38)至(2.45)式各項參數代入(2.35)式可以計算得：

$$\begin{aligned}\sigma_z^2 &= (-\cos\theta \frac{1}{\sqrt{12}} \frac{P_y}{(1 - \frac{2BP_y \cos\theta}{r\lambda})})^2 + (r\sin\theta)^2 [(\frac{\lambda}{2B \cos(\theta - \alpha)\sqrt{SNR}})^2 + (\frac{0.6W}{r})^2] \\ &= \frac{P_y^2 \cos^2 \theta}{12(1 - \frac{2BP_y \cos\theta}{r\lambda})^2} + \frac{r^2 \lambda^2 \sin^2 \theta}{4B^2 \cos^2(\theta - \alpha)SNR} + 0.36W^2 \sin^2 \theta\end{aligned}\quad (2.46)$$

令 $\frac{\partial \sigma_z^2}{\partial B} = 0$ ，可以推導得

$$\frac{P_y^2 \cos^2 \theta}{12} (-2)(1 - \frac{2BP_y \cos\theta}{r\lambda})^{-3} (\frac{2P_y \cos\theta}{r\lambda}) + \frac{r^2 \lambda^2 \sin^2 \theta}{4B^2 \cos^2(\theta - \alpha)SNR} (-2)B^{-3} = 0\quad (2.47)$$

整理後為

$$\frac{B^3}{(1 - \frac{2BP_y \cos\theta}{r\lambda})^3} = \frac{r^2 \lambda^2 \sin^2 \theta}{2 \cos^2(\theta - \alpha)SNR} \cdot \frac{-3r\lambda}{P_y^3 \cos^3 \theta}\quad (2.48)$$

因此可得

$$\frac{B}{(1 - \frac{2BP_y \cos\theta}{r\lambda})} = \frac{r\lambda}{P_y \cos\theta} \sqrt[3]{\frac{-3 \sin^2 \theta}{2 \cos^2(\theta - \alpha)SNR}}\quad (2.49)$$

移項後為

$$B = (\frac{r\lambda}{P_y \cos\theta} - 2B) \cdot \sqrt[3]{\frac{-3 \sin^2 \theta}{2 \cos^2(\theta - \alpha)SNR}}\quad (2.50)$$

根據(2.50)式可計算得最佳基線為：

$$B_{opt} = \frac{r\lambda}{P_y \cos\theta} \cdot \frac{\sqrt[3]{\frac{-3 \sin^2 \theta}{2 \cos^2(\theta - \alpha)SNR}}}{1 + 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{-3 \sin^2 \theta}{2 \cos^2(\theta - \alpha)SNR}}}\quad (2.51)$$

第三章 大氣效應處理

在雷達干涉處理模式中，假設雷達波的行進是不受影響的，引起相位差的來源只有距離差值。然而，在雷達的成像過程中，雷達波從衛星天線發射出來至與地面交互作用後返回接收器之間，訊號的路徑需經過大氣層，接收的雷達訊號一定會受大氣層的影響，所以探討高精度的地表變形研究，就要考慮大氣效應的影響。

在干涉處理的三種模式中，因沿軌式及橫軌式的干涉模式都是在同一載台上同時接收兩個訊號，大氣的條件是相當類似的，影響量相對就小很多，但在重複軌道的模式中，因接收的時間及地點都不同，所以大氣的影響就成為一項重要的因素，因此討論的影響量都是以重複軌道的模式為主。在重複軌道干涉量測地表變形的應用中，兩幅雷達影像必須在不同的時間觀測，大氣條件的差異會引起不同的相位延遲，對干涉結果產生影響，因此如何降低大氣引起的相位差，就是本章討論的重點。



3.1 簡介

雷達干涉技術的原理，就是利用雷達能準確量測距離的特性，以不同時間、地點所產生的距離差值來推算地表的高程及變化等應用，主要的工具就是雷達波。通常大氣層對電磁波的影響主要可分為兩類，依影響的性質可以分為電離層延遲誤差及對流層延遲誤差的影響。

雷達干涉技術受大氣影響而產生誤差，最早提出大氣影響的研究學者 Massonnet 等(1994)發現在干涉圖中有些分布的狀況有些異樣，因此判斷此種不尋常的變化為大氣的影響，也因此引起其他學者的注意，之後對大氣的影響有許多的研究成果出現。隨後 Zebker 等(1997)依據模擬的結果提出結論，當大氣的溼度因空間或時間改變導致產生 20% 的改變時，會導致地面變形量的誤差達到 10 cm 至 14 cm，在 SIR-C/X-SAR 影像基線長 100 m 至 400 m 間的地形高程量測，誤差的範圍從 80 m 至 290 m [Zebker et al.,

1997]。在重複軌道的干涉量測中，大氣的影響就被視為是重要的影響因素[Massonnet and Feigl, 1995; Rosen et al., 1996; Tarayre and Massonnet, 1996; Li et al., 2003]。

大氣影響重要的因素有壓力、溫度及水汽，在大部分的例子中，壓力及溫度的變動並不會造成相位值太大的影響，此兩因素的影響量遠小於水汽的影響，甚至也無法區分大氣及軌道誤差產生的錯誤[Tarayre and Massonnet, 1996; Hanssen, 1998]。水汽主要在對流層中靠近地表的區域(地面上 2 km)，此範圍的大氣層有各種大氣強烈的湍流混合作用，這種作用會導致在平面區及山區不同折射效果產生相位梯度的差異。

3.2 理論依據

3.2.1 折射率

電磁波傳播的理想介質為真空，在真空中，電磁波的傳播速度為光速。實際上，雷達波傳播的空間並不是真空，而是充滿大氣介質的空間。在衛星軌道上發射雷達波到地面點交互作用後返回雷達感測器，雷達波必須經過性質、狀態不同的大氣層，這些外在的因素，可能改變雷達波傳的方向與速度，這種現象稱為大氣折射。

在真實的三維空間中，每一個變動的時間點，電磁波傳播的速度與通過介質折射指標 n 有關，電磁波在大氣中的傳播速度可以用折射指標(Refractive Index) n 來表示，定義為

$$v = cn^{-1} \quad (3.1)$$

式中 c 為真空中的光速， $c=299792458(\text{m/s})$ 。

折射指標 n 與大氣的組成及結構密切相關，真空的折射指標為 1，在正常的大氣條件下，介質折射指標都小於 1，也會隨著時間地點輕微的變動，所以就用折射率(Refractivity) N 來替代，折射率的定義為

$$N=(n-1)\times 10^6 \quad (3.2)$$

通常簡稱折射率為介質中與真空中的速度比，若電磁波在介質中的傳播速度與頻率有關，則稱該介質為擴散性介質。

在大氣層中一般雷達的波長範圍，折射率可以表示為[Hanssen, 2001]

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} + (k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2}) - 4.03 \times 10^7 \frac{n_e}{f^2} + 1.4W \quad (3.3)$$

式中

P_d : 乾空氣的部份壓力(mbar)。

T : 絕對溫度(kelvin)。

e : 水汽的壓力(mabr)。

n_e : 立方米中的電子數密度。

f : 雷達頻率。

W : 液態水常數(g/m³)。

在(3.3)式中， $k_1=77.6$ 、 $k_2=71.6$ 、 $k_3=3.75 \times 10^5$ ，且式中四個分量 $k_1 \frac{P_d}{T}$ 代表對流層乾空氣分量、 $(k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2})$ 為對流層濕空氣分量、 $-4.03 \times 10^7 \frac{n_e}{f^2}$ 代表電離層及 $1.4W$ 為液態水的影響量。



3.2.2 大氣延遲

雷達干涉技術可以用來研究大氣的折射率變動，假設參數 $S_k^{t_1}$ 為 t_1 時間雷達波行進大氣層比在真空中速度慢，所導致在斜距方向因時間延遲的距離延遲量。這個原因可能為沿著雷達與地面點間的大氣影響導致速度改變，也可能為路徑彎曲導致延遲。根據以上定義，地面點 k 在影像獲得時間 t_1 所產生的斜距大氣延遲為[Hanssen, 2001]

$$S_k^{t_1} = 10^{-6} \int_0^H \frac{N}{\cos \theta_{inc}} dh + \left(\int_0^H \frac{1}{\cos \theta_{inc}(h)} dh - R_k \right) \quad (3.4)$$

式中

θ_{inc} : 入射角或天頂角

H : 地面目標物至衛星間距離

R : 斜距

在這個計算式中， $10^{-6} \int_0^H \frac{N}{\cos \theta_{inc}} dh$ 係考慮因傳播速度引起的距離延遲，

$\left(\int_0^H \frac{1}{\cos \theta_{inc}(h)} dh - R_k \right)$ 為路徑彎曲的延遲。通常在入射角小於 87 度時， $S_k^{t_1} / S_{k,bending}^{t_1}$ 的比

值趨近於 0，因此在合成孔徑干涉雷達的處理中，可以忽略因路徑彎曲所產生的延遲，

斜距的大氣延遲可以寫成

$$S_k^{t_1} = 10^{-6} \int_0^H \frac{N}{\cos \theta_{inc}} dh \quad (3.5)$$

大氣折射率對干涉相位的影響可以簡寫為

$$S_k^{t_1} = \frac{N}{\cos \theta_{inc}} \quad (3.6)$$

(3.6) 式中表示單向行進時，訊號每 km 的延遲量，延遲量的單位為 mm。

3.3 大氣模式

覆蓋在地球表面上的大氣層由氣體所組成，大氣層能存在於地球表面，是因為地球重力的作用，所以越靠近地面，空氣的密度就越高，主要集中在大氣層底部，其中 75% 的質量分布在 10 km 以下，90% 以上的質量分布在 30 km 以下。大氣在垂直方向上的組成和物理性質有顯著的差異，按溫度及成分的垂直變化可將大氣層分為對流層、平流層、中間層、電離層和散逸層；若依大氣的成分可分為均質層和非均質層。

從地面向上約 40 km 範圍內的大氣底層稱為對流層，整個大氣層質量的 99% 集中在該層中。對流層與地面接觸，會從地面得到輻射熱能，其溫度隨高度的上升而下降，平均每升高 1 km 下降約 6.5°C。在對流層中，雖有少量帶電離子，但其對電磁波的傳播幾乎沒有影響，所以對流層的大氣屬於中性，對於電磁波的傳播不屬擴散性介質，也就是對流層對電磁波的影響與頻率無關。

在對流層範圍內，大氣受對流影響，因此把這個空間範圍稱之為對流層。對流層內，空氣較不穩定，上下對流頗盛，大氣中之水汽，幾乎全部存於此層內，故雲、霧、雨、雪等常見之天氣現象，均限於此對流層中，且多發生於此層之下部。

距地面 70 km 以上範圍，空氣至為稀薄，因受太陽紫外線能量，所以該大氣層的溫度隨高度的上升而迅速升高。同時由於太陽的作用，使空氣分子易於電離，空中自由電子頗為豐富，通稱為電離層。在此範圍內充滿了離子化的微粒與電子，該層中電子的密度，決定於太陽輻射的強度和大氣的密度。由於電子的性質會對電磁波造成很大的折射影響，當電磁波信號通過電離層時將受到這一介質擴散的影響，使其信號的傳播產生變化，所以電離層對電磁波的傳播屬擴散性介質，電磁波受電離層的影響與頻率有關。

雖然大氣條件隨著時間地點隨時有不同的改變，因此無法準確的校正大氣的影響，但是發展一個可以描述大氣延遲的模式，讓大氣的影響能有效降低的方法，是目前研究的重點。大氣層對電磁波的影響主要可分為兩類，依其性質可以分為對流層延遲誤差的影響及電離層延遲誤差的影響，因此分別探討此兩類大氣層的影響。

3.3.1 對流層

因為對流層為非擴散性介質，所以電磁波在其中的傳播速度與頻率無關，且對流層的折射率大於 1，隨著高度的增加逐漸減少，接近對流層頂部時折射率接近於 1。

對流層的折射率與大氣壓力、溫度及溼度關係密切，但因該層的對流作用很強，且大氣壓力、溫度及溼度等因素變化複雜，所以對於大氣折射率的變化及影響，目前尚未準確的模型化。為便於分析及研究，通常將對流層折射對觀測量的影響可分為乾分量和濕分量兩部份，表示為

$$N = N_d + N_w \quad (3.7)$$

乾分量與濕分量與大氣條件的關係式為

$$N_d = 77.6 \frac{P}{T}$$
$$N_w = 3.73 \times 10^5 \frac{e_0}{T^2} \quad (3.8)$$

式中

P ：大氣壓力(mbar)；

T ：絕對溫度；

e_0 ：水氣分壓

所以沿著天頂方向，對流層對電磁波傳播路徑的影響可以表示為

$$\delta S = \delta S_d + \delta S_w \quad (3.9)$$

式中

δS : 沿著天頂方向電磁波傳播路徑的距離差

δS_d : 距離差的乾分量

δS_w : 距離差的濕分量

其中，乾分量與大氣壓力和溫度有關，而濕分量主要與信號傳播路徑上的大氣狀況有關。

在電磁波傳遞過程中，由地面向上沿天頂方向電磁波的傳播路徑可以表示為

$$S = \int^H n dH = S_0 + 10^{-6} \int^H N dH \quad (3.10)$$

式中 S_0 : 電磁波在真空中的傳播路徑

$$S = S_0 + 10^{-6} \int^{H_d} N_d dH + 10^{-6} \int^{H_w} N_w dH \quad (3.11)$$

式中， H_d 為 N_d 趨近於 0 的高程值，大約為 40 km； H_w 為 N_w 趨近於 0 的高程值，大約為 10 km。

由上列各式可知，因對流層引起的路徑差 δS 可以表示為

$$\delta S = S - S_0 = \delta S_d + \delta S_w \quad (3.12)$$

其中

$$\delta S_d = 10^{-6} \int^{H_d} N_d dH$$

$$\delta S_w = 10^{-6} \int^{H_w} N_w dH \quad (3.13)$$

通常不太可能沿著電磁波傳播路徑直接測定對流層的折射率，所以有許多大氣模型可以根據地面的氣象數據來描述折射率與高程的關係。

1. Hopfield model

根據 Hopfield (1971) 折射率的乾分量與高程的關係為

$$N_d = N_{d0} \left(\frac{H_d - H}{H_d} \right)^4 \quad (3.14)$$

式中， N_{d0} 為地面大氣折射率的乾分量，對於 H_d 的值，Hopfield 以全球高空氣象探測資料分析，推薦的經驗公式為

$$H_d = 40136 + 148.72(T - 273.16) \quad (3.15)$$

所以 Hopfield 模式可以寫成

$$\begin{aligned} \delta_d &= 1.55208^{-4} P \cdot \frac{40136 + 148.72 \times T}{T + 273.16} \\ \delta_w &= -0.282 \cdot \frac{P_w}{T + 273.16} + 8307.2 \cdot \frac{P_w}{(T + 273.16)^2} \end{aligned} \quad (3.16)$$

式中 T 的溫度為絕對溫度。

對流層中，乾分量與溫度及壓力相關，影響量為 90%；相對的，濕分量則與水汽及溼度相關，雖然影響量只佔對流層的 10%，但因濕分量較為複雜，由於大氣溼度隨地理緯度、季節及大氣狀況不同而異，尚難建立較精確的理論模式。

2. Saastamoinen Model

Saastamoinen 在 1972 年提出的模式為[Saastamoinen, 1972]：

$$\delta_{trop} = [0.002277 - 1.11 \times 10^{-5} \cos \Lambda] P_s + 0.002277 \left[0.05 + \frac{1225}{T_s} \right] e_s \quad (3.17)$$

其中下標 s 表示地表的參數值， Λ 表示觀測點的緯度。

本模式係假設大氣層的壓力、溫度及水蒸氣部份壓力的變化是平滑的，在大氣情形符合假設的條件下，干涉結果經對流層的修正效果良好[Zebker et al., 1997]。

對流層之影響會隨衛星高度、測點緯度及測點位置高度而異。當衛星於天頂方向時，對流層之乾分量對距離觀測值的影響約佔對流層影響的 90%，且這種影響可以應用地面的大氣資料計算。雖然濕分量的影響不大，但由於難以確定信號傳播路徑上的大氣物理參數，所以目前濕分量部份無法準確地測定。

3.3.2 電離層

電離層有許多自由電子，其電子的含量以電子密度或單位立方米內的電子數量表示。電子的含量會影響電磁波的行進路徑，在電離層中折射指標的擴散公式為

$$n=1-40.28 \frac{TEC}{f^2} \quad (3.18)$$

式中 TEC (Total Electron Content, TEC) 為立方米中的電子含量， f 為電磁波的頻率。

由上式可知，電離層的折射率與電子密度成正比，與電磁波的頻率平方成反比。對於固定波長的雷達波而言，折射率大小影響的因素為電子密度。



若直接以距離差來表示，則其關係式為

$$\delta_{p,iono}^{i} = \frac{K}{f} TEC \quad (3.19)$$

式中 $K=-40.28 \text{ m}^3\text{s}^{-2}$ 。

電離層對信號傳播路徑的影響大小，主要取決於電子總量和信號的頻率 f 。以 ERS 雷達影像為例，C 波段的雷達波，入射角 23 度，則上式可以寫成

$$\delta_{p,iono}^{i} = -1.54 \times 10^{-18} \times TEC \quad (3.20)$$

因 TEC 值變化範圍大約從半夜 $20 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ 至中午太陽最大的時候 $100 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ ，當電子數增加時，會減少計算的距離，但以衛星拍攝的狀況而言，重複拍攝到同一區域都

在每天同一時間，所以時間上的差異不大，但是如果因氣候的不同，影響電離層的電子含量，才會有不同的影響量。

如果研究區有雙頻的 GPS 資料，則可以利用 GPS 的雙頻資料計算得電離層的修正模式計算修正量，修正公式為

$$\delta_{p,iono} \approx \frac{A}{f^2} + \frac{B}{f^3} + \frac{C}{f^4} \quad (3.21)$$

式中的係數值 A、B、C 的值可以由雙頻的 GPS 資料中獲得，

3.4 大氣效應對干涉影響

SAR 影像的相位資訊為雷達與地面點間距離的函數，干涉處理的原理就是結合兩幅不同時間 SAR 影像，以同一地面點與兩雷達影像間路徑差的資訊來獲得地表資訊，一般來說，路徑差的來源可能為地形高度引起的路徑差異，也可能是時間點不同，地面點變動量產生的路徑差異。事實上，實際的路徑變動也可能是雷達波受大氣層影響所產生的延遲或折射影響的路徑差。以往有許多學者介紹大氣層對干涉圖影響，但通常將之視為雜訊處理[Hanssen, 2001]。

在干涉處理的三種模式中，因沿軌式及橫軌式的干涉模式都是在同一載台上同時接收訊號，大氣條件相當類似，可以忽略大氣效應的影響，但在重複軌道的模式中，因接收的時間及地點都不同，所以大氣的影響就變的非常明顯且重要，因此討論的影響量都是以重複軌道的模式為主。

訊號延遲就是訊號傳遞時間超出光速在真空中行進的時間，超出的路徑長可以透過視距方向的積分直接計算得到，其中影響量最大的是水汽，其次為溫度、液態水及壓力引起的路徑變動。延遲的量測可以利用空間大地的技術來獲得大氣層中可沉澱水汽比例 [Saastamoinen, 1972]。沉澱水汽為將垂直方向的水汽予以積分加總，單位為 kg/m^2 。GPS 的量測可提供單個點位沉澱水汽的時間變動，而 InSAR 的量測，可以提供兩影像獲得期間全面性的變動狀況。

一般來說，地面點 P 於 SAR 影像獲得時間 t_1 時之相位值 $\phi_p^{t_1}$ 可以表示為

$$\phi_p^{t_1} = \phi_{p,geom}^{t_1} + \phi_{p,prop}^{t_1} + \phi_{p,scat}^{t_1}, \quad -\pi \leq \phi < \pi \quad (3.22)$$

其中

$\phi_{p,geom}^{t_1}$ ：因幾何產生的相位差。

$\phi_{p,prop}^{t_1}$ ：傳播速度改變產生的相位差。

$\phi_{p,scat}^{t_1}$ ：地面地位散射的相位差。

雷達干涉技術以結合兩幅不同時間獲得的影像，並經精密套合後，計算所得之干涉相位為

$$\phi_p = \phi_p^{t_1} - \phi_p^{t_2}, \quad -\pi \leq \phi < \pi \quad (3.23)$$

式中的相位差包含有(3.12)式中的幾何條件、傳播條件及地面散射條件等三項分量。因為散射條件為干涉處理的重要限制因素，如果散射的情形變化太大，則無法形成干涉，所以在有相關性的條件下，因散射產生的相位差則可以忽略。

在干涉的結果中要分析傳播的影響量，就必須先將幾何的影響量消除。消除幾何影響量可以藉由精確軌道資料及數值地形模型來完成，至於地表變動的部份，可以利用短時間的影像對來計算。所以最後的干涉圖中，只剩下軌道位置不夠精確所產生的趨勢誤差及大氣引起的傳播誤差。此經過各項修正後的差分干涉圖，其相位值可以判定為雷達天線與地面像元間空間變動及兩幅影像獲得期間大氣條件不同所產生的差異，因此在干涉圖中 p 及 q 兩個像元的延遲差異量 $\delta_{p,q}$ ($\delta_p - \delta_q$) 直接相關於相位差 $\phi_{p,q}$ ($\phi_p - \phi_q$)，可得關係式為：

$$\delta_{p,q} = \frac{\lambda}{4\pi} \phi_{p,q} \quad (3.24)$$

以 C 波段而言，則(3.24)式可寫成

$$\delta_{p,q} = 28 \frac{\phi_{p,q}}{2\pi} \quad (3.25)$$

此延遲量為斜距方向的延遲量。而對應至天頂方向的延遲量可以利用簡單的三角函數計算，得

$$\delta_{p,q}^z = \delta_{p,q} \cos \theta_{inc} \quad (3.26)$$

在獲得的干涉圖中，分析訊號延遲的相位值中可能包含有系統誤差，此系統誤差可能為獲得影像時的衛星位置不夠精確所造成，此誤差量在干涉圖中會有明顯的趨勢變化，進行延遲量分析之前，必須先將誤差量消除。但將此趨勢值消除，也可能會將因壓力、溫度及電離層的影響量一併消除[Hanssen, 2001]。因此，將 p,q 兩點因折射率影響的延遲量代入，可得

$$\delta_{p,q}^{z,t_i} = 10^{-6} \cos \theta_{inc} \left(\int_p^a Ndz - \int_q^a Ndz \right) \quad (3.27)$$

3.5 大氣效應偵測

從前述各項結果中證實大氣效應會影響干涉的結果，因此，偵測干涉圖中的大氣效應，並計算大氣的影響量，才能正確的將大氣效應修正，提高雷達干涉量測結果的精度。

在雷達干涉產生的干涉圖中，包含的資訊有地形效應、軌道幾何效應、地表變形、大氣影響及雜訊等參數，要偵測干涉圖中的大氣效應就要將其他的影響因素予以消除，目前較有效偵測大氣效應影像的方法有三種：

1. 從干涉圖中移除其他效應的方法：

干涉圖的變形量主要來源為地面高程、表面變形、大氣傳播延遲及雜訊等，因此在干涉圖中利用已知 DEM 資料移除地形效應，並用短時間基線干涉圖將變形量予以移除，剩下結果就是大氣及雜訊的影響，將結果干涉圖回復原相位值，就視為大氣效應的影響量。

Fujiwara 等(1998)利用此方法計算日本 Izu Peninsula 地區因大氣引起的誤差大約為 16 cm; Hanssen (1998)利用 26 幅前後差一天的 ERS 影像對評估大氣在荷蘭地區的影響，得到均方根誤差為 0.5 至 3.6 徑度，大約為 8.4 mm 至 64.4 mm。

2. 利用三片法模式決定大氣效應

在差分干涉圖的處理方法中，利用三幅影像可以產生兩幅干涉圖，並且利用此兩幅干涉圖，可以將一幅視為地形對，另一幅視為變形對，進行差分處理，將變形對的資料去除地形效應，獲得變形量。

如果影像獲得期間並無地表變形的現象，則將兩幅干涉圖進行差分處理，獲得的變形量就可視為大氣的影響量。Goldstein (1995)利用此法偵測美國加州 Mojave 沙漠地區，結果顯示大氣影響量的均方根誤差約為 0.3 cm。

3.6 移除大氣效應

隨著眾多的研究者發現大氣的確會影響干涉結果[Goldstein, 1995; Massonnet and Feigl, 1995; Tararye and Massonnet, 1996]，為求精確的獲得地表變形量，瞭解大氣對干涉的影響，並進而消除大氣的影響已是必須進行的工作。

3.6.1 利用 GPS 資料移除大氣效應

因為 GPS 的訊號也經過大氣層，同樣受大氣效應的影響，所以利用同時間、同地區的 GPS 資料，可以推求各項的大氣模式參數，利用這些參數資料，可以進行干涉處理的改正資料。利用 GPS 資料進行雷達干涉技術大氣效應修正的流程如圖 3.1。

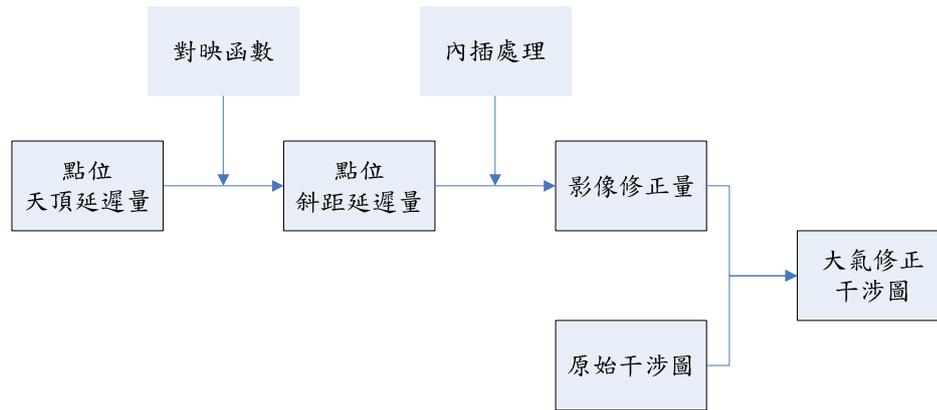


圖 3.1 以 GPS 資料修正大氣效應流程圖

對流層的天頂方向延遲量可以利用固定站的 GPS 觀測量獲得，但是影響雷達干涉技術的大氣效應則在斜距方向，因此須將天頂影響量轉換至斜距方向，其關係如圖 3.2。

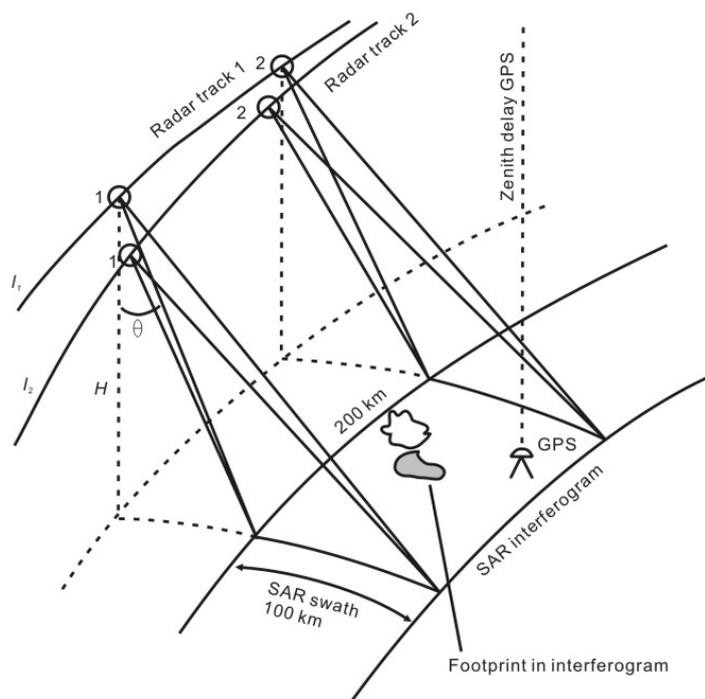


圖 3.2 天頂方向延遲與斜距延遲關係圖[修改自 Hanssen, 2001]

將天頂的延遲量轉換至雷達視距方向延遲量的方法可用對應函數的方法計算，簡單的對應關係可以用三角函數的方式計算

$$\delta = \delta^z / \cos \theta \quad (3.28)$$

式中， δ^z 為天頂方向的延遲量， δ 為斜距方向延遲量， θ 為點位之雷達視角。

因為在一般地區，GPS 的網型分佈一定比干涉影像的解析度低許多，所以內插的處理就是必須進行的動作。其中，Williams 等(1998)比較克利金(Kriging)、雙線性(Bilinear)及加權距離反比內插法(Inverse Distance Weighted, IDW)，針對三種不同內插方法對大氣效應修正效果進行比較，結果顯示 Kriging 的效果最好。Janssen 等(2004)也比較 IDW、Kriging 及雲線(Spline)等三種內插方法，結果顯示 IDW 及 Kriging 兩種內插方法的效果一樣，Spline 的效果較差，作者建議可採用前兩種方法進行內插處理。

考慮此自然的大氣效應，Williams 等(1998)利用點位的氣象資料及 GPS 連續站觀測資料進行大氣影響量的去除，此研究以模擬資料證明，可以利用稀疏的點位來去除雜訊，也可以利用 GPS 的觀測的天頂延遲量來估計干涉的大氣延遲量。

Li 等(2004)整合 GPS 及地面的氣象資料，發現 GPS 觀測的天頂延遲量均方根誤差為 0.5 cm，地面氣象觀測資料估計的天頂延遲量均方根誤差約為 4 cm。並以香港的地區影像為例，探討大氣效應的影響對間隔 1 天及 10 天不同影像對產生的路徑誤差約為 7.8 cm 及 9.5 cm。經整合 GPS 及地面氣象資料的大氣效應修正後，可以間隔 1 天及 10 天的路徑誤差修正 4.9 cm 及 5.8 cm，精度明顯提升。Xu 等(2006)以 35 個東京地區 GPS 連續站的資料計算大氣修正量，未經大氣修正前干涉圖在斜距方向的均方根誤差為 1.33 cm，結果修正後降低至 0.87 cm。

3.6.2 利用氣象資料移除大氣效應

關於對流層折射的影響，一般處理的方法為採用對流層數學模式加以改正，如 Saastamoinen、Hopfield 等模式[Hopfield, 1971; Saastamoinen, 1972]，利用地面觀測的氣象資料配合對流層的模式來估計大氣影響量。Hanssen 和 Feijt(1996)及 Zebker 等(1997)建議以 Saastamoinen 的模式來進行干涉處理時對流層效應的去除。

大氣層中水汽的空間分佈是相當重要氣象因素，水汽也是影響訊號路徑的主要因素，雖然空載的輻射量測儀可以偵測水汽的空間分佈，但其解析度仍不夠，有的氣象資料解析度及涵蓋的範圍無法滿足 SAR 影像解析度的需求，所以處理的程序中，需加入

內插處理的程序；如果有足夠的地面氣象觀測資料，就可以直接以對流層模式直接計算每一個地面站的對流層延遲量。

Delacourt 等(1998)以地面點位觀測的氣象資料及對流層延遲在垂直方向的經驗模式來修正大氣影響量，結果對流層的影響可以達到 2 條干涉條紋，平均的誤差量為 1 條干涉條紋。Li 等(2006)利用掛載在 Envisat 衛星的中解析度成像光譜(Medium Resolution Imaging Spectroradiometer, MERIS)氣象資料來修正 Envisat 雷達影像的干涉圖，干涉圖與 GPS 資料在斜距方向的均方根誤差從修正前的 0.55 cm 降低至修正後為 0.35 cm，精度明顯提昇。

3.6.3 以堆疊的方法消除大氣效應

因為大氣效應的影響是因時、因地不同而有差異，因此學者提出將多幅獨立的干涉圖於以平均，就可以降低大氣效應的影響，這方法對大氣效應的去除有明確改善的結果 [Zebker et al., 1997]。

Williams 等(1998)提出除利用堆疊法外，並同時以 GPS 的資料進行去除大氣影響的效應，Ferrettiet 等(1999)提出以加權平均的方法同時考慮熱雜訊及大氣效應。由研究結果顯示，堆疊的方法雖可消除大氣效應，但此法並不適用於地表有非線性變化的地區。

3.7 結論

當濕度因空間及時間改變超過 20%時，可能的影響量超過 10 cm 變形量誤差及 100 m 的高程誤差[Zebker et al., 1997]。因此在潮濕地區，一定要進行大氣效應改進。

目前校正大氣效應方法仍然無法有效的解決大氣效應的影響，都是以降低影響量為主，問題的原因有二：一為目前可用來偵測大氣影響料有：氣象觀測、GPS 的觀測資料、MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)及 MERIS 的資料無法完整的涵蓋影像範圍，如 GPS 的觀測資料雖可供參考，但是只有點位的單點資料；雖然可以採用水氣幅射儀(Water Vapour Radiometer)等比較精確的測定信號傳播路徑的大氣含水

量，但由於設備昂貴，無法普遍採用。另外一個原因為現有的大氣模式不能滿足干涉的精度需要。

雖然大氣影響量會隨著時間及空間改變，目前對干涉結果的影響仍然無法完全的掌控及分析，但藉由日益精進的技術及更多適用的大氣資料，更多、更密集的 GPS 網站資料及更多的大氣資料蒐集，配合精進大氣模式的修正，使得大氣效應對干涉的影響能有效的偵測，必能精進干涉技術的結果。



第四章 雷達干涉技術處理流程

在干涉技術處理的過程中，因雷達影像為含有振幅及相位值的複數影像，且處理結果可以產生高精度的地表高程資訊及變形資料，所以每一個處理步驟都會影響結果的精度。加上每一幅雷達影像的涵蓋範圍為 $100 \times 100 \text{ km}^2$ 的大範圍，單幅影像的容量相當大，所以在處理過程中，兼顧處理速度及精度就成為重要考量。

干涉圖的產生及差分干涉處理流程包含有影像套合、產生干涉圖、平坦化及全像位回復等，詳細流程如圖 4.1。

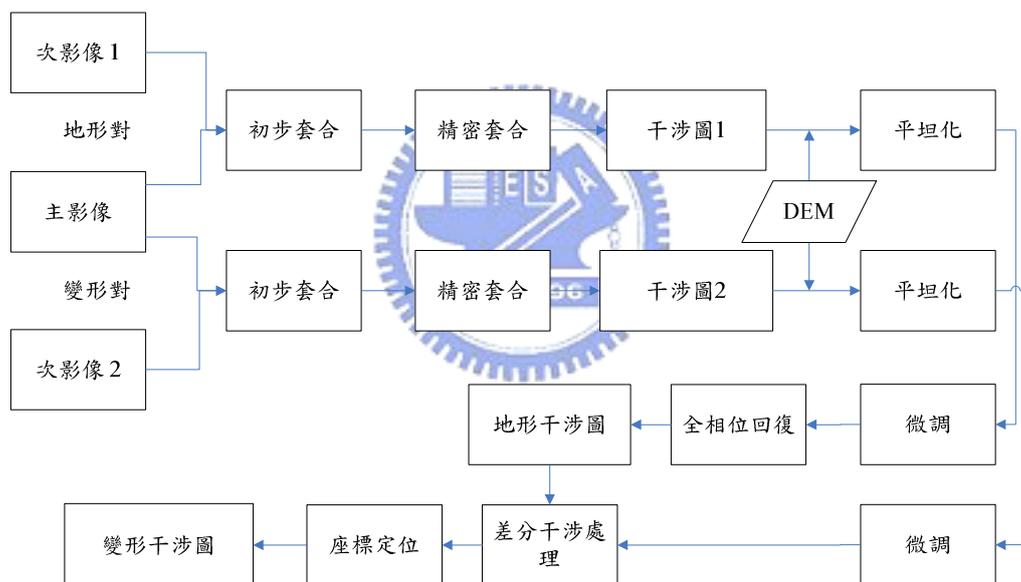


圖 4.1 差分干涉技術處理流程圖

從圖中可知，處理流程中主要程序為選擇合適的雷達影像對，並從影像對中產生地形對及變形對，每一個像對都需進行套合處理的程序，為加速處理速度，可將套合處理分為初步套合及精密套合，套合完成的像對就可以計算干涉圖。由於原始干涉圖包含有因不同距離差所產生的相位量測誤差，所以需執行平坦化的處理，再將干涉圖的軌道誤差移除，產生與地形相對應的干涉圖。

將干涉圖進行相位回復處理後，可以產生與實際高程相對應的雷達座標干涉圖，此時可以透過斜距轉換計算及座標定位產生數值地形模型，也可以將變形對去除地形效應產生變形量的干涉圖，處理過程中每一個處理步驟的原理及詳細分析如後續各節。

4.1 基線計算

SAR 影像處理器所產生的原始影像為包含斜距和方位方向的複數影像，要進行干涉處理時必須包含同一區的兩幅影像，利用不同取像位置的附加資訊來計算地表位置的相關資訊。基線是干涉成像幾何中相當重要的幾何元素，代表拍攝同一地面點時兩衛星的空間相對位置。以重複軌道的拍攝方式為例，兩衛星軌道間的幾何位置為接近於平行的兩曲線，其幾何關係如圖 4.2。

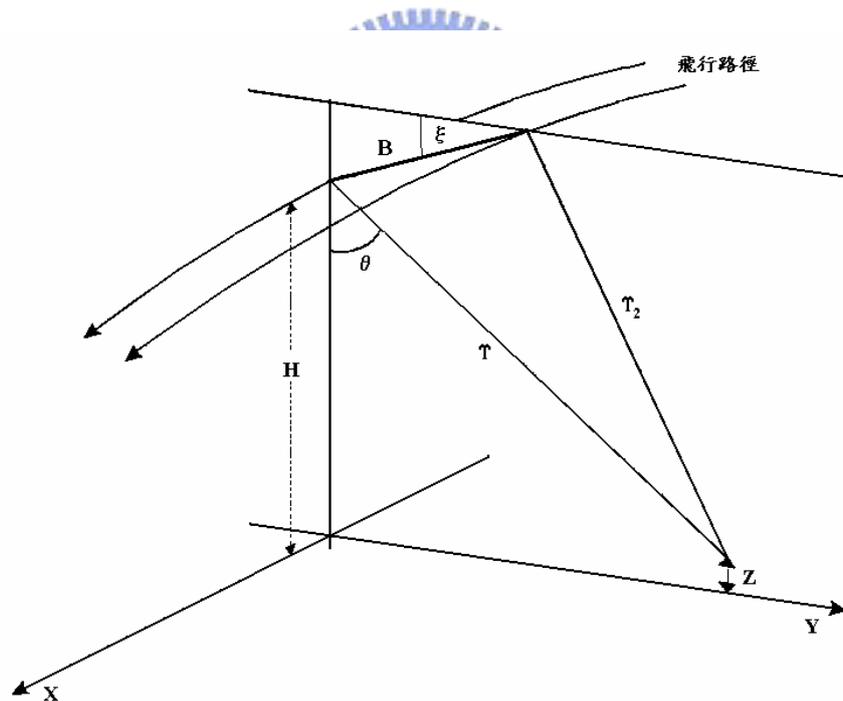


圖 4.2 重複軌道干涉模式的基線幾何關係

依 SAR 的成像原理可知，影像斜距方向與軌道方向為接近垂直之狀態，基線位置為兩軌道與同一地面點垂直之相對位置，經確定此兩點的座標後，相對應的各種基線參數幾何關係如圖 4.3 所示。

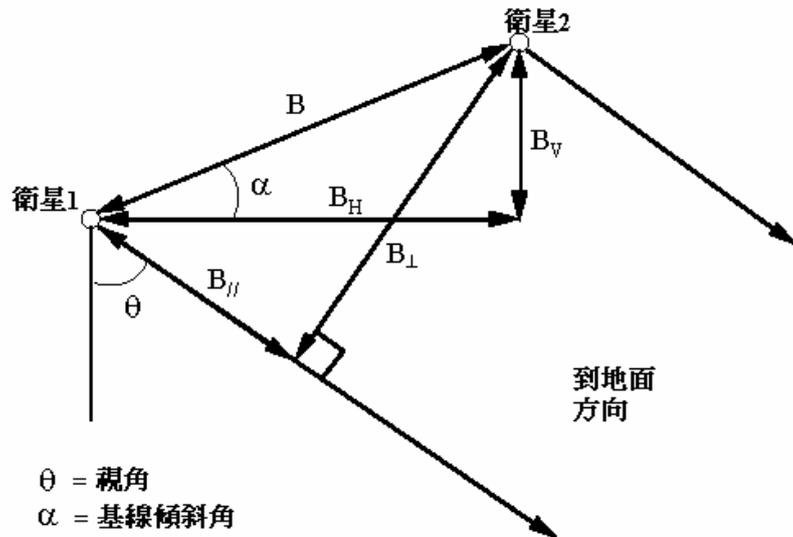


圖 4.3 基線各項參數的幾何關係

從圖中可以明確定義基線的各項相關參數，基線的長度用 B 來表示，基線與水平線的基線傾斜角為 α 。依不同的基準，基線可以用兩種不同的分量來表示，以地面參考點為基準，可將基線區分為水平分量及垂直分量，稱為水平基線(B_H)及垂直基線(B_V)表示；另一以雷達視距方向為基準，可區分為平行分量與垂直分量，為平行基線($B_{//}$)及垂直基線(B_{\perp})，各項幾何參數間的轉換關係計算式為：

$$B = \sqrt{(B_H^2 + B_V^2)} = \sqrt{(B_{\perp}^2 + B_{//}^2)} \quad (4.1)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{B_V}{B_H}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{B_{\perp}}{B_{//}}\right) + \theta - \frac{\pi}{2} \quad (4.2)$$

$$B_H = B \cdot \cos(\alpha) \quad 、 \quad B_V = B \cdot \sin(\alpha) \quad (4.3)$$

$$B_{\perp} = B \cdot \cos(\theta - \alpha) \quad 、 \quad B_{//} = B \cdot \sin(\theta - \alpha) \quad (4.4)$$

在進行干涉處理時，基線的計算方法有許多種，可以利用精密軌道資料、現有的 DEM 及量測控制點來計算，方法分述如後。

4.1.1 以精密軌道資料計算基線

1. 計算兩軌道間的最短距離

以重複軌道干涉模式為例，兩衛星軌道間的幾何關係為接近於平行的兩曲線，基線為拍攝同一地面點時兩衛星的空間位置。依 SAR 的成像原理可知，假設斜距方向與軌道方向為垂直，則基線對應的點位為兩軌道間之最短距離。

實際計算時，以主影像的軌道為主，選擇影像中心所對應的地面點為共同點，計算此影像中心的成像時間。利用該成像時間配合精密軌道可以計算出衛星成像時的瞬間位置。在次影像的成像幾何中，共軛點為次影像軌道中與主影像成像點位距離最短的位置，以此兩座標就可以計算出各種基線參數值。

2. 計算實際共軛點的距離

以主影像的中心點為主，求出影像中心點成像時的衛星位置，再以此衛星位置，影像的座標值，計算所對應的地面點座標。有此地面點座標後，再依次影像的成像幾何關係，計算相對於同一地面點在次影像軌道的確定座標。有主影像與次影像對應點位的兩座標值，就可以計算各種基線參數。

4.1.2 以 DEM 計算基線

當缺乏精密軌道資料時，可利用現有 DEM 配合相關的成像幾何參數形成模擬干涉圖，並比較真實干涉圖與模擬干涉圖間差異，以疊代的方法來逐步修正各幾何參數，當套合結果正確時，就可以獲得相關的基線值 [Seymour and Cumming, 1996]。

4.1.3 以控制點計算基線值

本方法利用影像內的控制點來計算衛星的外方位參數，計算的方法如本章 4.7 節所述，可以利用不同的計算方法來計算，進而求出相關基線值。但此法必須確認明確的點位位置，也必須具備地面的點位座標。

因為基線值為干涉技術的重要幾何參數，不同的基線值適合不同的應用處理。以 ERS 衛星影像為例，適合應用情形如表 4.1，以產生數值地面模型為例，其適合垂直基線長度為 150 m 至 300 m，地表變形偵測的應用基線長度最適合長度為 30 至 70 m，地表物體特徵移動的偵測的基線長度為 0 到 5 m [Solaas, 1994]。

表 4.1 干涉技術處理時不同應用的實用基線長度

應用目的	垂直基線(B_{\perp})
1. 數值地形模型	150 m 至 300 m
2. 表面變遷偵測	30 m 至 70 m
3. 表面特徵移動	0 m 至 5 m

4.2 影像套合

套合處理的目的在確定兩影像間的另一像元位置。一般而言套合處理包含計算兩影像間的轉換參數及重新取樣。其主要的處理步驟：1. 確定干涉像對的主影像及次影像；2. 利用統計方法尋求影像對應點位；3. 計算轉換參數；4. 將次影像轉換至主影像坐標。雷達影像因為隨機性的斑駁(Speckle)，使主影像的特徵在次影像上未必是特徵；且因為地物背向散射係數的敏感性，使地物在兩影像上可能有不同的輪廓，故無法以一般的特徵匹配方法來進行套合。

套合處理的品質影響干涉的結果相當大，以雷達干涉處理的技術而言，套合的精度必須達到次像元的精度。基於雷達影像成像的特殊性，套合處理要快速、準確，處理過程必須分為兩步驟，包括初步套合及精密套合。先由初步套合的程序辨認出同一點位在兩影像的大約位置，再利用統計的方法，在初估的位置範圍內精確的計算準確的對應位置[Hanssen, 2001]。

4.2.1 初步套合

在計算初估位置的程序中，可以利用人工選點的方式或是藉由影像的成像幾何自動計算影像的對應點位。

1. 人工選點

因雷達影像的成像不同於一般光學影像，所以利用人工選點的方式選點時，由於一般的地形地物較難分辨，通常會選擇影像中的亮點或是人工建物的特徵點，亦可選取道路的交叉點或是建物的直角轉彎點。利用這些較易辨識的點位，來計算兩影像間初步套合的轉換模式。

2. 自動產生控制點

兩影像間的初始轉換參數，則以精密軌道的資料，配合都普勒方程式等公式建立兩影像間的轉換關係，計算步驟為：

- (1)計算主影像影像中心的成像時間，並利用該時間推求精密軌道的空間位置。
- (2)以該軌道位置及主影像的成像幾何，計算主影像成像像點的地面座標。
- (3)以此地面點座標配合次影像的成像幾何，計算次影像像元的空間位置。
- (4)依空間位置計算與地面座標距離值，再以光速公式計算斜距像元時間；另以次影像的精密軌道資料，求出其對應成像的方位像元時間。
- (5)利用方位像元時間和斜距像元時間計算出對應像元方位值及斜距值。
- (6)利用主影像與次影像對應的像元值，即可計算影像的初始轉換模式。

計算的過程中，需瞭解影像座標與成像時間的關係，才能由成像時間配合精密軌道資料計算其相對應的空間座標值。衛載 SAR 影像為線列式掃描影像，在建立獲取影像像元時間的關係式時，可分為方位(影像行值)與斜距(影像列值)兩個方向進行討論。

在雷達影像的檔頭中可以得知波束重複頻率(Pulse Repetition Frequency, PRF)值，其定義為

$$PRF = \frac{N_l - 1}{dt_a} \quad (4.5)$$

其中

N_l ：影像方位總行數。

dt_a ：全幅獲取影像的時間。

由此可以推求得獲取第 l 行的方位時間為：

$$t_{al} = t_{a1} + \frac{l-1}{PRF} \quad (4.6)$$

其中，

t_{a1} ：獲取第一行影像的時間，

t_{al} ：獲取第 l 行影像的時間，

l ：所量取影像的方位行數。

當已知第一行的時間後，配合計算的方位時間，即可計算所對應的影像方位行數：

$$l = 1 + PRF \cdot (t_{al} - t_{a1}) \quad (4.7)$$

藉由成像的雷達訊號特性可以得知 PRF 值，從影像的檔頭資料中可以得知獲取第一行影像的時間，故透過(4.6)式可以由影像像元數計算得相對行數的成像時間。相同的，當已知成像空間座標值時，可以透過精密軌道資料計算對應的時間，再由此時間利用(4.7)式計算對應的像元方位值。

雷達波的另一參數斜距取樣頻率(Range sampling rate, RSR)定義為

$$RSR = 0.001 \times \frac{N_p - 1}{dt_r} \quad (4.8)$$

其中：

N_p ：影像斜距像元數

dt_r ：最後像元減第一像元的兩倍時間(ms)

故同一行間獲取斜距影像像元 p 與時間的關係為：

$$t_{r_l} = t_{r_1} + \frac{p-1}{2 \times RSR} \quad (4.9)$$

其中，

RSR：斜距取樣頻率(Range Sampling Rate)。

t_{r_1} ：獲取第一個像元的時間。

t_{r_l} ：獲取第 l 個像元的時間。

P ：量取像元與第一個像元的像元間距。

故只要確定獲取第一個斜距像元的時間，再配合斜距的時間差，即可計算對應的斜距像元數

$$p = 1 + RSR \cdot 2(t_{r_l} - t_{r_1}) \quad (4.10)$$

式中斜距值與斜距時間可以透過光速公式求得

$$R = t_r \times c \quad (4.11)$$



上列各式中，斜距取樣頻率可以由雷達訊號特性得知，獲取第一個像元的時間可以從影像的檔頭資料中得知，透過(4.9)式可以由影像像元數計算得相對的成像時間。在反向計算時，透過(4.11)式可以得知像元的斜距成像時間，再由(4.10)式計算對應的影像斜距像元值。

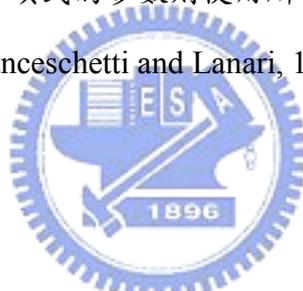
計算步驟中，由空間座標值計算地面座標及由地面座標值計算空間座標的方法，詳述於本章 4.7 節中。理論上來說，以精密軌道的資料來計算對應的影像位置其精度可在 2 個像元以內，此精度已滿足初步套合的需求[Small et al., 1993]。

4.2.2 精密套合

在雷達影像精密套合的方法中，計算主影像與次影像位移量的方法有許多種，其中有以影像相關性來計算位移量者[Prati and Rocca, 1990; Carrasco et al., 1995]，該法利用整

幅複數影像，以計算複數交叉相關(Complex Cross Correlation)的方法來進行套合處理。若影像中某些地區成像時其相位值的品質較差，就會導致套合處理失敗，因此目前較常用的方法為利用振幅影像計算交叉相關值的方法。此方法以相關係數值的波峰來決定影像對應像元的位移量，且此法可以在單一觀點雷達影像上達到 1/20 像元的精度。

為滿足選取的控制點能涵蓋全幅影像，所以依需求數量先將兩影像中重疊區域區分為若干個網格點。為避免所選擇的區域為均調區或是海洋等無法匹配的區域，可以將這些地區予以遮蓋，以免產生套合的誤差。再將每個網格點所選取鄰近的像元成為一區塊(Patch)，而後以兩區塊的灰階亮度(Power)計算 FFT 轉換後的最大相關值來計算區塊位移量，藉以決定該中心點位像元為控制點的轉換函數，如果控制點的量測精度不好，就以誤差偵錯去除之。待全幅影像所有控制點點位之轉換函數都求出後，再以多項式來定義兩影像間的轉換關係，此多項式的參數則使用所有控制點以回歸方法求得，最後將次影像重新取樣至主影像上[Franceschetti and Lanari, 1999]。



4.3 產生干涉圖

要計算影像中每一個像元的相位差值以形成干涉條紋圖，計算方法為將為兩幅複數影像的共軛像點相乘而得。處理方法須先將次影像經套合處理及重新取樣後，明確的定義出共軛點，再將主影像像元的複數值乘以次影像對應像元的共軛複數值。複數影像相乘的公式可以表示為

$$I=M \cdot S^* \quad (4.12)$$

其中，'*'為共軛複數

為降低干涉圖中的雜訊，Goldstein 等(1988)提出多觀點(Multilook)處理的方法，處理過程為在複數影像中指定一固定大小的視窗，將視窗內的像元以迴旋(Convolution)方法計算平均值，再將所得到新的平均像元值替代原始影像，經過此種多觀點處理後，干涉圖內就可以有效降低雜訊。

經影像相乘計算後可得到相位的干涉圖，然而，因雷達影像成像時其方位方向與斜距方向的解析度不同，因此影像呈現方式不是人眼習慣的判讀方式。為便於習慣性的表示方法，會將影像的方位方向以多觀點處理，使得產生影像的結果其斜距方向與方位方向的比例接近 1:1。以 ERS 衛星為例，其斜距方向與方位方向的解析度比例為 1:5，所以最常用的多觀點處理比例為 1:5 或 2:10。

4.4 平坦化處理

初步產生干涉圖時，因地面點位與感測器間距離的不同會引起不同的距離差值，故干涉圖的資訊中仍含有此距離差所產生的相位差值。因此，在干涉的處理過程中，必須將此類距離差值予以去除，才能正確的反應地面高程對應的相位值，此處理程序稱為平坦化處理。

平坦化處理的原理如圖 4.4 所示，地面點 P 至天線 A_1 的距離會隨著與第一個像元的距離增加而增加，從圖中可以看出 $r_2 > r_1$ 值，此項因點位位置不同引起的距離差值亦會反應在量測的相位值中，因此要計算單純因地形高度引起的相位差就必須將此項影響量去除。

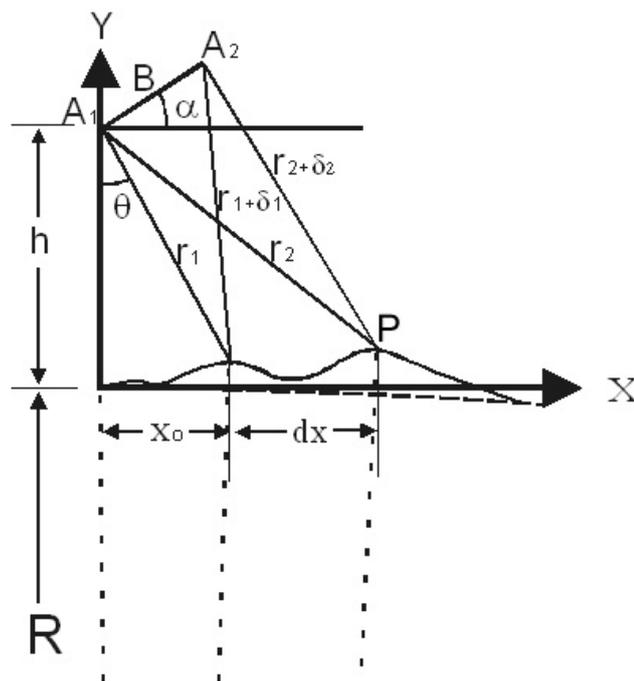


圖 4.4 相位平坦化之幾何關係

4.4.1 以橢球模式計算

雷達影像在獲取地面資料時會受點位高程值及點位與雷達的地面距離所影響，其中第一個點位高程值引起的距離差為 $B_{//} = B \sin(\theta_0 - \alpha)$ ，隨著距離的增加，距離差值則變為 $B_{//} = B \sin(\theta - \alpha)$ ，因此要計算增加的值就可以直接將兩者相減，再配合距離差與相位值的關係即可得[Madsen and Zebker, 1998]：

$$\phi_{flat} = -\frac{4\pi}{\lambda} B[\sin(\theta - \alpha) - \sin(\theta_0 - \alpha)] \quad (4.13)$$

其中， θ_0 為第一個地面點實際成像時的視角。平坦化處理的方式可以將成像區域視為全平坦地區直接計算，且因雷達影像涵蓋成像範圍達 100 km，地球橢球效應會影響斜距的計算結果。故為精確計算距離差，應加入橢球的模式來計算，計算的結果為相對於橢球參考面的高程值。

4.4.2 以 DEM 進行平坦化計算

平坦化的另一計算方法為利用現有的 DEM 資料，考量實際地形與感測器間的距離差，再將該影響量予以移除。利用 DEM 進行平坦化處理流程如圖 4.5。

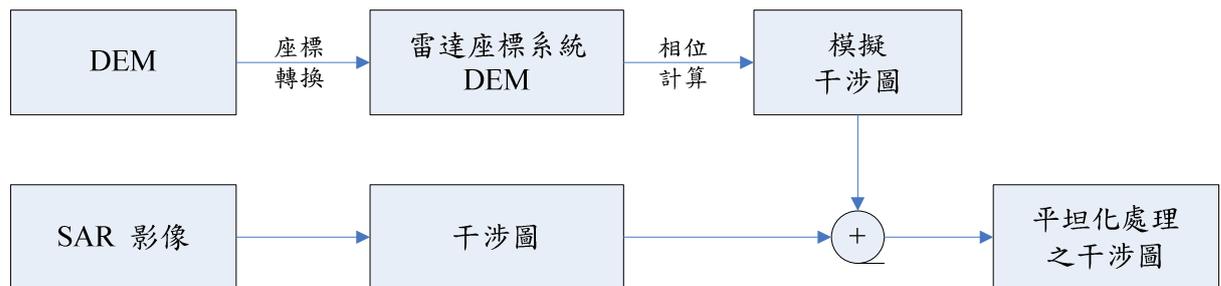


圖 4.5 以 DEM 進行平坦化處理流程圖

從圖 4.5 中可知，首先需將 DEM 的座標系統轉換至雷達座標系統，其轉換方式在 4.7 節中有明確敘述。座標轉換後的 DEM 資料先以 DEM 高程資料進行距離差計算，以獲得模擬干涉圖，並且利用陰影暈渲等方法模擬雷達振幅影像，再與原雷達影像進行套合處理，將模擬干涉圖套合至原始影像上，最後再於原始影像的相位值中去除模擬干涉圖的相位值，即完成平坦化的處理。

4.5 全相位回復

經平坦化處理後之相位圖，已經消除了因距離差及地球橢圓所引起的相位差值，但因干涉圖的相位值為經過模組化(Module)的處理，所以相位值只對應於 $2\pi(-\pi \sim \pi)$ 之內。因此要計算點位的實際相位值，就必須加入每一相位量測中相位載波的整數波數值。用來解決實際要加回多少波數(2π)問題之技術，稱為全相位回復(Phase Unwrapping)。

我們定義干涉圖中觀測的相位值 ϕ^0 為真實相位 ϕ 的函數值

$$\phi^0 = M \{ \phi \} = \text{mod} \{ \phi + \pi, 2\pi \} - \pi \quad (4.14)$$

其中

$$\phi = -4\pi \Delta R / \lambda + \phi_N = 2\pi k + \phi_N \quad (4.15)$$

函數內 M 是模組化的運作， $\Delta R = R_1 - R_2$ 是地面點距離兩雷達位置的距離差， $\phi_N \in [-\pi, \pi]$ 代表相位雜訊， k 為整數的波數值[Bamler and Hartl, 1998]。

由上式的公式中可以看出，沒有其他資訊的輔助不可能準確的解算出 k 值，因此通常對於兩個相鄰像元間的相位值會假設其相位梯度(Phase Gradient)值介於 $[-\pi, \pi]$ 間，否則便無法解算 k 值。因此，當觀測的相位梯度值大於 $+\pi$ ，則將循環週期數減 1，當相位梯度值小於 $-\pi$ ，則將週期數加 1。

在全相位回復的處理中，不連續點為可能引起計算錯誤的點位，因此須先偵測不連續點的位置，避免引起回復時產生誤差累積。不連續點的偵測，可藉由四點環繞檢查的方法來判斷，通常以計算相位圖中逆時針的最小封閉路徑之 $r(i, j)$ 值，如圖 4.6 所示 [Ghiglia and Pritt, 1998]。

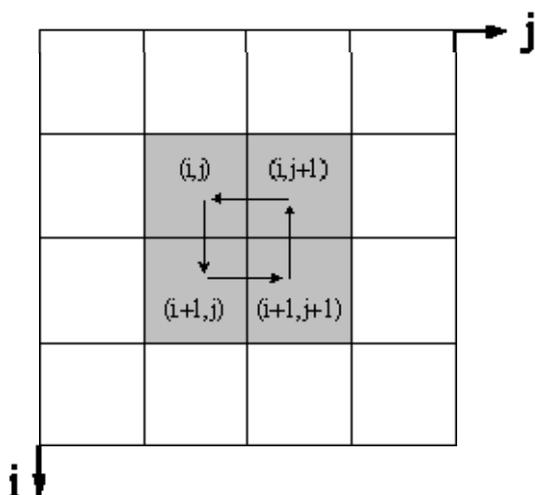


圖 4.6 四點環繞檢測示意圖

檢測法為計算相鄰兩點之相位差逆時針最小封閉路徑之和：

$$r(i, j) = \text{Round}\left[\frac{\phi(i+1, j) - \phi(i, j)}{2\pi}\right] + \text{Round}\left[\frac{\phi(i+1, j+1) - \phi(i+1, j)}{2\pi}\right] + \text{Round}\left[\frac{\phi(i, j+1) - \phi(i+1, j+1)}{2\pi}\right] + \text{Round}\left[\frac{\phi(i, j) - \phi(i, j+1)}{2\pi}\right] \quad (4.16)$$

式中 Round[] 為四捨五入法取最接近之整數。

如果 $r(i, j) = 0$ ，則表示該範圍內無畸點(Residue)，+1 表示為正畸點，-1 表示為負畸點[Goldstein et al., 1988]。當在觀測相位中出現畸點，即表示該處為雜訊或是在平滑條件(Smoothness Condition)下出現不一致的現象，將導致在回復的處理時產生全區相位的誤差。

在相位模組化的處理當中，直接將整數值去除，其處理的結果是明確、直接且是唯一的，所以處理的過程沒有任問題。但是要回復至原始相位值，就會因影像(訊號)的品質而影響回復的結果。在二維影像中，可以利用周遭像元的相位資訊來判斷是否要加入整數值，例如有條紋資訊干涉圖時，每一條紋數就代表增加一個整數值，這時需要在相位圖上將波數辨認出來，這與干涉條紋的品質有關，如果有雜訊、斑駁及地物變遷等破壞干涉的情形存在，則會有部份區域無法計算。

雜訊的發生可能是幾何的問題，如前坡縮短(Foreshortening)及疊置(Layover)，通常雜訊的來源有三種(1)熱雜訊(Thermal Noise)，(2)斑駁，此為一隨機變數，(3)因天線所引起的雜訊[Ghiglia and Pritt, 1998]。

由於全相位回復是雷達干涉處理中相當關鍵的一環，首先 Goldstein 等(1988)假設在原始範圍內有足夠的取樣點，相位就能夠較一致的被回復，如能夠確知計算錯誤區，將該區予以適當的隔離，就可以防止任何尋找路徑通過這些設定區域。在 1988 年後，陸續有各種解決方法提出，較為常用的方法如下：

4.5.1 畸點隔離法

畸點隔離法(Residue-Cut Method)即樹枝阻隔法(Branch-Cut Method) 或稱為樹木演算法(Tree Algorithm)，此法將整幅影像的畸點先予以確認，並利用演算法將之阻隔，以避免計算整數相位時，將該點的資料值加入，如此可以免除因該點引起的錯誤[Goldstein et al., 1988]。

計算畸點的方法是採用一個 3×3 的視窗，計算其正向的整數值與反向的整數值，當兩者累計的值正負不同時，就將該點視為畸點，並將該點標註加以阻隔。反之，當計算的結果其正負符號一致時，就將該點視為正常點，繼續往下一個點位計算，最後會將點位串聯起來，其圖形類似樹枝形狀，所以又稱為樹木演算法。

本法可以透過阻絕的方法來避免雜訊點或誤差點引起的錯誤，但是因計算的回復值都是用鄰近的點位來決定是否增加整數的相位值，在實際的應用例中，有些區域如水面、重疊區及沒有干涉效應的區域都無法判斷其相位值，所以有區域無法進行相位回復的處理。

4.5.2 最小自乘法

最小自乘法利用回復後的相位梯度值與估計的相位梯度值間誤差的平方合最小的方法，來決定每一個像元相位值是否要加入整數值。為求整幅影像計算的速度，所以可以將影像轉換至 FFT 頻率域計算以加速計算的效率[Ghiglia and Romero, 1994]。

4.5.3 價值統計及網路流程演算法

最小價值流(Minimal Cost Flow, MCF)的方法整合畸點隔離法及最小自乘法的觀念，先以軌道的參數計算各點位的大約位置，再配合點位的相關性，以相關性高的點逐步推求至週圍的點位，此種以價值函數(Cost Function)來決定處理路徑的方法，可以將錯誤點的影響降至最低；然後，並以最小自乘法求解點位相位值最佳解，計算各點的真實相位。在實際處理時，可將處理模式區分為地形模式及變形模式，並可自動計算完成整幅影像的相位值 [Chen and Zebker, 2000]。

4.6 相位至高程轉換

經過全相位回復處理後的干涉圖已經解決 2π 的問題，可以完整的呈現相位值，但其對應的值並非實際的地面高程或變形量，仍需配合成像的幾何關係，才可將該目標點位的相位值回推至實際的地面高程值或變動量。

從干涉圖的相位資訊計算地面高程的方法，可以利用(2.17)式以相位差值配合成像的幾何參數來計算點位的高程值，計算式中各項幾何參數值需相當精確。Small 等(1993)提出要獲得精確的基線值及影像幾何關係，需有足夠數量的地面參考點，才可以準確的決定基線空間位置及旋轉的角度，但其難度在於確定有足夠數量的地面控制點。另外，不同的地面點位有不同的高程值，因位置及高程的差異就會引起不同的垂直基線及視角，所以在計算時要逐一的以遞回方式求出高程值，此一計算結果仍維持在雷達座標系統下。

在轉換計算的程序中，因衛星的座標是協議的地球座標系統(Conventional Terrestrial System, CTS)，是一個地心地固的慣性座標系統，以地球質量中心為原點，為右旋的直角座標系統。此座標系統將地心指向地球赤道與格林威治子午圈（零子午圈）交點的方向定為 X 軸，從地心指向慣性北極(Conventional Terrestrial Pole, CTP)方向定為 Z 軸，與 Z、X 軸垂直，並與 Z、X 軸成右旋直角的方向為 Y 軸 [Seeber, 1993]。

地面點位的座標值通常是以大地水準面為基礎的地區直角座標，或是以緯度、經度及橢球高來表示的地理座標系統(Geographic System)。因此在計算高程轉換時，會有高程值位於不同參考面的問題，不同參考面狀況如圖 4.7 所示。

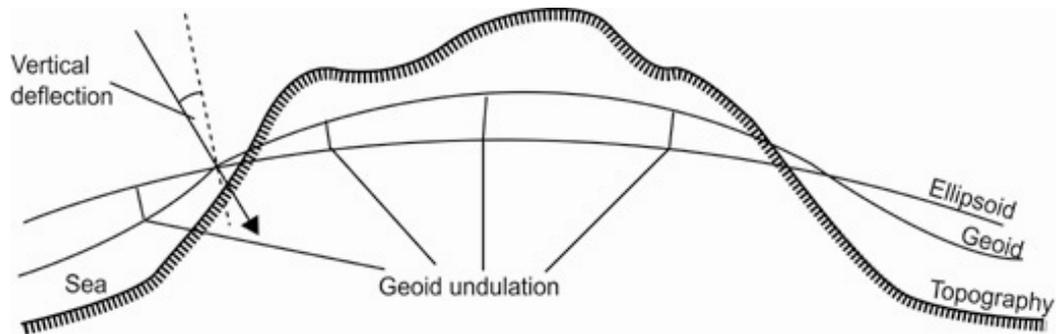


圖 4.7 地形面、橢球面及大地水準面的示意圖

地形(Topography)代表地球的實際地面，大地水準面(Geoid)表示經由多年的平均海面計算而得，因水位高低受重力的影響，因此大地水準面也可表示地區的重力值；橢球則是一個數學面，以趨近地球的實際大小簡化而得的數學模式。其中大地水準面與參考橢球體間的垂直距離稱為大地起伏(Geoid Undulation)，在全球化的處理時，最大的差距可以達到 100 m[Seeber, 1993]。

當以衛星的成像幾何來計算地面資訊時，其計算的模式是架構在 CTS 的座標系統中，計算的高程值為相對於參考橢球的高程值，如果要與一般的地面高程值來比較，則需將兩者轉換至同一座標系統。經過本程序的計算後，可以計算相對於參考橢球的高程值，且影像的座標系統仍為斜距-方位方向的雷達座標系統。

4.7 座標定位

雷達座標系統與地區座標系統有很大差異，雷達影像的座標系統是方位方向和斜距方向座標，地區座標系統則為東西向座標，所以必須將座標做適當的轉換，才能獲得正確的地面座標值，座標轉換的關係如圖 4.8 所示。座標轉換的方法可以區分為都普勒斜距法及影像幾何轉換法。

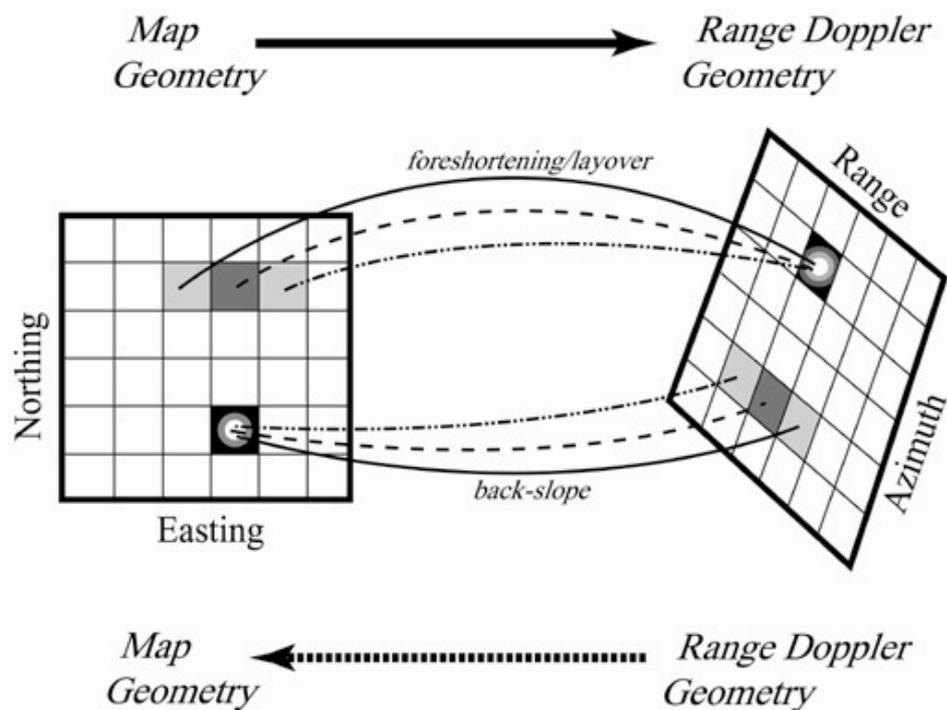


圖 4.8 地圖座標與雷達座標的幾何轉換關係圖[修改自 Small et al., 1995]



4.7.1 都普勒斜距法

因為雷達成像的原理為距離投影模式，且利用都普勒方程式來提昇影像的解析度，因此利用感測器成像位置及飛行速度，透過距離方程式、都普勒方程式及地球橢球模式等三個公式，可以從載具的空間座標定位地面點座標 [Curlander and McDonough, 1991]。

感測器成像的幾何關係如圖 4.9 所示，從圖中可以看出以載具為中心的都普勒中心方程式其球面與地球橢球面相交於一橢圓形面，而此相交的橢圓面與斜距的向量相交於明確的點位值。因雷達成像為單一側視方向，所以不會有左右分不清楚的結果。

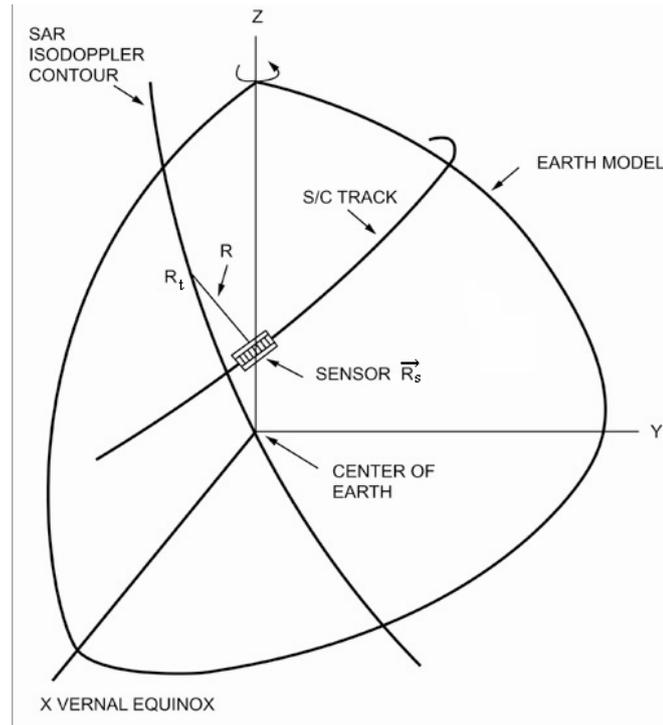


圖 4.9 雷達衛星成像的地心座標系統示意圖[修改自 Curlander and McDonough, 1991]

所採用的距離方程式如(4.17)所示

$$R = |S_a - P_e| \quad (4.17)$$

其中

S_a : 感測器的位置向量

P_e : 地面點位的位置向量

式中斜距 R 可以透過光速及雷達訊號的延遲時間計算

$$R = c\tau/2 \quad (4.18)$$

式中

τ : 斜距延遲時間

都普勒方程式如式(4.19) :

$$f_{DC} = \frac{2(V_s - V_p) \cdot (S_a - P_e)}{\lambda |S_a - P_e|} \quad (4.19)$$

其中：

f_{DC} = 都普勒中心頻率 λ : 雷達波長

V_s : 感測器的速度向量 V_p : 地面點的速度向量

其中當偏斜角(Squint Angle)為 0 時，即為零都普勒影像，也就是感測器的速度方向與感測器的拍攝距離成垂直方向。

第三個方程式為地球模式方程式，以橢球模式來表示如

$$\frac{x_p^2 + y_p^2}{(R_e + z)^2} + \frac{z_p^2}{R_p^2} = 1 \quad (4.20)$$

其中

R_e : 位於赤道的地球半徑

z : 地面點位相對於橢球的高程

R_p : 位於極的地球半徑

x_p, y_p, z_p : 點位座標

$$R_p = (1 - f_e)(R_e + h) \quad (4.21)$$

其中 f_e 為橢球的扁率。

衛載 SAR 影像為線列式掃描影像，故其外方位參數會隨時間而變化，不同掃描線有其相對應的外方位參數，為了描述隨時間而變化的雷達天線位置，可使用時間多項式模式當作動態參數模式。因為衛星為具有穩定飛行之特性，且其軌道模式近乎橢圓形狀，故採用時間二次式多項式來描述飛行軌跡，位置參數表示為：

$$S = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + x_1 t + x_2 t^2 \\ y_0 + y_1 t + y_2 t^2 \\ z_0 + z_1 t + z_2 t^2 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

而速度參數為位置參數的一階導數，可表示為：

$$V=\dot{S}=\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} x_1+2x_2t \\ y_1+2y_2t \\ z_1+2z_2t \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

由於平差求解模式為非線性，故需先將其線性化，再以最小二乘疊代方式進行求解。在進行疊代求解前，各項參數之初始值可由檔頭資料中獲得。

4.7.2 影像幾何轉換法

以幾何模式建立衛星影像像元與地面數值地形模型座標間的轉換關係，可以將衛星影像的成像幾何關係區分成三部份探討，分別為 1.軌道傾斜角，2.像元解析度，3.計算斜距值，經此三步驟的考量後，可以推算得影像像元座標與地面座標的關係。



1. 軌道傾斜角

首先衛星在飛行時，軌道與正北間有一傾斜角 φ ，因此計算衛星的成像關係，須考量傾斜角的旋轉影響，故需將影像座標 (L,P) 進行座標轉換計算

$$\begin{bmatrix} L' \\ P' \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L \\ P \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

2. 像元解析度

雷達影像的取樣原理依成像方向分別為像元方位解析度及斜距解析度，雷達影像像元的大小是由雷達的方位及斜距取樣頻率決定，在方位方向的像元大小為 $\frac{v}{PRF}$ ，在斜距方向的像元小為 $\frac{c}{2f_s}$ 。其中 v 為衛星速度，為 f_s 雷達斜距方向取樣頻率。

當衛星的航高為 H ，像元的對應的解析度為

$$R_a = \frac{v}{PRF} \cdot \frac{R_e}{R_e + H} \quad (4.25)$$

$$R_r = \frac{c}{2f_s} \quad (4.26)$$

其中 R_e 為地球半徑。

3. 計算斜距值

本節在探討利用影像成像的參數如斜距、傾斜角、視角等參數值來計算雷達影像成像時，產生地面點對應像元位置。前提假設傾斜角為 α ，地表為橢球，雷達影像的在方位剖面的成像幾何如圖 4.10。圖中假設斜距剖面第 i 點的對應地面點 i ，其相對應的各項參數值傾斜角為 α_i ，視角為 θ_i ，斜距為 R_i 。

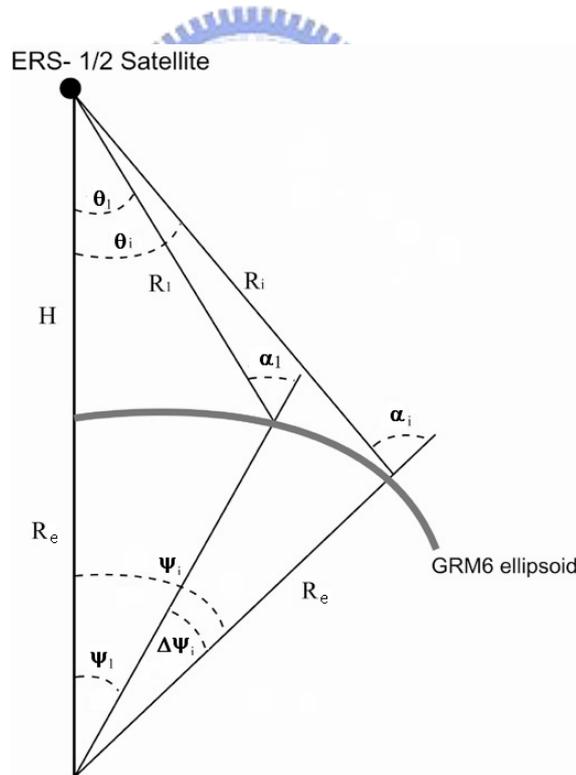


圖 4.10 雷達影像幾何示意圖

從圖 4.10 中的幾何關係可知，第 i 個像元至雷達的斜距 R_i 可以表示為：

$$R_i = [R_e^2 + (R_e + H)^2 - 2 \times R_e \times (R_e + H) \cos \psi_i]^{1/2} \quad (4.27)$$

第 i 個像元的傾角 α_i 可以表示為：

$$\cos \alpha_i = [(R_e + H)^2 - R_i^2 - R_e^2] / (2 \times R_i \times R_e) \quad (4.28)$$

其視角 θ_i 為：

$$\cos \theta_i = (R_i + R_T \times \cos \alpha_i) / (R_e + H) \quad (4.29)$$

要計算上列三式的值，必須先求出其中相關參數值為：地球半徑 R_e 、衛星航高 H 、 i 點的地心夾角 ψ_i 。

其中地球橢球半徑值 R_e 可以用下式來計算

$$R_e = a [\cos^2 \Delta + (b/a)^4 \times \sin^2 \Delta]^{1/2} \times [\cos^2 \Delta + (b/a)^2 \times \sin^2 \Delta]^{-1/2} \quad (4.30)$$

式中：

a ：地球長半徑。

b ：地球短半徑。

Δ ：點位緯度。

ERS 衛星採用的參考橢球為 Goddard Earth Model 6(GEM6)，定義長半徑為 6378.144 km，短半徑為 6356.759 km，扁率為 1/298.257。

從圖 4.10 中可以得知從地心至 ERS 衛星的高度 H ，其距離值為

$$R_e + H = [R_T^2 + R_1^2 + 2 \times R_e \times R_1 \times \cos \alpha_1]^{1/2} \quad (4.31)$$

式中：

R_1 ：第一個斜距像元至衛星的斜距。

R_1 值可以從下式中計算

$$R_1 = c \times t_1 / 2 \quad (4.32)$$

其中

t_1 ：第一個斜距像元的時間。

其中第一個斜距像元的時間(t_1)、近距點的傾斜角(α_1)及從影像中心的緯度值(Δ)等，從 CEOS 標準的檔頭可知其相對值。

最後一個參數值第 i 點地面點的地心夾角可以用下式計算：

$$\psi_i = \psi_1 + \Delta\psi_i \quad (4.33)$$

其中 $\Delta\psi_i$ 可從下式中計算得知，

$$\sin(\Delta\psi_i) = (i-1) \times \Delta n / R_e \quad (4.34)$$

其中：

Δn ：地距的像元間距。

但因為 $\Delta\psi_i$ 非常小(在 100 km 寬的雷達影像中，地心夾角約為 0.9 度)，所以上式可以寫成

$$\Delta\psi_i = (i-1) \times \Delta n / R_e \quad (4.35)$$

因此 ψ_i 可以表示為

$$\psi_i = \psi_1 + (i-1) \times \Delta n / R_e \quad (4.36)$$

因為 $\pi = \psi_1 + \theta_1 + (\pi - \alpha_1)$ ，故近距點與衛星間的地心夾角 ψ_1 值為

$$\psi_1 = \alpha_1 - \theta_1 \quad (4.37)$$

式中 α_1 可從檔頭中得知， θ_1 則可以透過下式求得

$$\cos \theta_1 = (R_1 + R_T \times \cos \alpha_1) / (R_e + H) \quad (4.38)$$

由以上公式推導可以計算地面 i 點對應的 R_i 值。

4. 計算對應值

首先考量方位方向的對應值，假設雷達方位方向的解析度為 R_a ，則地面點對應雷達影像方位方向的像元值為 I_a ，其對應的關係為方位的解析度與地面的距離比值，關係式可以表示為

$$I_a = \frac{L' \times \Delta n}{R_a} \quad (4.39)$$

式中 L' 為經過軌道傾角轉換計算後的影像方位座標值。

在斜距方向的對應關係由圖 4.10 中可知，第 1 個像元對應的斜距為 R_1 ，第 i 個像元對應的斜距為 R_i ，因此可計算第 i 個像元對應的斜距影像像元 I_{ri} 為

$$I_{ri} = \frac{R_i - R_1}{R_r} + 1 \quad (4.40)$$

將(4.24)式直接代入上二式，可以求得 DEM 的座標(L,P)與衛星影像座標(I_a, I_r)關係

$$I_a = \frac{(P \sin \phi + L \cos \phi) \times \Delta n}{R_a} \quad (4.41)$$

$$I_r = \frac{\sqrt{(R_e + H)^2 + (R_e + z)^2 - 2(R_e + H)(R_e + z) \times \cos \psi} - R_1}{R_r} \quad (4.42)$$

$$\text{其中，} \psi = \frac{y_0 + (P \sin \phi - L \cos \phi) \times \Delta n}{R_e}$$

式中：

(L,P)：DEM 的像元座標

ϕ ：雷達軌道方向的角度

R_a ：雷達方位方向的解析度

R_r ：雷達斜距方向的解析度

I_a ：計算的雷達影像方位像元值

I_r ：計算的雷達影像斜距像元值

利用幾何關係法計算座標間轉換，必須先確定軌道旋轉角度、近距點與軌道間的距離及近距點的斜距、衛星高及飛行速度等相關資料，這些軌道幾何的資料可以從精密軌道資料中計算相關參數值。

4.8 計算三維變形量

因干涉變形量為實際變形量在雷達視距方向的投影量，不適合用於現況分析，在許多模式的分析及地層下陷的比較中較需要垂直的變形量，因此推算實際的垂直變形量，利於變形分析及模式的推估。

由於雷達干涉偵測的變形量僅在雷達視距方向，無法計算至實際的三維變動量，因此有學者利用上升及下降影像干涉對，配合以振幅影像量測的平面變形量，根據多個影像成像角度來計算三維的變形量。由此推算的變形量雖能反映地表的三維變動結果，但在平面南北方向的量測精度較差。

鑑於許多地區無法同時擁有足夠條件的上升或下降影像干涉對，所以我們提出以 GPS 水平方向精度較高的特性當成約制條件來推算垂直變動量的方法，以利進行後續分析研究。

4.8.1 多角度影像法

在過去的研究中，干涉技術偵測地表達到高解析度公分級變形的強大能力被廣泛的應用，但可惜所偵測到的變形方向受限為雷達視距方向。若有三個或更多從不同視角產生的地表位移觀測量，就可以重建三維的地表變形模型。當以雷達影像形成干涉圖時，影像須經過套合的處理，但是此處理程序中計算的是影像檔頭及影像尾的平均位移量；同樣的道理，此種套合的處理也可以處理影像中局部的子影像(Subimage)，由此就可以估計每一對應子影像相對位移量[Michel et al., 1999]。

Fialko 等(2001)利用地表變動前後的 ERS 雷達振幅影像，以影像匹配的方法計算地表在雷達方位方向移動的量，當作地表的一維平面變形量，再配合上升軌道影像對變形干涉圖及下降軌道影像對的變形干涉圖，以此三種不同角度的變形量來回推地表三維的變形量。此種以上升軌道及下降軌道兩種不同成像角度組成的結合，其相位值對垂直方向及東西方向較敏感，而利用振幅影像計算的方位位移量，則對南北方向較敏感。

因為此種方法有三條件式，可以直接求解出地面點位的三維變形量。以雷達成像的幾何條件，可計算每一點位由方位方向的變形量投影至雷達視距方向的變形量，將干涉圖中量測的變形量減去該方位方向的投影量後，剩下的變形量為垂直方向及斜距方向兩個分量的變形量，此兩個方向的夾角為點位視角的互補角，所以只要計算每個點位成像的視角，就可以計算出垂直變形量及斜距方向的變形量。該研究結果與 GPS 的變形量

比較，所得的結果在東西、南北、上下三個方向的精度分別為 4.9 cm、20.5 cm、5.9 cm，在南北方向有較大的誤差。

上述方法只有三個觀測量，精度無法滿足需求，於是 Wright 等(2004)提出增加方位方向的變形觀測量，利用四個不同的雷達影像對，以最小自乘法平方的方式來計算每一個點位的三維變形量。因為有三個方向四種不同觀測量，可以利用最小自乘法平方的方法，逐點計算點位的三維位移量，提高結果的精度。此方法的觀測量分別為：1. 點位的三維變形量投影至上升對雷達視距方向的變形量，此觀測量可以從上升對變形干涉圖中量測。2. 點位的三維變形量投影至下降對雷達視距方向的變形量，此觀測量同樣可以從下降對的變形干涉圖中量測得到。3. 利用上升對的振幅影像以影像匹配的方法計算點位在方位方向的位移量。4. 利用下降對的振幅影像計算點位在方位方向的位移量。

首先定義點位在三維直角座標中(東西、南北、上下)從地面點位至雷達方向的向量為 $\hat{p}=(p_x, p_y, p_z)$ ，此向量值可以從雷達的成像幾何中計算；從四種不同資料(上升及下降影像的變形干涉圖及振幅影像)量測的點位變形量為 d ； $u=(u_x, u_y, u_z)^T$ 為地面點位直角座標的三維變形量[Funning et al., 2005]。

根據投影公式，將地面點位變形量投影至雷達視距方向可表示為：

$$d = \hat{p} \cdot u \quad (4.43)$$

因為每一個像元有四個位移的觀測量，其中由上升及下降對干涉圖所量得的變形量有二個，從振幅影像計算得到的位移變形量也有二個，所以共產生四個觀測量。將此四個觀測量整合為矩陣 $D=(d_1, d_2, d_3, d_4)$ ，可得：

$$D = Pu \quad (4.44)$$

其中

$$P = \begin{bmatrix} \hat{p}_1 \\ \hat{p}_2 \\ \hat{p}_3 \\ \hat{p}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{p}_{1x} & \hat{p}_{1y} & \hat{p}_{1z} \\ \hat{p}_{2x} & \hat{p}_{2y} & \hat{p}_{2z} \\ \hat{p}_{3x} & \hat{p}_{3y} & \hat{p}_{3z} \\ \hat{p}_{4x} & \hat{p}_{4y} & \hat{p}_{4z} \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

由最小自乘法可得：

$$\bar{u} = (P^T \Sigma_D^{-1} P)^{-1} (P^T \Sigma_D^{-1} D) \quad (4.46)$$

其中 Σ_D 為斜變方矩陣(Covariance Matrix)。

在實際影像驗證的範例中，以 ERS 衛星影像為例，要能明確辨識點位並含有足夠的訊號資訊(有效的降低雜訊)，依經驗值以取 32 個方位像元及 8 個斜距像元的子影像效果較佳，計算結果之方位方向的誤差量約為 12.5 cm，此量測的水平方向的位移量在地表位移量較大時，就可以當成平面位移的輔助量[Jonsson et al., 2002]。

以此方法量測位移量時，地表的變化不能太大，時間間隔也不能太長，否則將會增加雜訊，而導致影像匹配失敗。所以在進行計算前，影像要有適當的處理，如兩幅影像要重新在方位方向進行套合的處理、誤差點剔除、影像錯誤趨勢(如軌道誤差、地形誤差)的移除等，方能增加影像的訊號雜訊比，提高匹配成功的比例。

同時，以振幅影像匹配來量測位移量的方法，只量取方位方向的變形量，並不量測斜距方向的變形量，因為斜距方向的點位其相對應的地面解析度太差。雷達影像在斜距方向的解析度約為方位方向解析度的 4 倍，在斜距方向的量測精度無法滿足需求。而且地表在斜距方向的變形量，已可在雷達視距的方向上反映出來，此種量測結果並無法提供明顯的附加資訊。

為提高量測結果的精度，Wright 等(2004)模擬三種不同角度模式來計算單一點位的誤差量，模式分述如下：

1. 都為右視像對，不同的視角

以右視的上升對影像及下降對影像組成的結合，此狀況如 ENVISAT 及 RADARSAT 影像，因此二種衛星影像都是右視影像，且有多種入射角的成像模式，配合上升及下降對，可以組成不同的成像幾何。如果視角分別為 23 度及 43 度，則地面點位在的三維誤差分別為 0.9 cm，11.7 cm 及 1.6 cm。

從結果中可知，南北方向的誤差量達 11.7 cm，遠大於另兩維的誤差量，這是因為衛星在上升軌道及下降軌道間的夾角大約只有 20 度左右，不具強力的幾何條件，所以在此方向的誤差量較大。

2. 左右視像對，相同視角

有一些較特殊的 SAR 影像可以調整左視及右視的成像幾何，如 ECHO 及 EVINSAR。在此條件下就可以組成左、右視像的組合，如果視角為 30 度，則三維誤差可以有相當大的改進，分別成為 1.0 cm、4.8 cm 及 0.6 cm。從結果中可知，雖然在南北方向有相當大的改進，但此方向的精度仍然比較差。

當調整衛星軌道的角度，使其上升及下降對的軌道傾斜角為-30 及-150 度時，地面點位在視角 30 度的點位誤差為 1.2 cm、2.0 cm 及 0.6 cm。在此條件下，可以獲得相當高精度的三維變形量，但缺點為此種角度的軌道只能涵蓋地球南北緯度 60 度以內的地區。



3. 左右視，不同視角

只有在很少的情形下可以獲得在上升及下降影像對中分別以左、右視的方式配合不同視角的影像，結果點位的精度 0.7 cm、3.1 cm 及 0.4 cm，點位的精度雖然可以接受，但是此種組成的所有條件都不同，會引起其他的問題，如點位的辨認及增加套合處理困難等。

4.8.2 GPS 約制法

因為以多角度方法計算的三維變形量，必須要有地表變動前後的上升及下降影像對，但在許多地區卻無法同時取得，且以多角度法所量測的平面南北方向精度稍差，因此本研究提出配合 GPS 高精度的水平分量，推算實際的垂直變形量，利於變形分析及模式推估。

由 D-InSAR 所得到的結果為雷達視距方向而非實際高程變化值，我們利用 GPS 精確的水平方向位移資料及其彼此間的幾何關係，即可得到垂直高程變化量。GPS 水平位移向量為 $\mathbf{V}=(a, b, 0)$ ，衛星軌道方向(Orbit)與正北 N 夾一角度 φ ，我們必須將 GPS 水平位移向量先旋轉至雷達成像方向 (a', b', c') ，如圖 4.11。

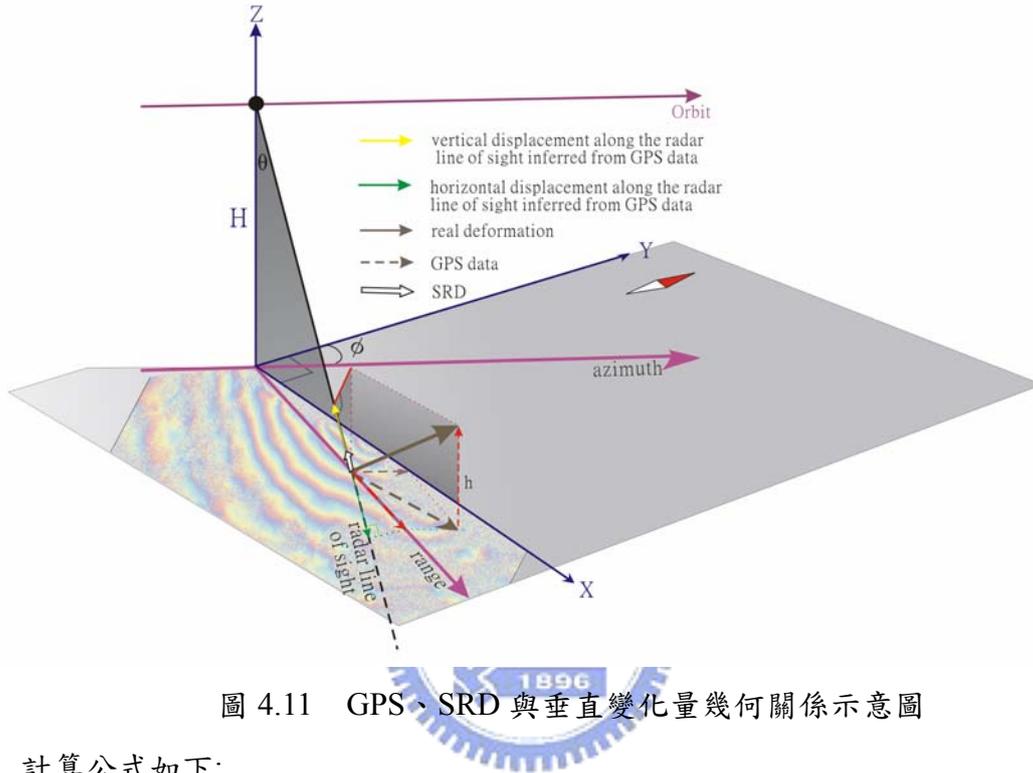


圖 4.11 GPS、SRD 與垂直變化量幾何關係示意圖

計算公式如下：

$$\begin{bmatrix} a' \\ b' \\ c' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cos \varphi + b \sin \varphi \\ -a \sin \varphi + b \cos \varphi \\ c \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

以 GPS 水平位移分量投影至雷達視距方向加上地面垂直變形量(h)投影至雷達視距方向的變形量，可得雷達干涉圖量測的變形量 Δr ，

$$\Delta r = (a \cos \varphi + b \sin \varphi) \sin \theta + h \cos \theta \quad (4.48)$$

式中 θ 為點位的視距角度，角度隨著斜距的不同有同的視角，每一點位都須計算單獨點位的視角。

由雷達干涉圖得到的變形量減去平面的投影量，剩下為垂直方向貢獻的變形量，因此將此變形量反算為垂直方向，可得垂直變形量為

$$h = \Delta r \sec \theta - (a \cos \varphi + b \sin \varphi) \tan \theta \quad (4.49)$$

4.9 以 GPS 變形量資料模擬雷達變形干涉圖

為能有效的比較 GPS 資料與 InSAR 所測得的變形量，本研究提出以像元計算方法將 GPS 的資料轉換至與雷達同一座標系統的雷達座標，再將其變形量計算斜距方向的變形量，經此轉換後所得的變形量可以模擬雷達變形干涉圖，轉換的流程如圖 4.12。

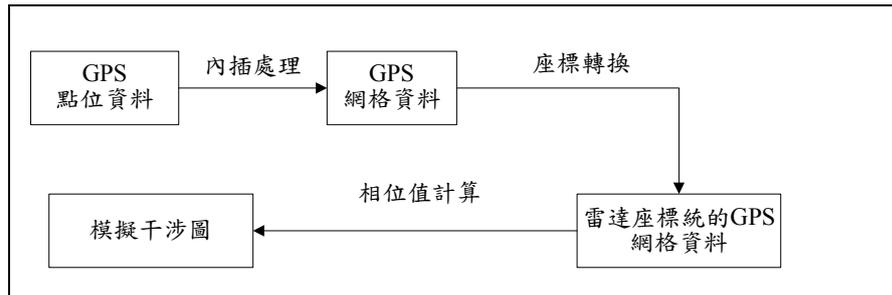


圖 4.12 以 GPS 資料模擬雷達變形干涉圖流程

因 GPS 為點位資料，所以先將點位資料內插成網格資料，再將網格的點位依 4.7 節中的方法，將地面座標轉換至雷達座標，此時就有雷達座標每一個點位的變動量。接下來必須將變動量計算至相位值，考慮的因素有二，首先將三維變動量(a,b,c)投影至雷達視距方向，其中(a,b)為平面變動量，(c)為垂直變動量，投影量可以表示為

$$\delta r = (a \cos \varphi + b \sin \varphi) \sin \theta + c \cos \theta \quad (4.50)$$

式中

θ ：視角

φ ：軌道旋轉角

其次，將變動量依距離變化與相位關係，可以計算得到點位的相位值

$$\phi_{motion} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (4.51)$$

此相位值經 2π 模組化取樣後即可得模擬相位值。