

## 第六章 集集地震同震變形研究

雷達干涉技術在地震災害的應用中，可以快速且全面的獲取高精度的地表變形資訊，本研究以 ERS-2 的衛星雷達影像，利用差分干涉的技術來偵測集集地震的地表變形情形，配合 GPS 的調查資料，探討該項技術在多植被的台灣地區應用的可行性及其精確度。

為能確實的比較所獲得的結果，將 GPS 量測所測的點位變動資料，經內插處理及座標轉換後，形成雷達座標系統之干涉條紋圖，然後與雷達干涉處理所獲得之結果進行比對，經檢驗後顯示兩者干涉條紋的變化情形相當一致。本研究並利用 GPS 在水平方向具有高精度的特性，將 GPS 的水平資料當約制條件，求解出差分干涉技術的垂直變形量，並將此垂直變形量與 GPS 垂直變形量相互比較，亦獲得良好的結果。

### 6.1 簡介

雷達干涉技術係利用兩幅同一地區不同時間(位置)所拍攝的影像作干涉處理，此方法能產生高精度的數值地形模型[Zebker and Goldstein, 1986; Madsen et al., 1993]，更能利用差分干涉技術，獲得地表的變形量[Massonnet et al., 1993; Zebker et al., 1994a]。該項技術目前主要應用於地震變形及地表下陷偵測等研究領域[Massonnet and Feigl, 1998; Rosen et al., 2000]。

在地震的變形監控部份，傳統的方法係利用測量技術量測每個點位的變動情形，其所須的時間及人力都相當的龐大，近年來隨著 GPS 科技的發達，雖然可以較快速的獲得各個點位的高精度變形資料，但是仍需相當的人力且僅能獲得點位的變形資料。而利用衛載的雷達資料進行監控，可利用衛星的在固定軌道上運轉，會週期性的拍攝各地區影像的優勢，而不必擔心缺乏地震前資料的問題；另外因雷達具有穿透雲層的特性，能在天候不佳時拍攝影像，且影像涵蓋大區域的範圍，可以獲得大區域且全面性的資料，配合差分干涉的技術可以獲得高精度的資料。因此以雷達差分干涉技術應用在地震變形的應用上，是一項強而有力的工具[Zebker, 2000]。

1999年9月21日1:47 am於台灣中部集集附近地區發生了規模  $M_w$  7.6 的強烈地震，震央位於北緯  $23.85^\circ$ ，東經  $120.78^\circ$ ，此為台灣地區近年來規模最大的地震，造成人民傷亡及嚴重的財產損失。根據遠域資料分析本次地震之震源錯動面積高達4,000平方公里，其地表變形的調查結果顯示，在車籠埔斷層及大茅埔斷層間變形量非常嚴重，而其較規律的部份則是車籠埔斷層東側的部份有比較大位移量，而在車籠埔斷層西側的位移量則比較小。

震後，有許多學者利用 GPS 及 D-InSAR 技術來偵測地表的變形情形，首先發表量測結果的張嘉強教授以 99 個 GPS 站的水平資料，計算得點位的水平位移量約為 0.1 m 至 8.5 m [Chang, 2000]。楊名教授蒐集了 285 個 GPS 點位地震前後的變動資料，結果顯示垂直方向最大位移量為 4 m，水平位移量最大達到 9 m [Yang et al., 2000]。余水倍先生則利用從 1992 年至 1999 年每年週期性的控制點來預估地殼變動情形，並以震後 3 個月的 GPS 現地實測資料估計地震同震變形量，量測結果上盤水平位移量 1.1 至 9.1 m，下盤的水平移動量較小，為 0.1 至 1.5 m；上盤的垂直變動量為 1.2 至 4.4 m，下盤則下陷 0.02 至 0.26 m [Yu et al., 2001]。

有關雷達差分干涉技術在集集地震同震變形相關的研究，Suga 等(2001)在震後分別以 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，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，上盤的變動量為相左移動，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。

Pathier 等(2003)利用 1999 年 2 月至 2000 年 1 月共六幅影像組成九個變形對來進行干涉處理，同樣得到西部平坦地區的變形干涉圖。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，且九幅干涉對的均方根誤差為 1.7 cm，產生結果較好的同震變形干涉圖。

Liu 等(2004)利用 1999/5/6、1999/10/28 及 1998/11/12、1999/10/28 兩幅變形像對偵測同震變形結果，結果顯示兩幅影像皆同樣有 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。研究結果為了和 GPS 的點位比較，該研究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，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。

Chang 等(2004a)利用雷達差分干涉技術，得到接近斷層區的最大變形量約為 26 cm；並將 GPS 的變形資料直接以向量相乘的方法模擬至雷達視距方向，模擬差分干涉法偵測變形的干涉條紋。為比較變形的量測結果，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。

學者研究地震變形量希望能獲得水平及垂直變形量，以利進一步的分析及探討。以雷達差分干涉技術雖能快速的獲得全區的地面變形資料，但只能獲得雷達視距方向的變形量，且因雷達視距方向的變形資料無法直接轉換至水平及垂直方向，故本研究利用 GPS 在水平方向具有高精度的特性，採 GPS 的水平資料當約制條件，求解出差分干涉技術的垂直變形量，並將此垂直變形量與 GPS 垂直變形量進行比較。

## 6.2 研究區介紹

發生於 1999 年 9 月 21 日的集集地震，經調查結果顯示，此地震主要係肇因於車籠埔斷層破裂所引起，車籠埔斷層長度大約為 90 km，集集地震的地表破裂主要受到初始的垂直位移以及接下來的西向位移所影響[Kao and Chen, 2000]。

在地表變形的調查結果顯示，車籠埔斷層及大茅埔斷層間呈現大規模的變形量。由於車籠埔斷層是一個伸向向西的逆衝斷層，所以斷層東部的變形量較西部為大。斷層南半部的垂直平均位移量約為 2 m，斷層北半部的面垂直位移約為 4 m，而在北半部主要

斷層範圍內水平的位移量大約為 5 至 9 m [Yang et al., 2000; Yu et al., 2001]。由於本地震的破壞力道太大，造成數千棟的建物受損，超過一萬人受傷，死亡人數超過 2300 人。

研究區位於台灣中部，在西部丘陵區有許多南北走向的逆衝斷層，這些斷層由於受到由東向西的推擠，產生伸向趨勢向西的現象，這些斷層從東至西分別有雙冬斷層、車籠埔斷層及彰化斷層等，分佈的狀況如圖 6.1 所示。

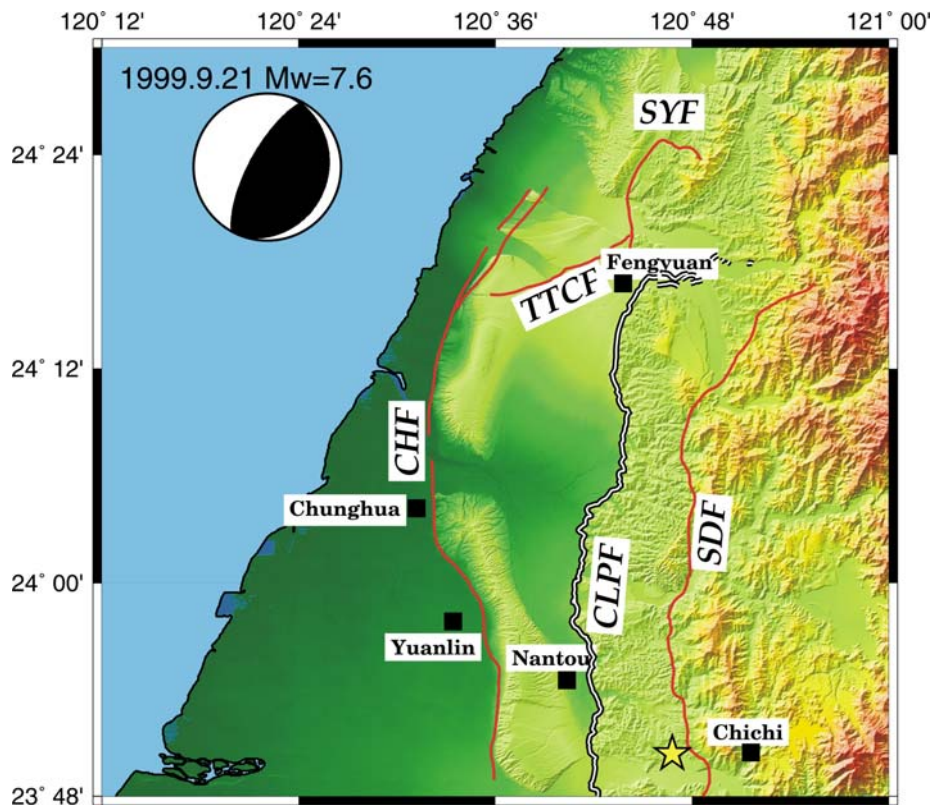


圖 6.1 集集地震的地質及地形概況圖

圖中雙線的斷層為引起集集地震的車籠埔斷層，其他的實線為活動斷層。標記的符號 CLPF：車籠埔斷層、SDF：雙冬斷層、CHF：彰化斷層、SYF：三義斷層、TTCF：桶子腳斷層。☆為集集地震的震央。圖形的高程資料係以 40 m 的 DEM 資料處理成分層設色圖。

研究區主要的破裂帶是南北走向，並沿著介於西部丘陵及台中盆地的車籠埔斷層邊界地區，所以集集地震的主要破裂帶主要是由車籠埔斷層所引起，其中在位於較東邊的

豐原地區其斷層走向為接近北東-南西走向的卓蘭段，在斷層的定位上仍可視為車籠埔斷層的一部份[Chen et al., 2001]。

原本丘陵與前緣盆地的交界處是雙冬斷層，但是受到從菲律賓板塊連續往西北方向的碰撞，致使前緣盆地往西移，而產生位於更西側之車籠埔斷層及彰化斷層的錯動，所以中臺灣地區變形的前緣為位於車籠埔斷層西邊的彰化斷層。

車籠埔斷層位於台灣中部為西部平原與山區的交界處，斷層的下盤幾乎為平原區，涵蓋許多都市，該區的地形地物適合進行干涉的處理，相對的上盤地形為陡峭山區，並有濃密的植被覆蓋，不利於雷達干涉的處理。

## 6.3 研究方法

### 6.3.1 資料獲取

台灣地區因位處於亞熱帶區域，各地區植物生長茂密，在不同的時間段就會有比較大的地表變化，將影響獲取影像的相關性，因此要選取合適的影像並不容易。在本研究中我們挑選接近集集地震(1999年9月21日)的ERS-2的C波段雷達影像，因ERS-2的重複週期為35天，所以選取的影像日期分別為1999/5/6、1999/6/10、1999/7/15、1999/8/19、1999/9/23及1999/10/28等6幅ERS影像。

為配合雷達干涉技術的要求，本研究利用荷蘭Delft大學的精確軌道資料來計算基線長，影像基本資料及計算得到的基線長如表6.1。從表中可以清楚的看出接近9月21日附近的幾個像對，其基線值都相當長，不適宜進行干涉變形的處理。從表中左側橫跨地震日期的像對中，1999/8/19 - 1999/9/23像對的間隔日期為35天，間隔天數最短，但基線長471 m；其次1999/7/15 - 1999/9/23像對間隔70天，基線長471 m；1999/8/19 - 1999/10/28像對也是70天，但基線長更長為867 m，都不太適合進行地震變形處理。故要選取最短基線長的像對為1999/5/6 - 1999/10/28像對，基線長度只有38 m，但其橫跨的天數長達175天。大部份的影像對基線都長於200 m，基線長度都過長。所以本研究在選擇含地震期間的變形對影像時，以基線最短者1999/5/6 - 1999/10/28的影像對為主。

表 6.1 集集地震變形研究像對基本資料

日期 1	日期 2	間隔天數(天)	基線(m)	橫跨地震?	日期 1	日期 2	間隔天數(天)	基線(m)	橫跨地震?
99/05/06	99/09/23	140	212	Y	99/05/06	99/06/10	35	419	N
99/05/06	99/10/28	175	38	Y	99/05/06	99/07/15	70	260	N
99/06/10	99/09/23	105	631	Y	99/05/06	99/08/19	105	849	N
99/06/10	99/10/28	140	407	Y	99/06/10	99/07/15	35	161	N
99/07/15	99/09/23	70	471	Y	99/06/10	99/08/19	70	1267	N
99/07/15	99/10/28	105	246	Y	99/07/15	99/08/19	35	1109	N
99/08/19	99/09/23	35	471	Y	99/09/23	99/10/28	35	228	N
99/08/19	99/10/28	70	867	Y	96/03/06	96/03/07	1	78	N

在地形效應的去除部份，因考量與 1999/5/6 影像組成的像對(1999/5/6 - 1999/6/10、1999/5/6 - 1999/7/15、1999/5/6 - 1999/8/19、1999/5/6 - 1999/9/23)中，其基線值都大於 200 m，不適宜當地形對，因此挑選成像時間較早的 1996/3/6 - 1996/3/7 間隔 1 日的像對為地形對，此像對基線長度為 78 m，基線長度及日期間隔適合當地形對的影像。

### 6.3.2 處理流程

本研究中雷達影像的處理是以 Stanford 大學的雷達影像干涉處理軟體 ROI 來進行處理，該軟體先以計算都普勒相位中心的方法來處理原始的資料，並且以可達 1/32 像元精度的匹配方法來進行兩影像的套合處理，可產生的含有振幅與相位的複數影像，因影像的相位值經過  $2\pi$  重新調制處理，所以相位影像就會形成一條條的干涉條紋圖。

利用兩幅干涉條紋影像來進行差分干涉處理時，其中一幅為涵蓋地形及地震變形的變形像對，另一幅則純為地形效應的地形對。本研究中的變形對為取像時間橫跨地震的 1999/5/6 - 1999/10/28 像對，地形對則為 1996/3/6 - 1996/3/7 像對。地形效應的干涉圖需經全相位回復處理，方能回復其原始的真正相位值，故本研究以 Snaphu 軟體來進行全

相位回復處理，該軟體為以統計的方法為基礎，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]。

本研究以四軌跡法進行差分干涉的處理，在進行差分處理前，必須先將兩幅干涉圖進行套合處理，套合完成後，就可進行差分干涉的計算，並由計算結果產生變形干涉圖。

雷達差分干涉技術所產生的干涉圖為地表變形在雷達視距方向的投影量，為求得真實的地表垂直變形量，我們利用 GPS 高精度的平面位移量為約制條件，求解點位的高程變化量，解算的公式如(4.45)式所示，整體處理流程如圖 6.2 所示。

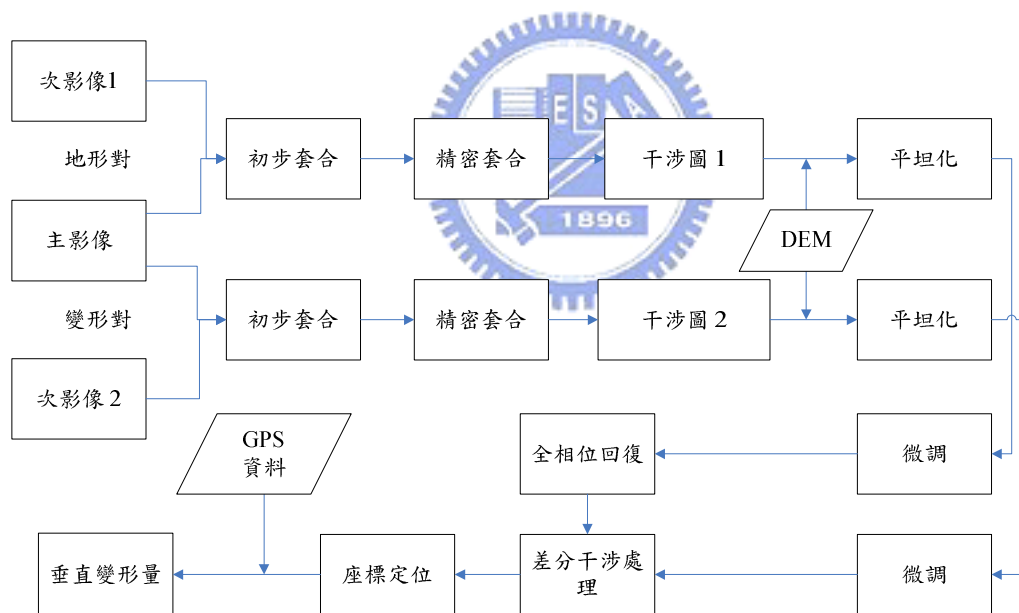


圖 6.2 差分干涉處理及計算垂直位移量流程圖

在處理流程中，經過精確套合後，影像對中的每一個點位都相對應，因此只要進行複數影像的相乘就可以到影像干涉圖。為使得干涉圖顯示在方位-斜距的座標系統內時呈現比例一致的情況，會將影像進行多觀點的處理，處理的比例為 1:5 或是 2:10。

在平坦化的處理過程中，因為精密軌道座標與實際的軌道座標值有些微差距，誤差會引起干涉圖的條紋呈現不同的走向，因此需透過微調來修正軌道資料，使干涉條紋能正確反應地表的變形狀況。

因為差分干涉的影像資料為全區分佈的資料，而 GPS 的資料為點位資料，所以在進行垂直高計算前，須先將 GPS 的平面位移資料內插成影像資料，本研究選用立方迴旋法的方法進行內插處理。

## 6.4 成果評估及分析

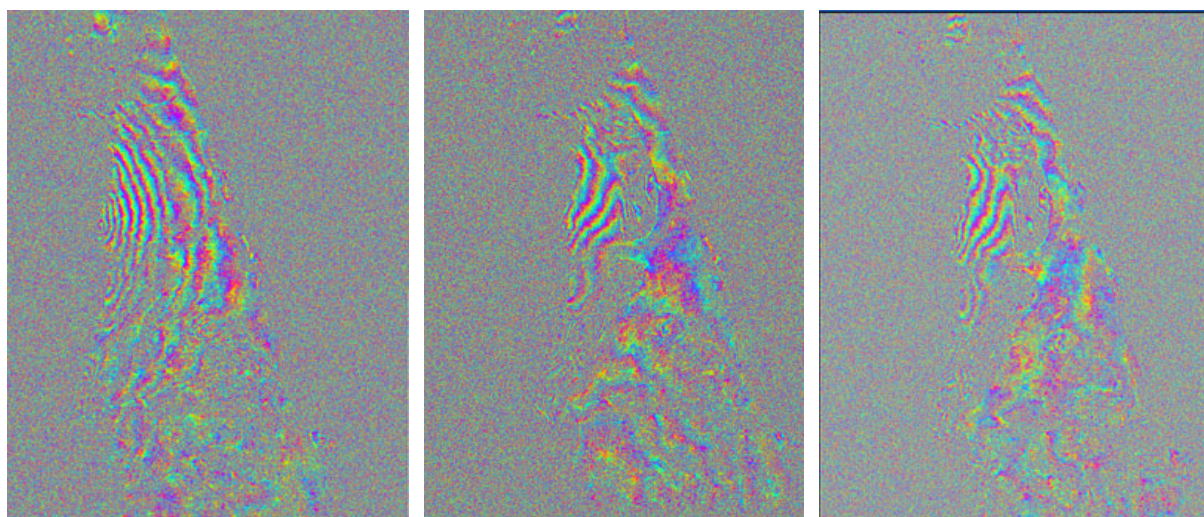
本研究區所採用 GPS 資料來源有兩組，分別為內政部的一、二等點及余水倍先生的資料。其中，內政部的資料量計有 276 筆，其一等點的精度較好，但二等點的平面精度為 0.01 m 左右，高程精度則為 0.067 m；余水倍先生的有資料計 28 點，點位之平面精度為 0.005 m，高程精度為 0.029 m 左右。

為求全區整體的變形量，需內插點位資料，因內政部的資料較多，故採用該組資料，但因此資料的高程精度較差，約有 6-7 cm 的誤差，投影至雷達方向會產生 5-6 cm 的誤差量(約有兩圈的干涉條紋)，此誤差量將會影響結果，而實際加入後結果確實不佳，故未採用其高程資料。在模擬的部分僅將平面的變形量予以模擬至雷達視距方向的變形量。

### 6.4.1 產生干涉圖

雖然本研究僅選用 1999/5/6 - 1999/10/28 的影像對為變形對，為了解其他像對的狀況，也對其他像對進行干涉的處理，經挑選結果較好的干涉對如圖 6.3，因圖中所顯示的干涉處理為處理過程中的影像，所以仍為左右顛倒的影像。由圖中可以明顯的分辨出，1999/5/6 - 1999/10/28 干涉圖干涉效果最好，有干涉條紋的地區最多；至於 1999/5/6 - 1999/9/23 及 1999/7/15 - 1999/10/28 兩像對的基線長度相近似，所以產生的干涉條紋相類似，有干涉的區域也大約相同。





1999/5/6-1999/10/28

1999/5/6-1999/9/23

1999/7/15-1999/10/28

圖 6.3 變形對的初步處理結果

經初步處理結果顯示 1999/5/6-1999/10/28 像對的干涉效果最好，所以就產生其同調性圖如圖 6.4，分析此像對像元的相關性。從圖中可以看出來中部平原地區的相關性較高，對應圖 6.3 所示，高相關性的地區，相對應的干涉條紋就比較清楚，而在東邊海面的部分，就沒有任何相關性。

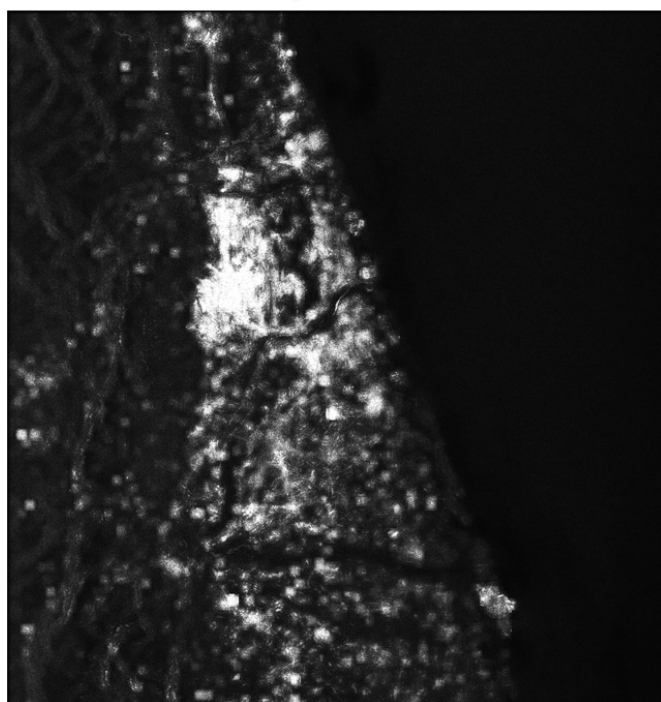


圖 6.4 1999/5/6-1999/10/28 像對同調性圖

將 1999/5/6 - 1999/10/28 變形對與地形對套合後，就可以進行差分干涉處理，將變形對中的地形資訊予以去除，得到只有變形資料的變形干涉圖，將干涉圖座標轉換後如圖 6.5，圖中干涉條紋代表地面位移量投影在雷達視距方向的變形量，雙實線表示車籠埔斷層，實線表示活斷層。

另外，圖中顯示的條紋變動量即為集集地震的地表變化情形，從圖中可以看出干涉條紋與車籠埔斷層走向密切吻合，在下盤地區中，從沿海地區計算至干涉條紋的中心約有 11 條干涉條紋數，每條條紋代表 2.8 cm 的變形量，由此可以清楚的分辨出下盤每個區域的變形量。在車籠埔斷層右邊的上盤區域，因位屬山區而植被茂盛，並且變動量很大，導致因地震前後地表變化太大而相關性太低，產生低相關的狀況，缺乏有效的干涉結果，所以沒有明顯的干涉條紋產生。

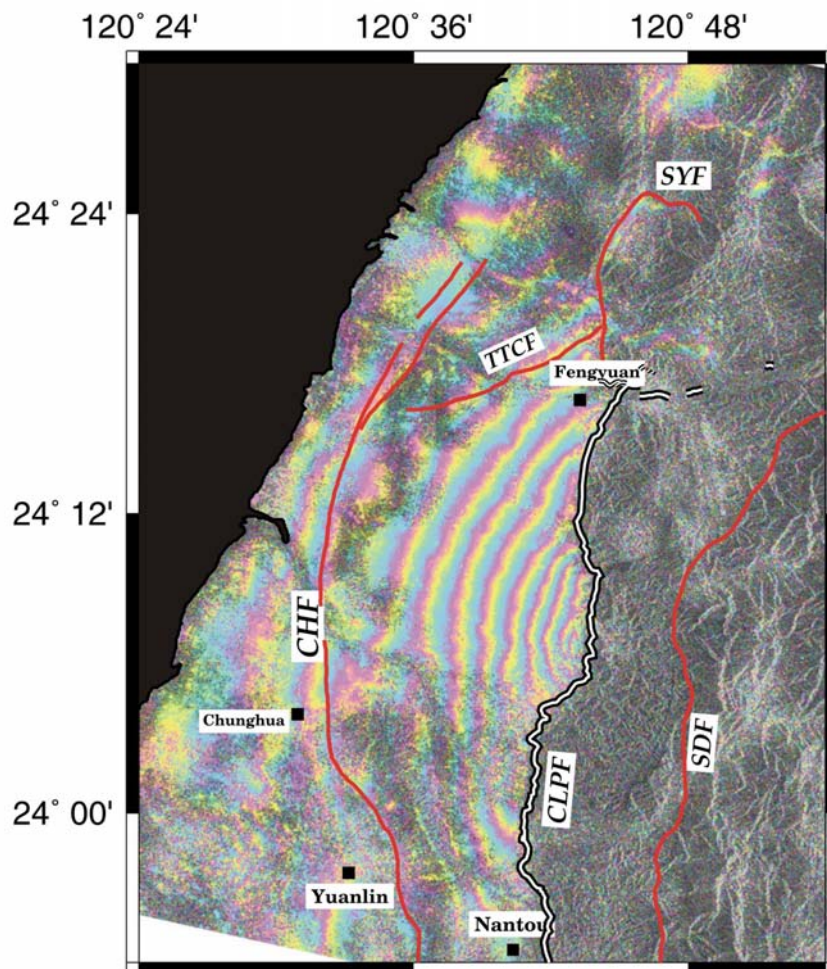


圖 6.5 1999/5/6 - 1999/10/28 ERS 雷達影像變形干涉圖

### 6.4.2 GPS 變形分析

在地震後，內政部就針對災區 GPS 的地籍控制點進行檢測，配合之前的量測資料就可以計算出點位的變形量。我們針對研究區的範圍內選擇 276 個 GPS 量測點位，其水平分量精度為 1-2 cm，垂直分量的精度為 6-7 cm。其中水平變形量最大的位移量為 9.23 m，平均的變形量為 1.41 m，較大的變形量位於車籠埔斷層及雙冬斷層之間；以車籠埔斷層為界線，上盤的變形量遠大於下盤的變形量，上盤的點位變動方向為往西北偏北的方向移動，下盤的點位變動為往東南方向移動，點位變動情形如圖 6.6。圖中箭頭的向量方向代表水平的位移方向，其中較大的變形區域位於車籠埔斷層及雙冬斷層之間。

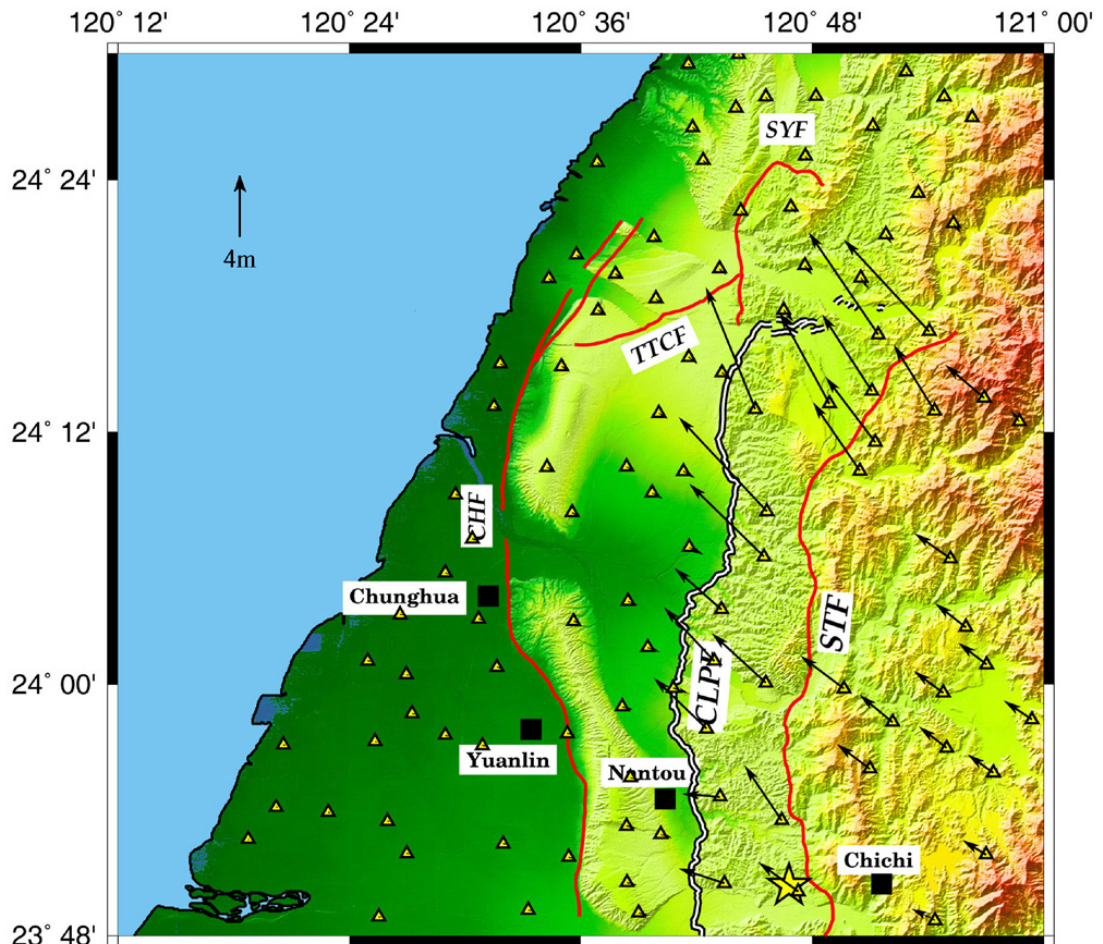


圖 6.6 台灣中部地區集集地震 GPS 點位的同震變形向量圖

因為 GPS 變動資料為點位資料，為能了解由 GPS 偵測的全區域性變動狀況，本研究嘗試將 GPS 點位資料進行內插處理，並將不同的變動量予以分層設色處理，方便進行變動量的判讀，圖 6.7 為 GPS 水平變動量的內插處理結果。圖中可以清楚的看出變動量最大的區域為豐原右邊黑色的區塊部份，變動量較大的區域為介於車籠埔斷層與雙冬斷層之間，藉由此圖的表示方式，可以清楚、快速的判讀 GPS 量測變動量的狀況。

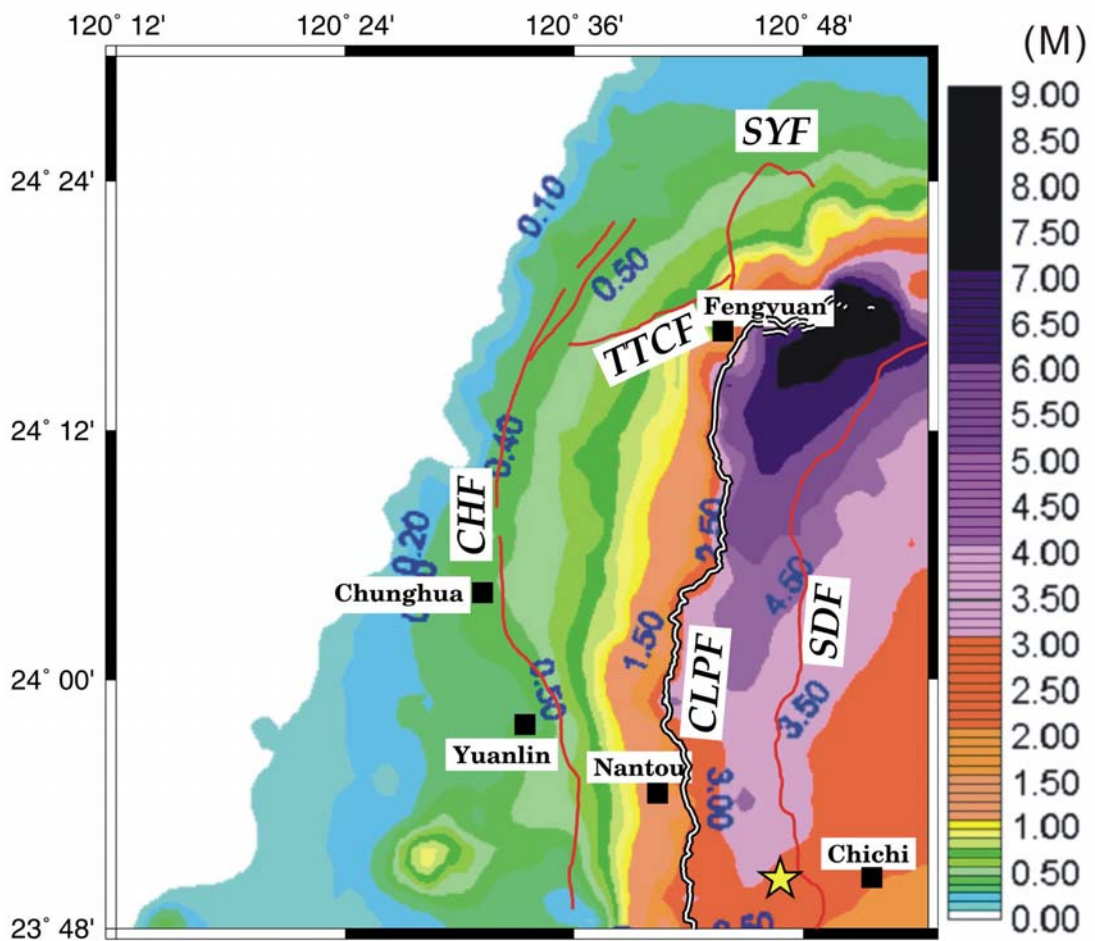


圖 6.7 以 GPS 量測的集集地震水平變動量的分層設色圖

由於 GPS 的資料與差分干涉資料的座標系統不同，為有效的比較 GPS 及差分干涉資料，需將 GPS 的資料座標轉換至雷達座標系統，故將 GPS 的變形資料進行資料轉換的處理，其處理方法如圖 6.8 所示。轉換過程為將 GPS 的點位資料內插成網格資料，並

將此網格資料的座標轉換為雷達座標系統；因為干涉技術所偵測的變動量為雷達視距方向的投影量，所以 GPS 的變動量必須計算至雷達視距方向的投影量，並以相位的方式來表示，如此便可以產生模擬的 GPS 干涉圖。

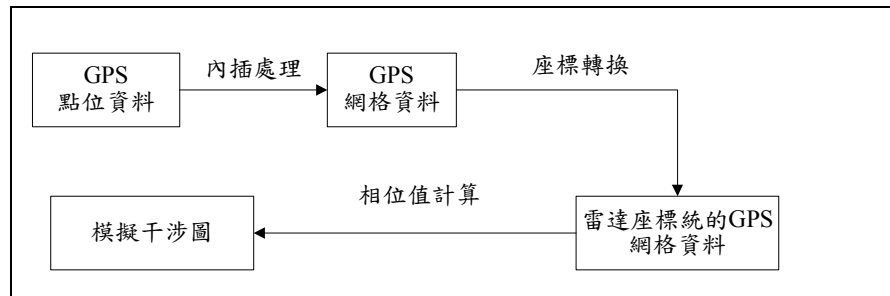


圖 6.8 由 GPS 的點位資料模擬雷達干涉圖的處理流程

為能有效的比較 GPS 資料與 D-InSAR 所測得的變形量，現將 GPS 資料中 UTM 的座標轉換至與雷達同一座標系統的雷達座標，座標轉換的方式如 4.9 節的方法所述。至於將其變形量計算至斜距方向的變形量，可以利用三角的投影關係式(6.1)，逐點計算其對應的視角，就可換算投影量。

$$\Delta\rho = \Delta y \times \sin \theta_{inc} \quad (6.1)$$

其中， $\Delta y$  為 GPS 量測的水平位移量， $\theta_{inc}$ ：為量測點位對應於雷達的視角， $\Delta\rho$  為雷達視距方向的變動量。

經此轉換計算後所得的變形量，並經  $2\pi$  的模組化處理後，結果的模擬干涉圖如圖 6.9 所示。圖中展示由 GPS 水平位移量模擬的雷達干涉圖，干涉條紋變化表示變動量在雷達視距方向的投影量。因為處理的過程是由點位的內插處理而得，所以圖中干涉條紋不是很平滑。但其優點為在上盤地區，雷達影像的干涉圖因相關性不佳，沒有干涉現象，但是模擬的結果卻能展現全區域干涉結果，在上盤亦有明顯的干涉條紋。從圖中可以發現變動的趨勢以車籠埔斷層為界線，在車籠埔斷層的上盤，干涉條紋非常的密集，至於在下盤部分，則是由車籠埔斷層往外逐漸輻射出去，變動的大小隨著離斷層的距離愈遠，而愈來愈小。

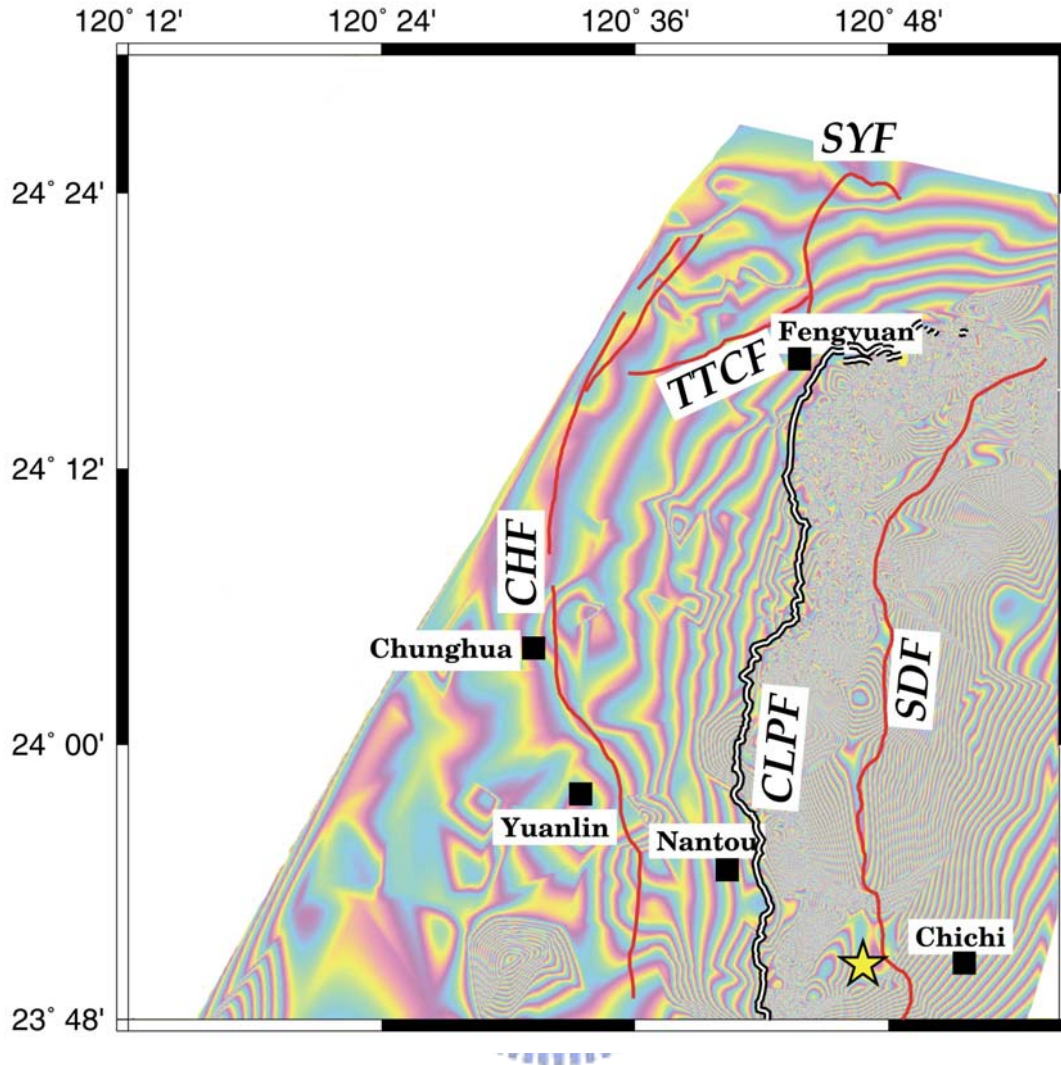


圖 6.9 由集集地震 GPS 量測水平變動量模擬雷達干涉圖

以模擬的干涉圖與實際的雷達干涉圖比較，可以發現實際的干涉圖因受實際地形因素影響，所以在河流區域因地面高度、地表輻射特性不同等因素，干涉條紋會出現不連續的現象，但在模擬圖中則無此現象。

從雷達影像以差分干涉技術產生的干涉圖及模擬圖中都可以發現，在南投及員林地區都有不同於其他地區趨勢的干涉條紋，此密集的圓形條紋，表示該兩地區有較特殊的變動情形，可能為地質條件不同或有其他表變形量。

將此模擬圖與 D-InSAR 所得的干涉變形量比較，可以發現兩者在西部平原的變形趨勢很類似，具有相同形狀的干涉條紋形狀及分佈，但計算其條紋數，可以發現從

D-InSAR 的資料中，共有 11 條的干涉條紋，但 GPS 的資料僅有 8 條條紋，相差 3 條，以每條 2.8 cm 計算，則將近有 8.4 cm 的差異，此部份可能為垂直的變動量或是量測誤差所產生。

#### 6.4.3 變形量比較分析

為比較雷達差分干涉技術產生的垂直變形量精度，我們選擇中研院余水倍先生測量精度較好的 GPS 點位計 28 點，此 28 個點位垂直變化量的精度為 1-2 cm，水平點位變化量的精度為 3-4 cm，點位為單點測量，資料間沒有相關性，資料如表 6.2，負值表示點位往反方向移動[Yu et al., 2001]。

表 6.2 28 個 GPS 點位集集地震變形量

編號	站名	緯度 (°)	經度 (°)	東方(cm)	北方(cm)	上方(cm)
1	A247	120.408	24.020	21.3	-6.2	1.7
2	AF04	120.534	23.871	32.3	-6.7	-5.2
3	AF07	120.525	23.985	37.9	-14.8	-5.3
4	AF09	120.514	24.037	33.2	-10.7	-3.3
5	AF14	120.643	24.015	79.2	-28.4	-10.4
6	AF15	120.648	24.094	72.6	-35.3	-10.1
7	AF16	120.668	24.036	96.2	-39.9	-14.3
8	AF17	120.632	24.156	59.1	-32.1	-7.4
9	AF18	120.527	24.216	31	-15.8	-2.4
10	AF19	120.569	24.073	45.7	-18.8	-4.9
11	AF21	120.572	24.216	37.9	-22.2	-3.6
12	AF26	120.651	24.221	55.8	-38.3	-6.7
13	G090	120.562	24.312	26	-20.2	-3.3
14	G091	120.589	24.379	21.2	-19.1	-0.8
15	G092	120.628	24.421	19.4	-19.8	0.8
16	G103	120.718	24.260	66.3	-59.2	-10
17	M049	120.446	23.979	26	-8.1	-8.6
18	M326	120.575	24.254	35.3	-22.6	-3.4
19	M428	120.622	24.327	30.9	-27.1	-4.2
20	M486	120.475	24.090	29	-12.3	-5.5
21	M805	120.681	24.171	79.8	-47.4	-11.5
22	M808	120.686	24.111	93.7	-51.7	-13.3
23	M904	120.607	24.299	33.8	-25.5	-2.9
24	M906	120.522	24.256	27.9	-18.1	0.1
25	M907	120.633	24.068	67	-29.5	-13.9
26	M916	120.712	24.332	42.9	-43	-8.6
27	TECS	120.655	24.356	31.7	-28.2	-0.4
28	WNTS	120.584	24.138	46.8	-22.3	-2.3

為比較雷達差分干涉技術所獲得的垂直變形量的精度，與 GPS 28 個點位的垂直變形量進行比較，得到的點位變化量如圖 6.10，從圖中可以看出垂直變動量比較結果，箭頭向上，表示差分干涉獲得的變動量大於 GPS 的垂直變動量；箭頭向下，表示差分干涉獲得的變動量小於 GPS 的垂直變動量。除少數幾個點位差異較大約為 5 cm 至 10 cm 外，大部份的點位都相當一致，其均方根誤差為 3.3 cm，顯示以雷達差分干涉技術獲得的垂直變化量與 GPS 點位的垂直變化量相當一致。

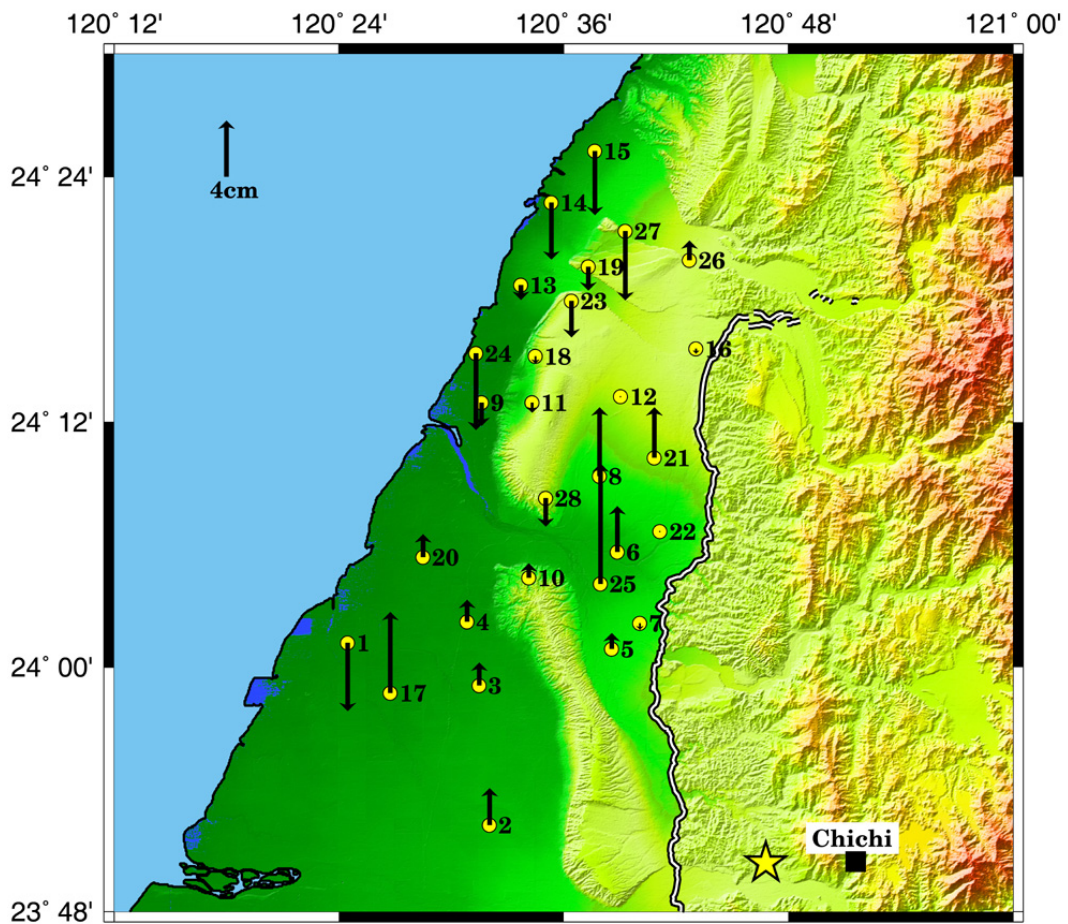


圖 6.10 GPS 與差分干涉技術計算垂直變形量的差異圖



## 6.5 結論

本研究所採用雷達影像的格式為原始資料，可以避免因不同都普勒相位中心處理所產生的差異，提高雷達干涉處理的精確度。另因 Snaphu 為機率式的全相位回覆處理，所以可以獲得整幅的影像變形量。

本研究中利用差分干涉技術成功的偵測出地表的變形狀況，有效的呈現地震下盤的變動狀況，並透過干涉條紋影像的分布，可以直接判讀、評估及分析地震所引起的地表變動狀況。但自集集地震發生以來，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，使得斷層東邊地區具低相關性而無法偵測到變動情形。

D-InSAR 技術與 GPS 資料都具有高精度的偵測結果，兩者在本研究中具有相當一致性的結果，因此兩者的資料可以有良好的互補作用。在具有干涉的條件下，可以由 D-InSAR 技術來進行偵測，以快速獲得全面性整體的變形情形。

至於以差分干涉的處理結果，雖能提供高精度、全面性的變動資訊，但在低相關的地區，差分干涉技術就無法顯示變形的結果；相對的，雖然 GPS 能夠量測地表的三維變動狀況，但因受限於點位的分布，無法提供全面性的變形狀況，因此結合差分干涉技術及 GPS 的資料可以提供高精度及更全面性的變形資料。

本研究探討 GPS 及差分干涉技術並進行比較分析，以內插的方式產生全面變形資料，並將此變形資料轉換至雷達座標，進而與差分干涉的技術進行比較，得到干涉條紋分佈類似的結果。最後並利用 GPS 水平點位高精度的特性，當成水平變形量的約制條件，進而求得地震的垂直變形量，此差分干涉的變形量與 GPS 的垂直變形量相比較，點位的變動均方根誤差為 3.3 cm，顯示資料良好的一致性，有此精度良好的垂直變形結果，更能提供地震研究學者進行更進一步的分析與研究。

## 第七章 屏東地區地層下陷研究

### 7.1 簡介

在台灣，因為高山地形陡峭崎嶇和植被茂密等效應，易造成同調性降低，而使得干涉圖的效果較差；然而，仍有許多研究成功地在地表變形上得到驗證，如應用在台南台地的抬升和集集地震下盤之同震變形等應用[Fruneau et al., 2001; Pathier et al., 2003]。

雖然 GPS 及水準測量所量測的變化量能提供高精確度的地表變形點位控制，但控制點僅能提供該點位的資訊，且受限於各種原因及狀況，這些控制點可能無法均勻分布；相較之下 D-InSAR 能快速、有效、經濟地提供全面性的地表變形資訊，因此本研究將探討以 D-InSAR 技術應用於屏東地區地層下陷之研究。

屏東平原位於台灣西南部，由於此地區地體構造背景特殊，屬於快速沉降與堆積的區域，又由於近年來在林邊至東港等沿海地區因超抽地下水之故，造成嚴重的地層下陷情形。因此本研究將利用差分干涉技術偵測地表下陷情形，分析屏東地區地層下陷狀況，並配合 GPS 及水準測量等資料做比較，評估差分干涉技術在台灣地區地層下陷偵測的精確度。

### 7.2 研究區介紹

本研究以屏東地區作為研究區域，該地區的數值地形圖資料如圖 7.1，圖中紅色區域為影像拍攝範圍，該地區位於 ERS 衛星軌道編號為 232、像幅編號為 3145 的雷達影像位置。從數值地形圖中可以看出研究區內的西半部高程值相當平均，為平原地區，東部及東北部局部地區高程變化較大，為高山地區。

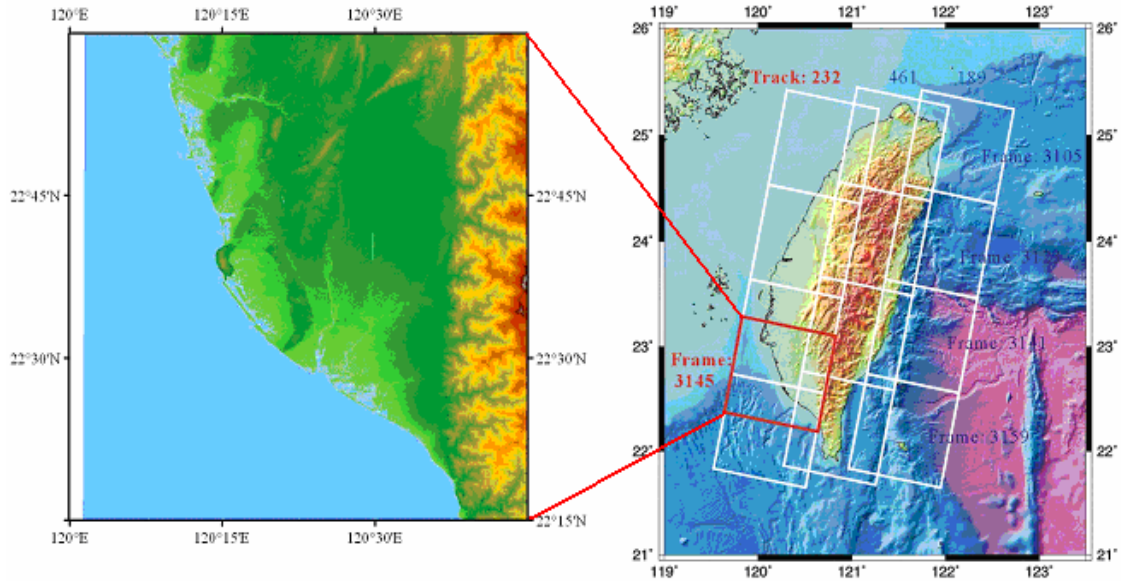


圖 7.1 屏東平原的地形圖及 ERS 衛星影像拍攝台灣地區的軌道分佈圖

台灣位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊之接合處，這兩個板塊每年以 8.2 cm 的顯著速度相互靠近，引起重要的變形縮短作用發生於活動造山的台灣島上[Yu et al., 1997]。屏東地區位於台灣西南部，涵蓋面積大約有 1210 平方公里。研究區的地質結構屬晚更新世以及全新世中未固化的沉積層，大部分的沉積層包含了深海相砂岩以及泥岩層，且有大量的淺海、瀉湖貝類及孔蟲化石[Shyu et al., 2001]。

屏東平原的北界及西界為第四紀沉積岩丘陵，而東面則被變質的第三系基盤之中央山脈所包圍。此平原最大的構造地形特徵，則是位於其東部的南北向且呈直線形分佈的潮州斷層，此斷層將本地區區分成屏東沖積平原以及中央山脈等地，研究區的地質圖如圖 7.2。圖中黑線代表活動斷層，CCF 為潮州斷層、CSF 為佳山斷層、LKF 為六龜斷層、KPF 為高屏斷層。在潮州斷層東側的中央山脈主要由始新世至中新世的厚層泥岩、板岩以及變質砂岩所組成。因此從斷層兩側不同的岩層年齡和岩性對比，顯示出潮州斷層有相對垂直的移動[Hu et al., 1997]。

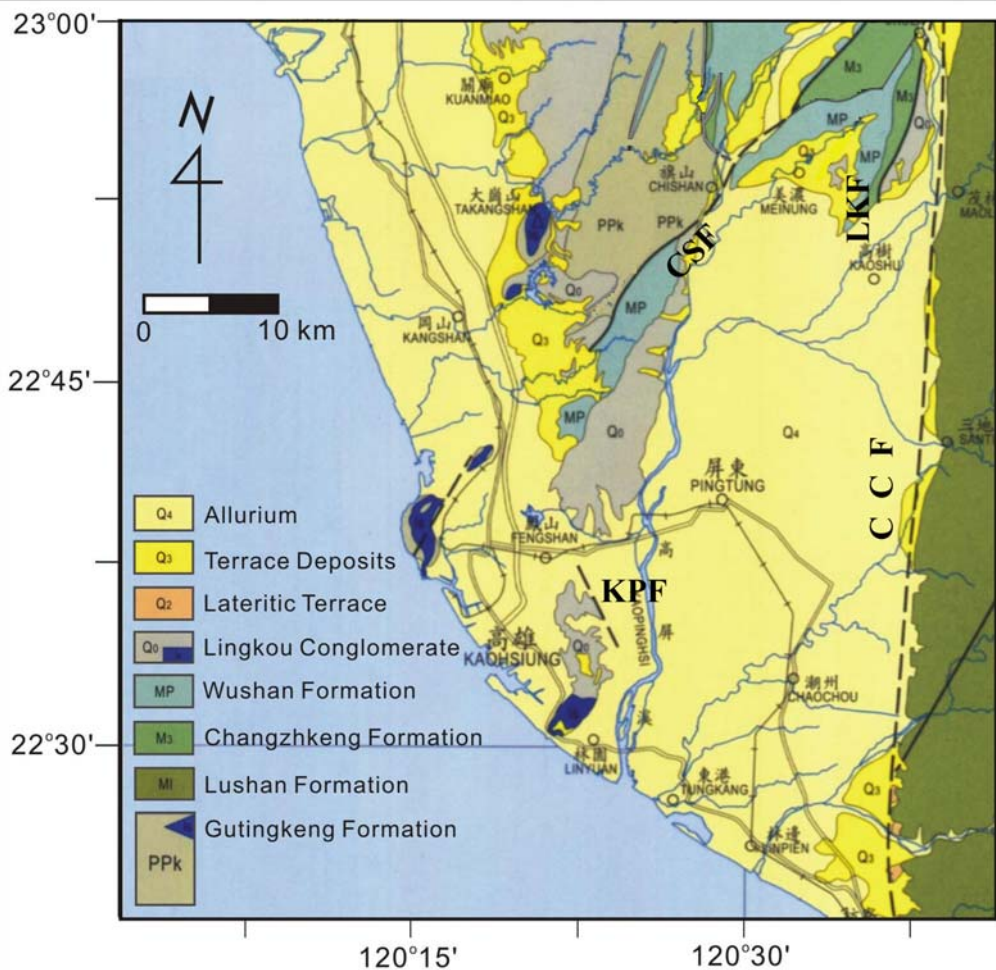


圖 7.2 研究區的地質結構圖[修改自 Hu et al., 2006]

由 GPS 測站測量屏東平原相對於澎湖白沙站之速度約在 42.2~55.5 mm/yr 之間，而且有向西南構造逃脫的現象，此區域不僅是地質構造活動相當活躍的地區，同時也存在嚴重的地層下陷問題，根據地調所之研究，屏東平原沉陷速率於沿地區較快，約可達 6 mm/yr 以上，並往東西兩側及北側遞減[Hu et al., 2001]。

而近年在台灣所建置的 GPS 觀測網中，位於屏東地區的測站共有 48 個。1996 至 1999 年所測得之垂直移動速率約為 13 ~ -25 mm/yr (負值代表沉陷)[Hu et al., 2006]，結果表示如圖 7.3 所示。根據張中白等以 D-InSAR 觀測台灣西南部季節性之地表變形，獲知台灣西南部地表沉降速率之季節性變化與地下水位高低波動情形一致[Chang et al., 2004b]。

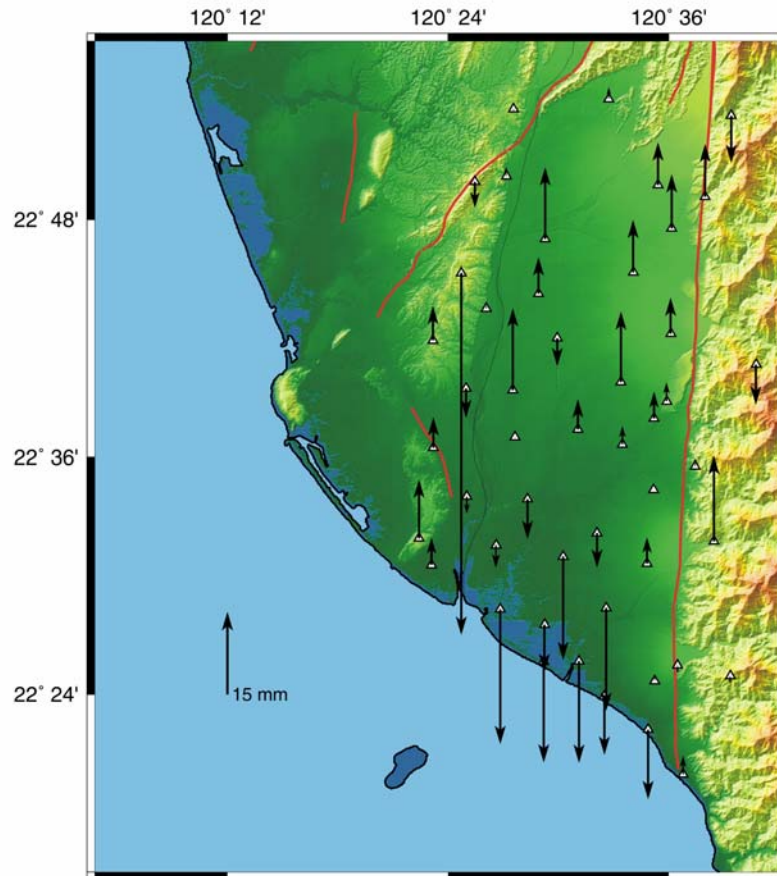


圖 7.3 屏東平原 GPS 站從 1996 至 1999 年的垂直變化向量圖

## 7.3 差分干涉處理及其結果

### 7.3.1 研究方法

差分干涉技術可用來量測如變遷偵測等地表的移動，為利用不同時期的兩幅雷達干涉圖消除原始地形效應後，得到純粹因變形所產生的相位值，這個技術可提供至公分級或更少的相對精度，以差分干涉技術可量測沿著雷達視距方向的地表移動量[Gabriel et al., 1989]。

D-InSAR是架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，同時包含了地形效應及地表變形所造成的干涉圖，再將兩張干涉圖進行差分的動作以扣除地形效應，所得到的結果則為僅因地表變形而造成的相位差值，本研究以二軌跡法進行差分干涉處理。

二軌跡法以既有的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影像產生第二張干涉圖，作為變形對，兩幅干涉圖差分後得到地表變形量。當然DEM的品質就如同選擇波長及基線長般將影響結果的好壞[Gabriel, 1988]。DEM產生的干涉圖是已經過地形效應改正，此法的限制是DEM的精度好壞及雷達系統的雜訊。

產生干涉圖的流程如圖 7.4，在二軌法中現有的 DEM 除用來進行平坦化的處理，並計算成干涉圖，用來消除變形干涉對的地形效應，其餘的處理過程與一般的差分干涉處理法類似，最後的地表變形量則由斜距方向的高程利用 GPS 平面資料當約制條件，進求出垂直高度，方便與水準量測的結果及 GPS 高程變化資料進行比較。

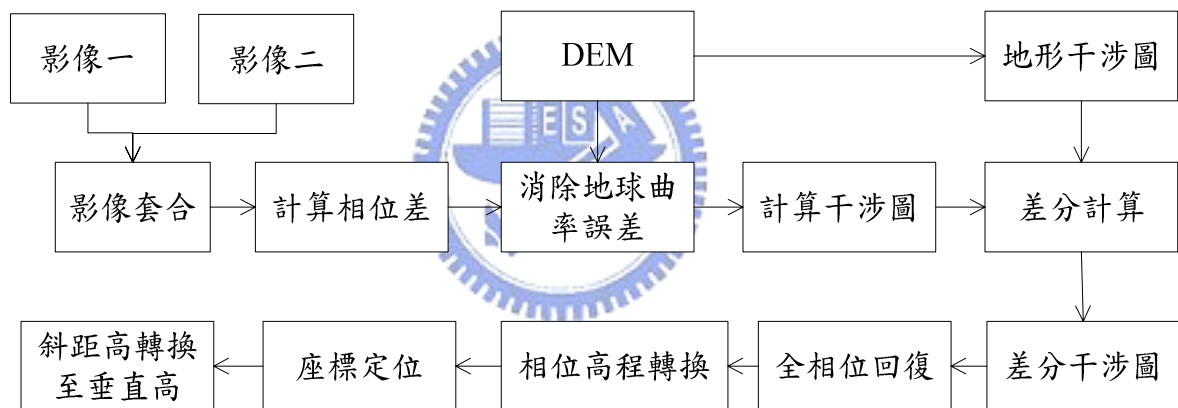


圖7.4 產生地形或地表形變干涉圖流程

### 7.3.2 資料獲得

本研究以屏東地區作為研究區域，研究區域位於 ERS 衛星軌道編號為 232、框架編號為 3145 的雷達影像區域。差分干涉的成果與基線的長短有相當重要的關係，基線愈短將可偵測愈高精度的高程差。本研究挑選基線長小於 100 m，時間跨越 1995~2000 年之 13 幅 SAR 影像，分別配對成 10 幅干涉影像對，使用的影像資料如表 7.1。

表 7.1 屏東地區地層下陷研究採用影像對

no.	Image Pair		Orbit	Horizontal Baseline(m)	Vertical Baseline(m)	Time Interval(day)
	Mission	image pair				
1	E1	19950705	20761	-66	-56	141
	E2	19951123	3092			
2	E1	19960131	23767	60	5	106
	E2	19960516	5597			
3	E1	19960410	24769	1	-103	36
	E2	19960516	5597			
4	E2	19970501	10607	14	59	315
	E2	19980312	15116			
5	E2	19980312	15116	-37	-99	385
	E2	19990401	20627			
6	E2	19981112	18623	-38	-19	70
	E2	19990121	19625			
7	E2	19981112	18623	48	84	175
	E2	19990506	21128			
8	E2	19990121	19625	84	98	105
	E2	19990506	21128			
9	E2	19990506	21128	-34	-34	175
	E2	19991028	23633			
10	E2	19990506	21128	-81	-102	245
	E2	20000106	24635			

從表中可以看出所有像對基線值都小於 200 m，符合干涉處理的要求；時間間隔從 36 天至 385 天，時間段平均落於 1995 年至 2000 年間。

#### 7.4 成果評估

屏東平原位於台灣南部為亞熱帶地區，隨著季節變化降雨量有明顯的不同，由中央氣象局降雨資料顯示，屏東地區 1995~2000 年月降雨量直方圖如圖 7.5，從圖中可以明顯的看出，每年的 5 月至 10 月份月降雨量較多超過 200 mm，11 月至隔年 4 月降雨量明顯較稀少，因此由降雨量趨勢將每年的 5 月至 10 月期間視為雨季，11 月至隔年 4 月為乾季。

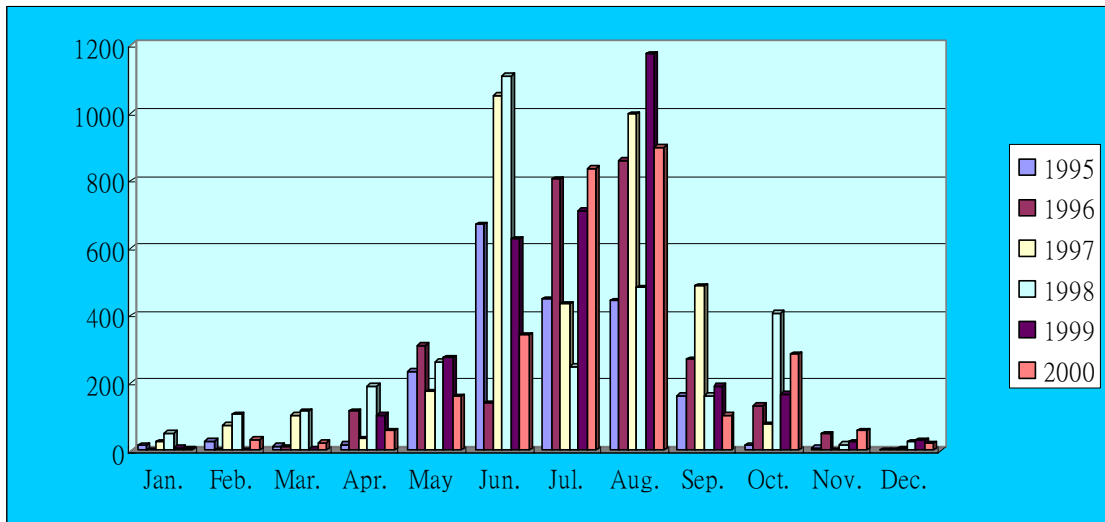


圖 7.5 屏東地區 1995~2000 年降雨量直方圖

#### 7.4.1 干涉圖結果

因降雨量的多寡會影響地表的沉陷量，因此本研究在探討變形量時，依時間的季節區分乾、溼季的變形量，將雷達干涉處理所得的干涉圖區分為乾、溼兩種季節分別如圖 7.6、圖 7.7 所示。圖 7.6 之影像對時間多落在乾季，而圖 7.7 的時間則多跨過雨季且時間間隔較長。差分干涉圖之干涉環表示視衛星方向的變形量，假若顏色變化由紅到藍表示變化量為+2.8 cm，反之，若顏色變化由藍到紅，則變化量為-2.8 cm。

從圖 7.6 中可以看出乾季的差分干涉圖條紋較為明顯，干涉效果較好，因乾季時間間隔較短為 1 至 4 個月，且地表含水量變動較少、相關性高，因此有較佳的干涉結果。而濕季則因降雨量多，土壤含水量較豐富，地面因不同的含水量導致不同的背向散射係數，因此降低影像的相關性，所以干涉的結果較差。而圖 7.7 中為橫跨濕季的干涉圖，因時間間隔較長且橫跨濕季，結果雖沒有乾季的效果好，但可清楚的看出干涉的條紋，判斷出屏東盆地以林邊溪口為沉降中心，向兩側及北邊遞減。



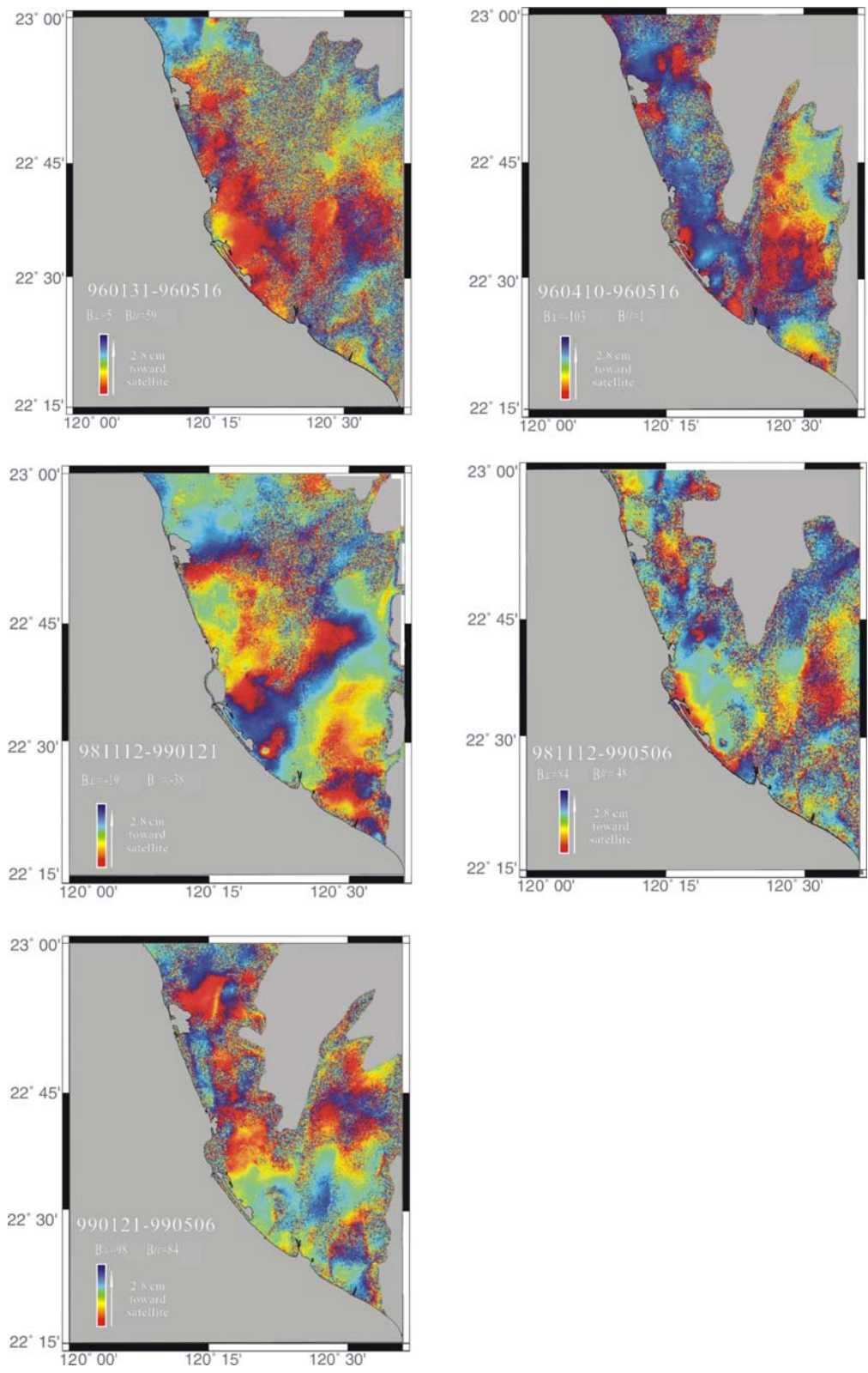


圖 7.6 乾季影像對的差分干涉結果

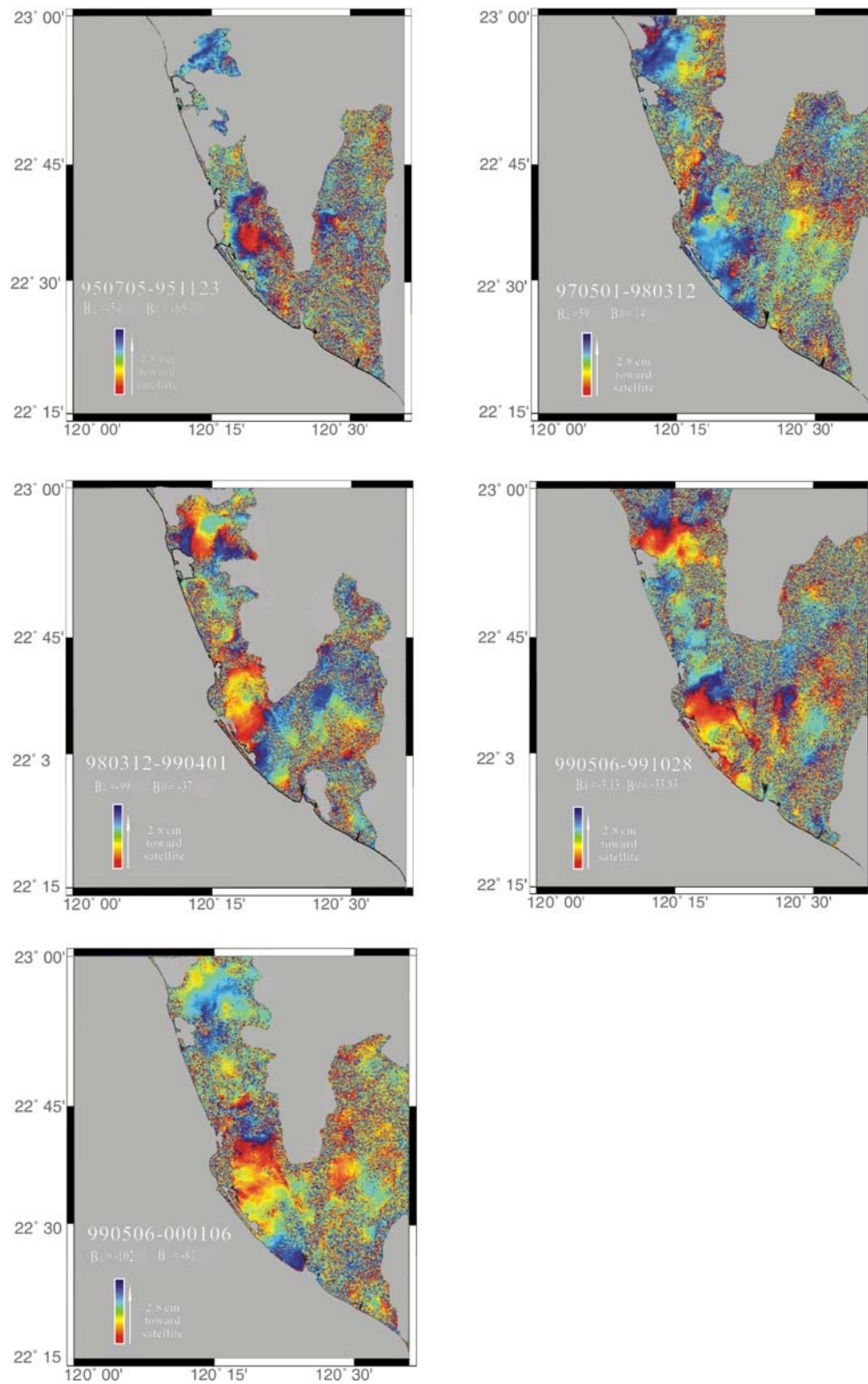


圖 7.7 濕季影像對的差分干涉結果

#### 7.4.2 與 GPS 資料及水準測量成果比較

利用雷達差分干涉技術所獲得之變形量為視距方向的變動量，其座標統為雷達座標系統，而 GPS 所量測的變形量為垂直及水平變形量，所以要比較兩種不同資料，必須將其轉換至同一座標系統。

因為雷達視距方向的變形量為地表平面及垂直變形量兩投影量的總合，所以無法單獨對應。因此本研究藉由 GPS 點位高精度的特性，將其當成水平分量的約制條件，進而求出地表的垂直變動量，該法在 4.9 節中有詳細的介紹，根據公式(4.49)就可以計算差分干涉技術的地層下陷量。

為能確實比較差分干涉技術計算垂直高度變化量的精度，本研究選用工研院於 1997 年 4 月及 1998 年 3 月在該地區的兩次水準測量資料為參考[ITRI, 1998]，此資料計有 A、B 兩條測線。其中，A 測線點位分佈較偏北邊，編號從 1 至 10 號，共有 10 個測站；B 測線則較偏南邊靠近沿海地區，編號從 1 至 6 號，共有 6 個測站，水準測量站點位分布如圖 7.8。

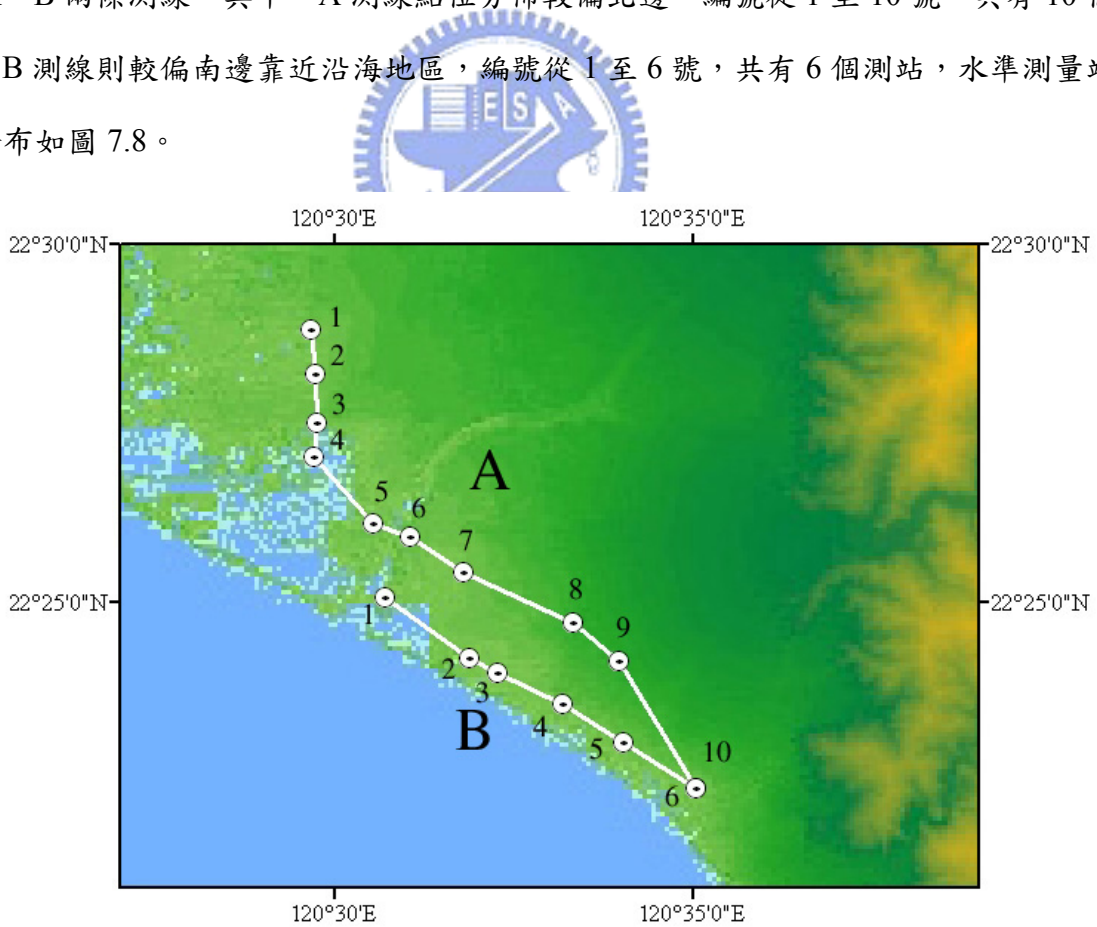


圖 7.8 水準點位置圖

因水準測量的時間為 1997 年 4 月至 1998 年 3 月，期間大約橫跨一年，因此採用同時間段的 GPS 垂直變化資料來行比較。但因水準資料的點位與 GPS 觀測的點位並不相同，因此本研究將 GPS 的高程變化資料以內插方法計算至水準點位的方式進行比較，所得結果如圖 7.9 及圖 7.10。

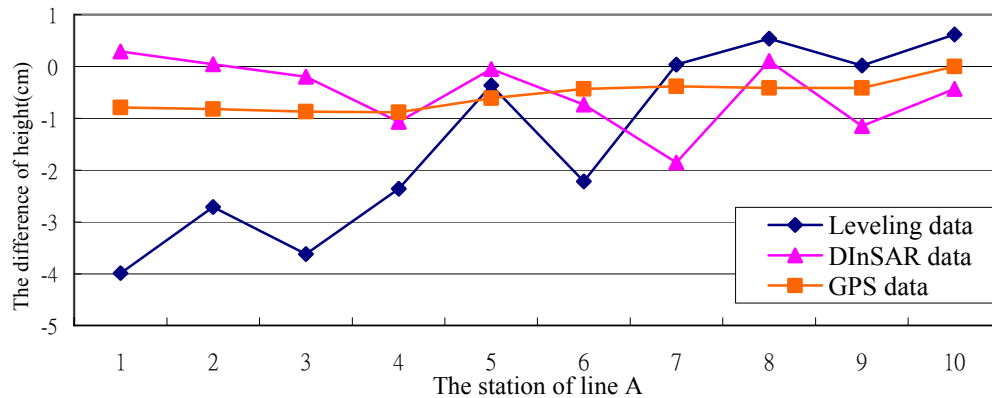


圖 7.9 測線 A 水準測量、GPS 與 D-InSAR 結果之高程變化量折線圖

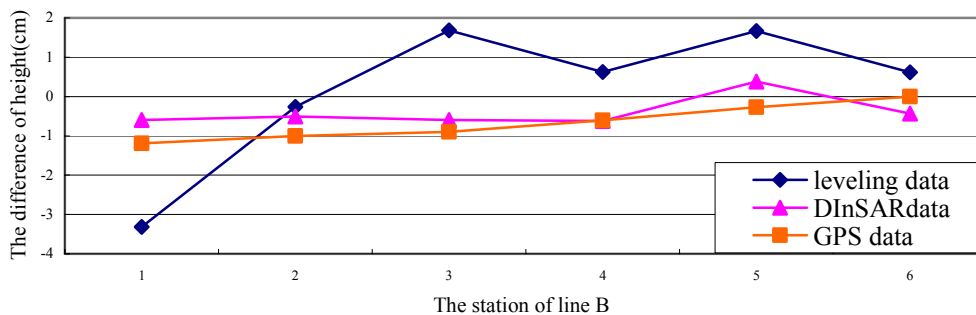


圖 7.10 測線 B 水準測量、GPS 與 D-InSAR 結果之高程變化量折線圖

圖 7.9 中顯示出對測線 A 所進行測量三種資料間的比較結果，除前三點的變化趨勢差異較大外，其餘點位的變化趨勢一致。其中 D-InSAR 所獲的結果與水準測量的結果差異較大，最大誤差為第 1 點的 4.3 cm；但與 GPS 結果較相似，最大誤差為 1.5 cm。對於全部 10 點的測量結果，水準測量的變化平均值為-1.4 cm，GPS 的變化平均值為-0.6 cm，D-InSAR 的變化平均值為-0.5 cm，由此可知，D-InSAR 與水準測量及 GPS 平均值的差異分別為 0.9 cm 及 0.1 cm，差異量非常小。

因此三種資料獲取時間有些差異，水準為 1997 年 4 月至 1998 年 3 月，D-InSAR 資料時間為 1997 年 5 月至 1998 年 3 月，GPS 為年度平均值。且因屏東平原乾、濕季地下水位的變動量很大，可能達到 3 m 以上，對沉陷量產生很大的影響。因季節不同會產生地表的變動，所以會有三種資料評估結果有些微差異的原因，但因差異量非常小，所以也可能是大氣效應或是處理產生的誤差。從圖中可以明顯看出第 5 點下陷的趨勢與其他點位明顯不同，經查該點位於河流邊，有充分的河水補充，所以下陷的情形與其他點位不同。

測線 B 的結果如圖 7.10 所示，將差分干涉的結果與水準測量的結果比較，所得的最大誤差為 2.7 cm；而與 GPS 結果的最大誤差為 0.7 cm。對於全部 6 點的測量結果，水準測量變化平均值為 0.2 cm，GPS 的變化平均值為 -0.7 cm，D-InSAR 的變化平均值為 -0.4 cm，由此可知 D-InSAR 與水準測量及 GPS 平均值的差異分別為 0.6 m 及 0.3 m，差異量非常小，D-InSAR 的結果與精密水準測量所得之高程變化值數值接近，趨勢也大略相同。



#### 7.4.3 屏東平原下陷量分析

為了解屏東平原的地表變化情形，以 GPS 資料所內插計算得到的垂直變化等高線圖如圖 7.11，圖中將屏東平原區分為 A、B 兩個區域，A 區域位於屏東平原南部，靠近沿海地區，以紅色圓圈圈住，表示該地區為下陷地區；B 區域為於屏東平原北部，以藍色圓圈圈住，表示該區為上升地區[Hu et al., 2006]。

圖 7.12 為由差分干涉技術計算得到的雷達干涉圖，干涉圖的條紋色彩表示地表變形在雷達視距方向的變化量，每一環的變化量為 2.8 cm。從兩圖的比較中可以看出，在圖中的 A 區塊部份為地層下陷的區域(紅色區域)，圖的 B 區塊部份為上升的地區(藍色部分)，比較圖 7.11 及圖 7.12，顯示兩者在地表上升區域及下降區域的變化趨勢一致。

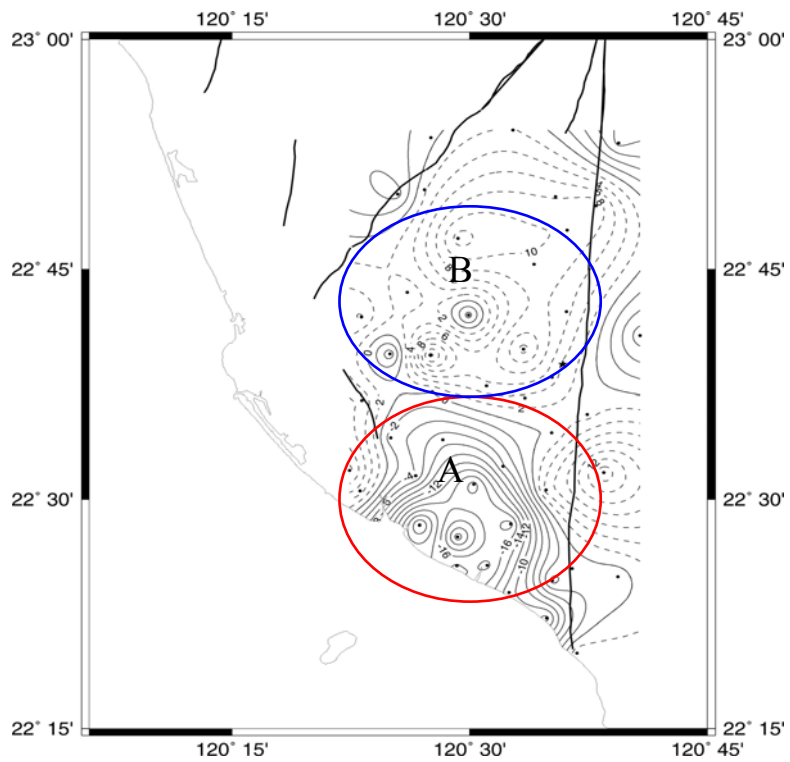


圖 7.11 由 GPS 資料顯示每年上升及下降速率曲線圖[修改自 Hu et al., 2006]

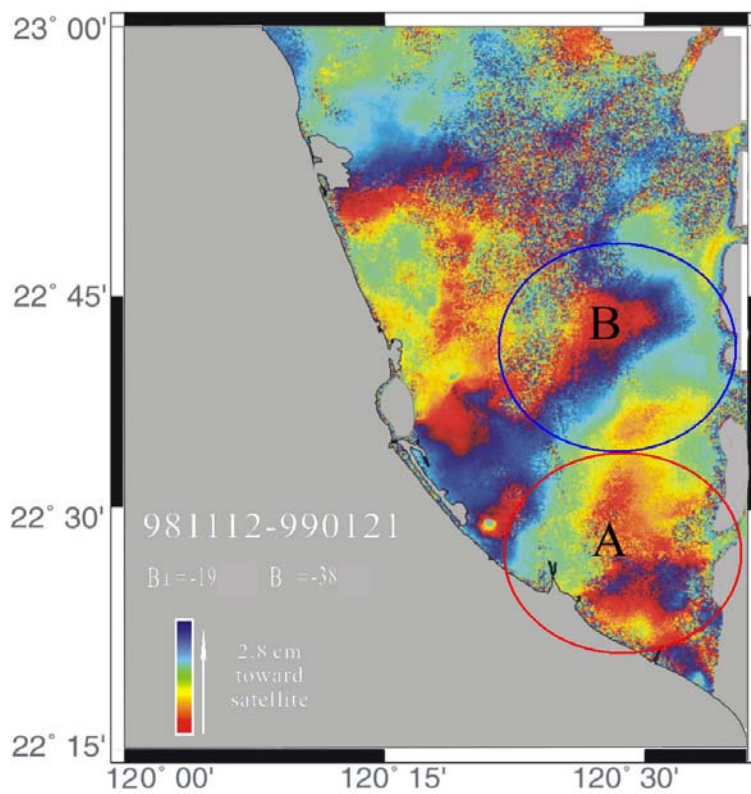


圖 7.12 由 D-InSAR 獲得差分干涉條紋

為更詳細分析屏東地區變形結果，將研究區內變化較大的屏東平原分別沿西北-東南走向取 C-C'、D-D'剖面及對應東北-西南走向的 E-E'、F-F'剖面進行剖面分析，以利了解研究區域內地層下陷範圍及下陷變形量，剖面位置示意圖如圖 7.13。

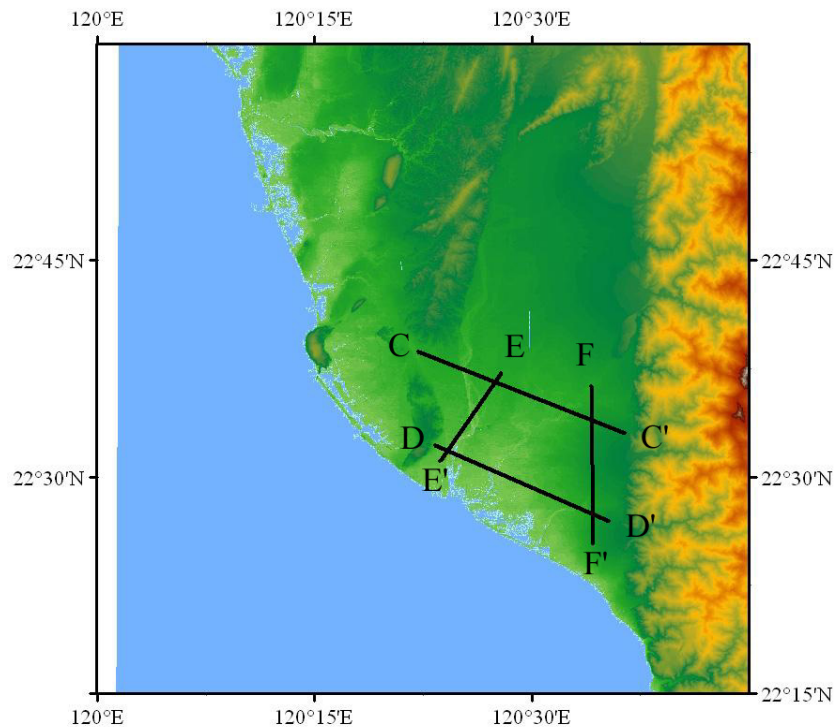


圖 7.13 剖面位置示意圖

剖面變形量的結果如圖 7.14 及圖 7.15，圖中水平軸為相對於剖面位置，縱軸為變形量，變形量單位為公分。圖 7.14 為乾季季節區，圖 7.15 為濕季季節區。從圖 7.14 之 C-C'圖中可以看出從 1996 至 1999 年的下降趨勢相當一致，沉陷量都是從西北往東南增加，至 2/3 處起才逐步回升，最大的下陷量為 1998-1999 年間約 3 cm，濕季的下陷量則較無一致趨勢。

D-D'的剖面則顯示在 1996-1998 年間下陷量變化不大，都在 1 cm 以內，至 1998-1999 年後，則下陷量增至 4 cm 左右，顯示 1999 年後在 D-D'剖面處下陷量明顯增加；從濕季的圖中可以看出最大下陷量亦為 3-4 cm，與乾季的下陷量差異不大，但下陷量同樣有逐年遞增的現象。從 D-D'的圖中可知，在沿海地區，因地下水較充沛，地表變形狀況較不易受雨量多寡影響。

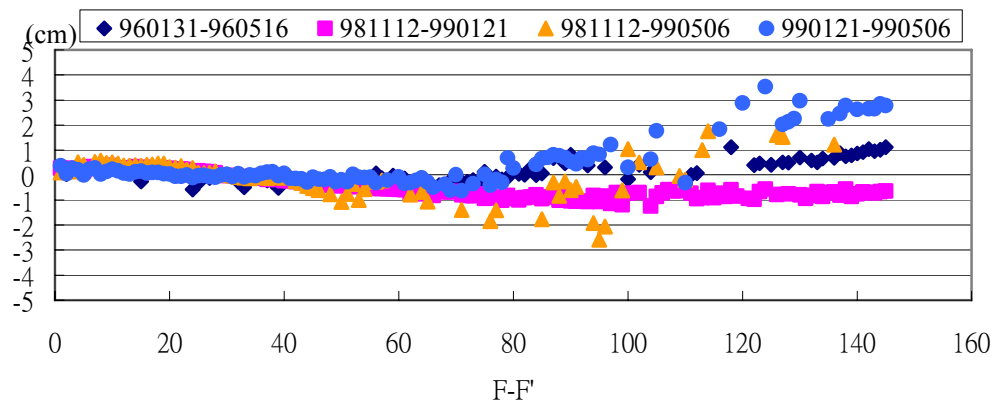
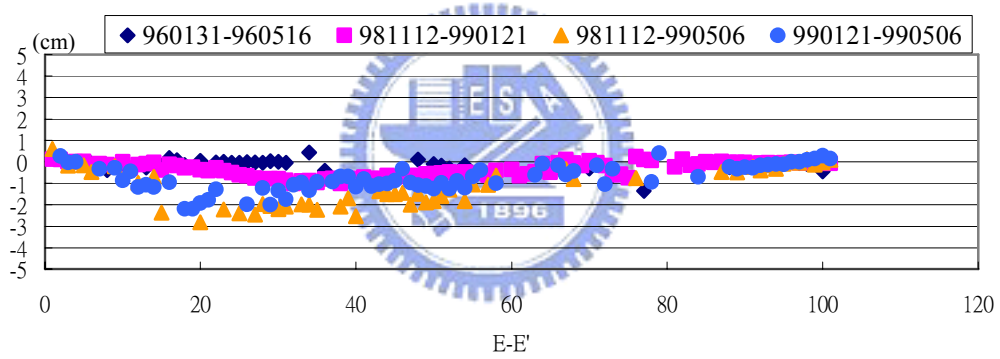
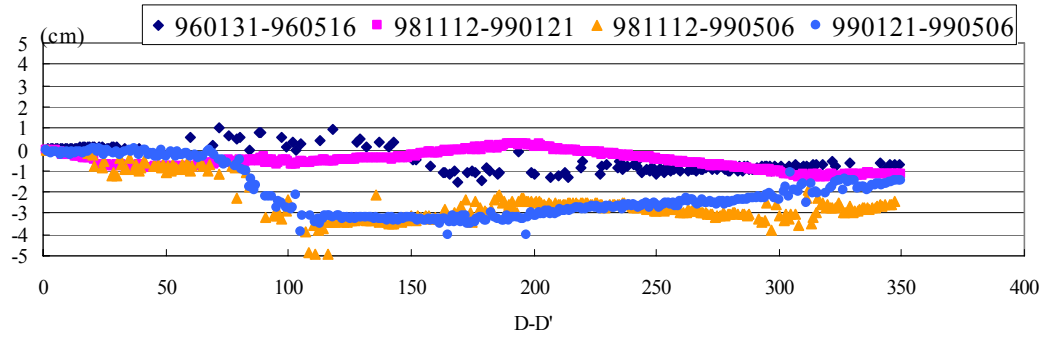
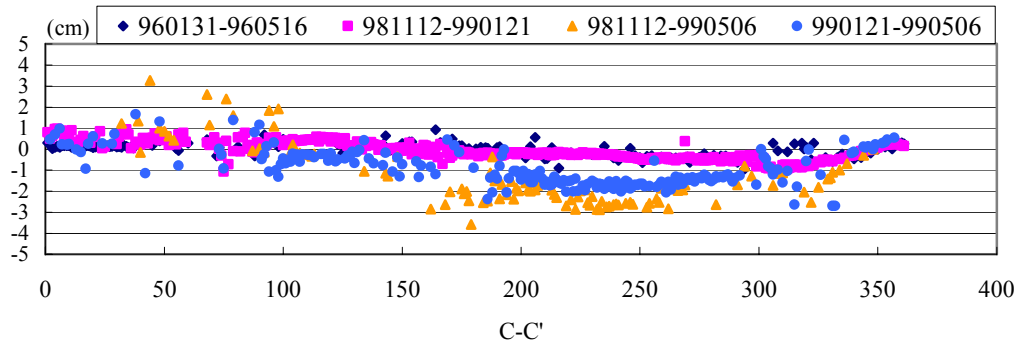


圖 7.14 屏東地區乾季剖面變形量



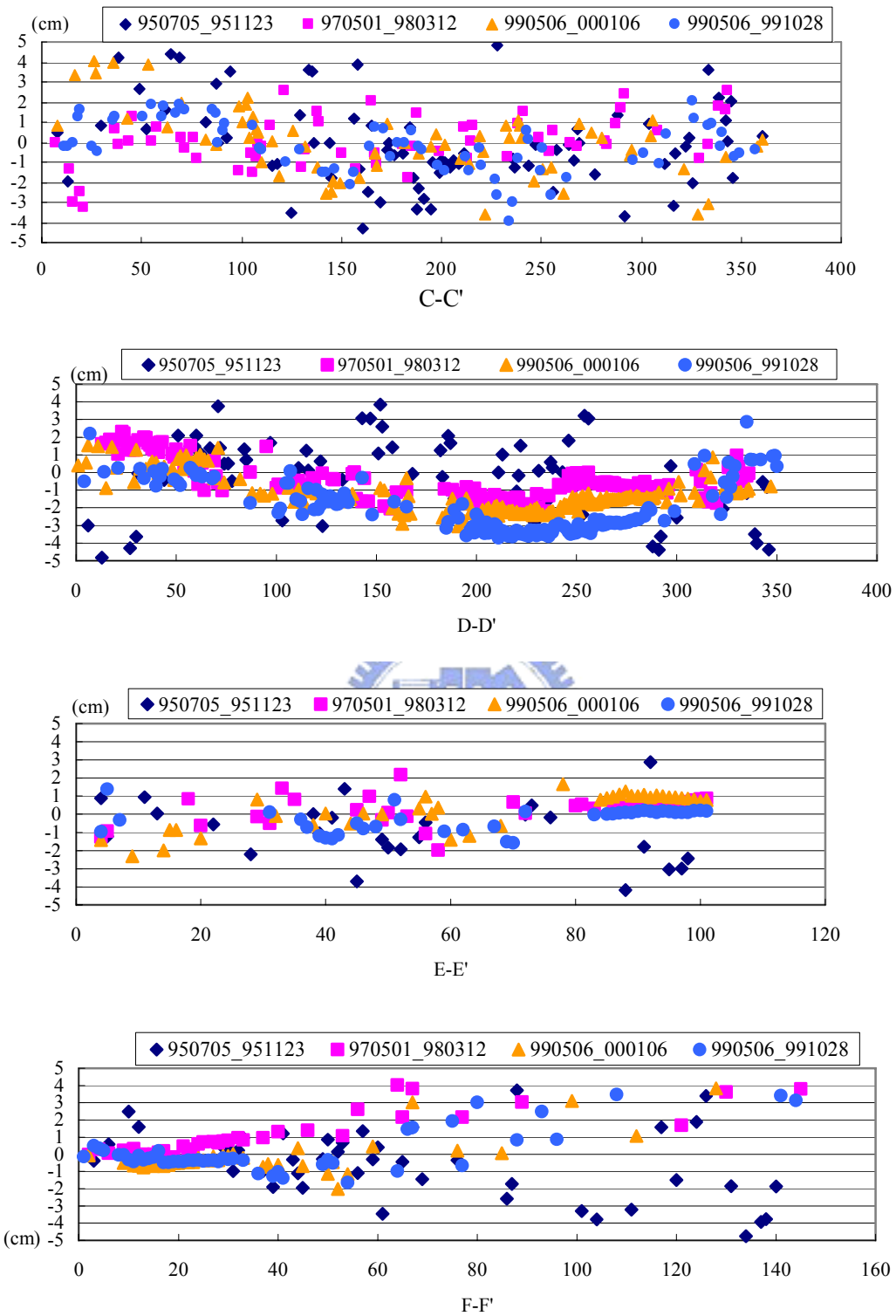


圖 7.15 屏東地區濕季剖面變形量

在 E-E' 的剖面中則可以看出下陷量由北往南增加至 1/3 處時，再逐步減少，最大下陷量在 1/3 處約 2-3 cm；F-F' 剖面一有同樣趨勢，只是在 F-F' 剖面的靠近沿海處，不但沒有下陷，反而有上升的趨勢。

從四條剖面的趨勢可看出，屏東平原下陷的趨勢為從四條剖面所涵蓋的區域，由外往內增加，下陷量最大的區域為剖面內的區域，此一趨勢與 GPS 所計算出來的下陷量推估吻合。因剖面橫跨的區域不同，為量化四條剖面的下陷量，將剖面點上的下陷量予以平均，得到不同時間段四條剖面的平均下陷量，區分乾濕季結果如表 7.2。

表 7.2 影像對乾季及溼季的平均下陷量。

溼季影像對	平均下陷量(cm)				乾季影像對	平均下陷量(cm)			
	C-C'	D-D'	E-E'	F-F'		C-C'	D-D'	E-E'	F-F'
95/07/05-95/11/23	-0.02	-0.40	-0.95	-0.39	96/01/31-96/05/16	-0.03	-0.52	-0.15	0.14
97/05/01-98/03/12	0.02	-0.44	0.32	1.13	98/11/12-99/01/21	-0.07	-0.57	-0.34	-0.49
99/05/06-99/10/28	-0.18	-1.30	0.21	-0.13	98/11/12-99/05/06	-1.31	-2.56	-1.15	-0.12
99/05/06-00/01/06	0.01	-2.07	-0.27	0.26	99/01/21-99/05/06	-0.94	-2.14	-0.75	0.43

表中可以看出除 F-F' 剖面無明顯趨勢外，其餘三條剖面濕季的下陷量都明顯低於乾季的下陷量，顯示該地區因濕季雨量較豐富填補地下水，導致乾濕季的下陷量有明顯的差異。

## 7.5 結論

本研究應用 1995 年至 2000 年屏東地區之合成孔徑雷達影像，經過差分干涉處理法分析處理後，與 GPS 資料及水準測量資料比較分析後可歸納下列幾項結論：

由兩條水準測量導線上點位的三種資料值相比較，得到 D-InSAR 技術所推求的垂直高度變化值與水準測量變化值及由 GPS 內插的垂直高度變化值，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，顯示乾季季節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 年期間下陷量逐年增加，且在 98 至 99 年間的下陷量明顯較前幾年大許多。

時間跨越乾季的影像對與溼季的影像對相比，確實量測到較高的下陷量，表示研究區域中地層下陷情形與季節性的變化相關，且從地下水位的資料證實，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。



## 第八章 結論及建議

合成孔徑雷達干涉技術是一項可以獲得高精度地表變形的方法，本研究以公用軟體來進行雷達差分干涉技術偵測地表變形的研究，並自行開發處理程序中的相關軟體，配合每個步驟精確的處理，可以有效產生雷達干涉的結果，並在集集地震及屏東地區的地層下陷研究中，獲得精度良好的成果。

在雷達干涉技術的處理過程中，處理方法及程序將影響結果的精度，在平坦化的處理程序中，本研究以現有的 DEM 配合雷達座標系統的轉換來進行平坦化的處理，以像元為單位的計算方式，雖然增加計算步驟及計算量，但因準確的計算至每個像元正確的影響量，使干涉的量測結果更貼近實際地形。

為有效的分析 GPS 資料及雷達差分干涉技術的量測結果，本研究完成以 GPS 變形資料模擬干涉圖的處理程序，使得 GPS 的量測的變形資料也可以在雷達座標下，呈現與雷達干涉圖條紋色彩一致結果。此同座標系統、同樣的表現方式，更易於研究者進行比較分析，也利於從變形的趨勢及地區中，掌握變化的差異，進而探討及瞭解原因。

在實際的研究工作中，地表變形的實際三維變動量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 資料內插成影像資料當約制條件，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。以此方法，可以獲得垂直方向的變動量，在地層下陷的研究中，才能進行垂直變化的評估。

為瞭解雷達干涉技術在台灣地區進行變形偵測的可行性，本研究以台中地區的集集地震及屏東平原地區的地層下陷，兩不同區域、不同變形量特性的研究進行分析。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的不相關性，使得斷層東邊地區的低相關性而無法偵測變動情形，但斷層西部因地勢較平坦變動量亦較小，因此以干涉技術可以清楚的偵測出其變化情形。InSAR 技術與 GPS 資料都具有高精度的偵測結果，兩者在本研究中具有相當的一致性，因此兩者的資

料可以有良好的互補作用。在具有 InSAR 的條件下，可以由 InSAR 技術來進行偵測，以快速獲得全面性整體的變形情形。

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變化值及由 GPS 內插的垂直高度變化值，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，顯示乾季季節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 年期間下陷量逐年增加，且在 98 至 99 年間的下陷量明顯較前幾年大許多。時間跨越乾季的影像對與溼季的影像對相比，確實量測到較高的下陷量，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季節性的影響使得地下水位升高或降低，也惟有利用 D-InSAR 才能如此有效且選用短時間間隔的觀測研究此區域整體的變形作用。

以雷達差分干涉技術偵測地表變形是一項相當重要的工具，因為衛星持續、定期的運作，可以建立長期的影像資料庫，透過有效的處理，可以掌握如地震等瞬間的地表變動，也可以偵測地層下陷等長期的地表變化。從論文的討論中可知，大氣效應對干涉處理結果的影響很大，雖然目前仍無法精確的去除大氣效應，但是有效的降低大氣的影響，是高精度的干涉處理過程中，必須加入的步驟。在以干涉技術偵測地表變形的資料處理中，利用長期的雷達影像資料庫，可以形成許多有效的干涉圖，經適當的干涉技術處理，可以建立地表變形的長期變化資料，也可以建立大氣影響的變化資料，使干涉技術偵測地表變形的研究，可以獲得更準確的變形量。

## 參考文獻

- Amelung, F., Galloway, D. L., Bell, J. W., Zebker, H. A. and Lacznia, R. J., 1999, Sensing the ups and downs of las vegas: insar reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology*, 27, 483-486.
- Bamler, R. and Hartl, P., 1998, Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14, 1-54.
- Carrasco, D., Alonso, J. and Broquetas, A., 1995, Accuracy assessment of sar interferometry using the ERS-1. *Proceedings of Igarss '95*, Florence, Italy, 781-783.
- Chang, C. C., 2000, Estimates of horizontal displacements associated with 1999 Taiwan earthquake. *Survey Review*, 35, 563-568.
- Chang, C. P., Chang, T. Y., Wang, C. T., Kuo, C. H. and Chen, K. S., 2004a, Land-surface deformation corresponding to seasonal ground-water fluctuation, determining by SAR interferometry in SW Taiwan. *Mathematics and Computers in Simulation*, 67, 351-359.
- Chang, C. P., Wang, C. T., Chang, T. Y., Chen, K. S., Liang, L. S., Pathier, E. and Angelier, J., 2004b, Application of SAR interferometry to a large thrust deformation: the 1999  $M_w = 7.6$  Chichi earthquake in central Taiwan. *Geophysical Journal International*, 159, 9-16.
- Chen, C. W. and Zebker, H. A., 2000, Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithm. *Journal of Optical Society of America A*, 17, 401-414.
- Chen, Y.-G., Chen, W.-S., Lee, J.-C., Lee, Y.-H., Lee, C.-T., Chang, H.-C. and Lo, C. H., 2001, Surface rupture of 1999 Chi-Chi Earthquake yields insights on active tectonics of central Taiwan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **91**, 977-985.
- Curlander, J. C. and McDonough, R. N., 1991, Synthetic aperture radar: Systems and Signal Processing. John Wiley & Sons, New York.

- Delacourt, C., Briole, P. and Achache, J., 1998, Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography: application to Etna. *Geophysical Research Letters*, 25, 2849-2852.
- Energy and Resources Laboratories (ERL) of Industrial Technology Research Institute (ITRI), 1998, Land subsidence monitoring with differential levelling - the coastal area of Pingtung county. Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, Taipei.
- Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F., 1999, Multibaseline InSAR DEM reconstruction: The wavelet approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37, 705-715.
- Fialko, Y., Simons, M. and Agnew, D., 2001, The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations, *Geophysical Research Letters*, 28, 3063–3066.
- Franceschetti, G., and Lanari, R., 1999, Synthetic aperture radar processing, CRC press, Boca Raton, USA.
- Fruneau, B., Pathier, E., Raymond, D., Deffontaines, B., Lee, C. T., Wang H. T., Angelier, J., Rudant, J. P. and Chang, C. P., 2001, Uplift of Tainan Tableland (SW Taiwan) revealed by SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, 28, 3071-3074.
- Funning, G. J., Parsons, B., Wright, T. J., Jackson, J. A. and Fielding, E. J., 2005, Surface displacements and source parameters of the 2003 Bam (Iran) earthquake from Envisat advanced synthetic aperture radar imagery. *Journal of Geophysical Research*, 110, B09406.
- Fujiwara, S., Rosen, P. A., Tobita, M. and Murakami, M., 1998, Crustal deformation measurements using repeat-pass JERS-1 synthetic radar interferometry near the Izu Peninsula, Japan. *Journal of Geophysical Research*, 103, 2411-2426.
- Gabriel, A. K. and Goldstein R. M., 1988, Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B. *International Journal of Remote Sensing*, 9, 857-872.

- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M. and Zebker, H. A., 1989, Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 94, 9183-9191.
- Galloway, D. L., Hudnut, K. W., Ingebritsen, S. E., Phillips, S. P., Peltzer, G., Rogez, F. and Rosen, P. A., 1998, Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, antelope valley, mojave desert, california. *Water Resources Researc*, 34, 2573-2585.
- Gens, R. and Genderen, J. L. Van, 1996, SAR interferometry - issues, techniques, applications. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1803-1835.
- Ghiglia, D. C. and Pritt, M. D., 1998, Two dimensional phase unwrapping: theory, algorithms and software, John Wiley & Sons, New York.
- Ghiglia, D. C. and Romero, L. A., 1994, Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transform and iterative methods. *Journal of the Optical Society of America A*, 11, 107-117.
- Goldstein, R. M., 1995, Atmospheric limitations to repeat-track radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 22, 2517-2520.
- Goldstein, R. M., Zebker, H. A. and Werner, C. L., 1988, Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping, *Radio Science*, 23, 713-720.
- Graham, L. C., 1974, Synthetic interferometer radar for topographic mapping. *Proceedings of the IEEE*, 62, 763-768.
- Gray, A. L. and Farrismanning, P. J., 1993, Repeat-pass interferometry with airborne synthetic aperture radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31, 180-191.
- Hanssen, R., 1998, Atmospheric heterogeneities in ERS tandem SAR interferometry. *DEOS Report No.98.1*, Delft University press, Delft, the Netherlands.
- Hanssen, R., 2001, Radar interferometry : data interpretation and error analysis. Kluwer



Academic Publishers, Boston.

- Hanssen, R. and Feijt, A., 1996, A first quantitative evaluation of atmospheric effects on SAR interferometry. *Fringe 96' workshop on ERS SAR Interferometry*, Zurich, Switzerland.
- Hoen, W., 2001, A correlation-based approach to modeling Interferometric radar observations of the Greenland ice sheet. Ph. D. Thesis, Stanford University, USA.
- Hopfield, H. S., 1971, Tropospheric effect on electromagnetically measured range: Prediction from surface weather data. *Radio Science*, 6, 357-367.
- Hu, J.-C., Angelier, J. and Yu, S. B., 1997, An interpretation of the active deformation of southern Taiwan based on numerical simulation and GPS studies. *Tectonophysics*, 274, 145-169.
- Hu, J.-C., Chu, H.-T. Hou, C.-S., Lai, T.-H., Chen, R.-F. and Nien P.-F., 2006, The contribution to tectonic subsidence by groundwater abstraction in the Pingtung area, southwestern Taiwan as determined by GPS measurements. *Quaternary International*, 147, 62-69.
- Hu, J.-C., Yu, S. B., Angelier, J. and Chu, H. T., 2001, Active deformation of Taiwan from GPS measurements and numerical simulations. *Journal of Geophysical Research*, 106, 2265-2280.
- Huang, M.-H., Hu, J.-C., Hsieh, C.-S., Ching, K.-E., Rau, R.-J., Pathier, E., Fruneau, B. and Deffontaines, 2006, A growing structure near the deformation front in SW Taiwan deduced from SAR interferometry and geodetic observation. *Journal of Geophysical Research*, 33, L12305, doi:10.1029/2005GL025.
- Janssen, V., Ge, L. L. and Rizos, C., 2004, Tropospheric corrections to SAR interferometry from **GPS** observations. *GPS Solutions*, 8, 140-151.
- Jonsson, S., Zebker, H., Segall, P. and Amelung, F., 2002, Fault slip distribution of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine earthquake, California, estimated from satellite radar and GPS

- measurements, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 1377–1389.
- Kao H. and Chen, W.-P., 2000, The Chichi earthquake sequence: active out-of-sequence thrust faulting in Taiwan. *Science*, **30**, 2346-2349.
- Lanari, R. , Fornaro, G. , Riccio, D. , Migliaccio, M. , Papathanassiou, K. P. , Moreira, J. R. , Schwäbisch, M. , Dutra, L. , Puglisi, G. , Franceschetti, G. and Coltelli, M. , 1996, Generation of digital elevation models by using SIR-C/X-SAR multifrequency two-pass interferometry: the Etna case study. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34, 1097-1115.
- Li, F. and Goldstein, R., 1990, Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28, 88-97.
- Li, Z. H., Muller, J. P. and Cross, P., 2003, Comparison of precipitable water vapor derived from radiosonde, GPS and Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer measurements. *Journal of Geophysical Research*, 108, 4651-4662.
- Li, Z. W., Ding, X. L. and Liu, G. X., 2004, Modeling atmospheric effects on insar with meteorological and continuous GPS observations: algorithms and some test results. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66, 907-917.
- Liu, G. X., Ding, X. L., Li, Z. L., Li, Z. W., Chen, Y. Q. and Yu, S. B., 2004, Pre- and co-seismic ground deformations of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, measured with SAR interferometry. *Computers & Geosciences*, 30, 333-343.
- Madsen, S. N. and Zebker, H. A., 1998, Synthetic aperture radar Interferometry : principles and applications, in *Manual of Remote Sensing. Volume 2*. John Wiley & Sons, New York.
- Madsen, S. N., Zebker, H. A. and Martin, J., 1993, Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31, 246-256.

- Massonnet, D. and Feigl, K. L., 1995, Discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferograms. *Geophysical Research Letters*, 22, 1537-1540.
- Massonnet, D. and Feigl, K. L., 1998, Radar interferometry and its application to changes in the earth surface. *Reviews of Geophysics*, 36, 441-500.
- Massonnet, D., Feigl, K., Rossi, M. and Adragna, F., 1994, Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake. *Nature*, 369, 227.
- Massonnet, D., Holzer, T. and Vadon, H., 1997, Land Subsidence Caused by the East Mesa Geothermal Field, California, Observed Using SAR Interferometry. *Geophysical Research Letters*, 24, 901-904.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragana, F., Peltzer, G., Feigl, K. and Rabaute, T., 1993, The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar Interferometry. *Nature*, 364, 138-142.
- Michel, R., Avouac, J.-P. and Taboury, J., 1999, Measuring ground displacements from SAR amplitude images: application to the Landers earthquake, *Geophysical Research Letters*, 26, 875-878.
- Mrstik, V., VanBlaricum, G., Cardillo, G. and Fennell, M., 1996, Terrain height measurement accuracy of interferometric synthetic aperture radars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34, 219-228.
- Pathier, E., Fruneau, B., Deffontaines, B., Angelier, J., Chang, C. P., Yu, S. B. and Lee, C. T., 2003, Coseismic displacements of the footwall of the Chelungpu fault caused by the 1999, Taiwan Chi-Chi earthquake from InSAR and GPS data. *Earth and Planetary Science Letters*, 212, 73-88.
- Prati, C. and Rocca, F., 1990, Limits to the resolution of elevation maps from stereo SAR Images. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 2215-2235.
- Rodriguez, E. and Martin, J. M., 1992, Theory and design of interferometric synthetic

- aperture radars. *IEE Proceedings-F*, 139, 147-159.
- Rogers, A. E. E. and Ingalls, R. P., 1969, Venus: Mapping the Surface Reflectivity by Radar Interferometry. *Science*, 165, 797-799.
- Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E. and Goldstein, R.M., 2000, Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88, 333-382.
- Rosen, P. A., Hensley, S., Zebker, H. A., Webb, F. H. and Fielding E. J., 1996, Surface deformation and coherence measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 101, 23109-23125.
- Rossi, M., Rogron, B. and Massonnet, D., 1996, JERS-1 SAR image quality and interferometric potential. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34, 824-827.
- Saastamoinen, J., 1972, Atmospheric correction for troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. *The use of artificial satellites for Geodesy, Gephys. Monogr. Ser.*, 247-251.
- Saastamoinen, J., 1973, Contributions to the theory of atmospheric refraction Part II, Refraction corrections in satellite geodesy. *Bulletin Geodesque*, 107, 13-34.
- Scharroo, R., and Visser, P, 1998, Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites, *Journal of Geophysical Research*, 103, 8113-8127.
- Seeber, G., 1993, Satellite geodesy: foundations, methods, and applications. De Gruyter, Berlin.
- Seymour, M. and Cumming, I., 1996, InSAR terrain height estimation using low-quality sparse DEMs. *Fringe 96' workshop on ERS SAR Interferometry*, Zurich, Switzerland.
- Shyu, B. H., Sieh, K., Chen, Y. G., Lee, C. T., Wang, Y., Ota, Y., Lee, J. C., Sung, Q. C., and Rubin, C., 2001, A preliminary neotectonic map of Taiwan and its implications for future

- destructive earthquakes. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 82, 1177.
- Small, D., Werner, C. L. and Nüesch, D., 1993, Baseline modelling for ERS-1 SAR interferometry. *Proceedings of Igarss '93*, Tokyo, Japan, 1204-1206.
- Small, D., Werner, C. L. and Nüesch, D., 1995, Geocoding and validation of ERS-1 InSAR derived digital elevation models. *Earsel Advances in Remote Sensing –Topography from Space*, 4, 26-39.
- Solaas, G. A., 1994, ERS-1 interferometric baseline algorithm verification. ESA Technical Report Es-Tn-Dpe-Om-Gs02.
- Suga, Y., Takeuchi, S., Oguro, Y., Chen, A. J., Ogawa, M., Konishi, T. and Yonezawa, C., 2001, Application of ERS-2/SAR data for the 1999 Taiwan earthquake. *Advances in space research*, 28, 155-163.
- Tarayre, H. and Massonnet, D., 1996, Atmospheric propagation heterogeneities revealed by ERS-1 interferometry. *Geophysical Research Letters*, 23, 989-992.
- Tesauro, M., Berardino, P., Lanari, R., Sansosti, E., Fornaro, G. and Franceschetti, G., 2000, Urban subsidence inside the city of Napoli (Italy) observed by satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 27, 1961-1964.
- Vachon, P. W., Geudtner, D., Gray, A. L. and Touzi, R., 1995, ERS-1 synthetic aperture radar repeat-pass interferometry studies: implications for Radarsat. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 21, 441-454.
- Werner, C. L., Hensley, S., Goldstein, R. M., Rosen, P. A. and Zebker, H. A., 1992, Techniques and applications of SAR interferometry for ERS-1: topographic mapping, change detection and slope measurement. *Proceedings of the First ERS-1 Symposium*, Cannes, France, 205-210.
- Williams, S., Bock, Y. and Fang, P., 1998, Integrated satellite interferometry: Tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar product.

*Journal of Geophysical Research*, 103, 27051-27068.

Wright, T. J., Parsons, B. E. and Lu, Z., 2004, Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR, *Geophysical Research Letters*, 31, L01607.

Xu, C. J., Wang, H., Ge, L. L., Yonezawa, C. and Cheng, P., 2006, InSAR tropospheric delay mitigation by GPS observations: A case study in Tokyo area. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 68, 629-638.

Yang M., Rau, R.-J., Yu, J.-Y. and Yu, T.-T., 2000, Geodetically observed surface displacements of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake. *Earth Planets Space*, 52, 403-413.

Yu, S. B., Chen, H. Y., and Kuo, L. C., 1997, Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. *Tectonophysics*, 274, 41-59.

Yu, S. B., Kuo, L. C., Hsu, Y. J., Su, H. H., Liu, C. C., Hou, C. S., Lee, J. F., Lai, T. C., Liu, C. C., Tseng, T. F., Tsai, C. S. and Shin, T. C., 2001, Preseismic deformation and coseismic displacements associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91, 995-1012.

Zebker, H. A., 2000, Studying the earth with interferometric radar. *Computing in Science & Engineering*, 23, 52-60.

Zebker, H. A. and Goldstein, R. M., 1986, Topographic mapping from interferometry synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research*, 91, 4993-4999.

Zebker, H. A., Rosen, P. A., Goldstien, R. M., Gabriel, A. and Werner, C. L., 1994a, On the derivation of co-seismic displacement fields using differential radar interferometry: the Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research – Solid Earth*, 99, 19617-19634.

Zebker, H. A., Rosen, P. A. and Hensley, S., 1997, Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic mapping. *Journal of Geophysical Research*, 102, 7547-7563.

Zebker, H. A., Rosen, P. A., Hensley, S. and Mouginis-Mark, P. J., 1996, Analysis of active lava flows on Kilauea volcano, Hawaii, using SIR-C radar correlation measurements. *Geology*, 24, 495-498.

Zebker, H. A. and Villasenor, J., 1992, Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 950-959.

Zebker, H. A., Werner, C. L., Rosen, P. A. and Hensley, S., 1994b, Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32, 823-836.



## 附錄 A 平坦化處理程式碼

利用 DEM 進行平坦化處理的方式及流程如 4.4.2 節所述，其中處理的步驟包含座標轉換、調整 DEM 影像、計算因距離差產生的相位值及從原始干涉圖中消除該相位值最後產生經平坦化處理干涉圖。因處理程序區分三個步驟，分別說明如下：

### 一、座標轉換：

本文處方式為先將 DEM 影像旋轉至與 ERS 軌道平行，再依成像原理將 DEM 座標轉換成雷達影像座標。

#### 1. 將 DEM 旋轉與 ERS 軌道平行

此轉換程式以 Matlab 語言撰寫，相關使用說明如下：

輸入影像：int16 格式的 DEM(3000×3000)。

輸入參數：旋轉角(可以從雷達的成像幾何中計算得知)。

輸出影像：dem.rot

```
fid = fopen('dem','r');
F = fread(fid,[3000,inf],'int16');
fclose(fid);
size(F)
%phi=-12.355
G=imrotate(F,-12.355,'bilinear','crop');
fid=fopen('rotate.raw','wb');
fwrite(fid,G,'int16');
fclose(fid);
```



#### 2. 將 DEM 座標轉換成雷達影像座標

此轉換程式以 C 語言撰寫，相關使用說明如下：

輸入影像：int16 格式的 DEM(3000×3000)。

輸入參數：旋轉角(可以從雷達的成像幾何中得知)。

輸出影像：radar.raw

```
/* transfer dem grid to radar coordinate */
/* dem data : 2 bytes little endian format (second order) */
```



```

#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
double PI=3.1415926535897;
int az_looks=5*2; /* ground size about 40m */
int range_looks=2;
int DIM_X=3000;
int DIM_Y=3000;
int OUT_X=3000;
int OUT_Y=3000;
double ratio=1;
int XShift=0;
double c=299792456.;
double fs=18.96e6;
double prf=1679.9;
double wavelength=0.0565647;
double h=781000;
double EARTH_RAD=6378e3;
double re=6378e3;
double v=7480;

main()
{
    FILE *fp,*ft;
    char dem[20]="rotate.raw";
    char out[20]="radar.raw";
    short data[3000];
    short data2[3000];
    int i;
    short pre_data,raw_data;
int loop_i,loop_j,m,n,previous_n,line_index;
    double rho;
    double rho0;
    double alpha,y0;
    double spacing_r=c/2/fs*range_looks;
    double spacing_a=v/prf*(re/(h+re))*az_looks;
spacing_a=v/prf*(re/(h+re))*az_looks;
    printf("\nThe slant range spacing (meters)=%f",spacing_r);
    printf("\nThe azimuth spacing (meters)=%f",spacing_a);
    printf("\nThe altitude of radar, h=%f",h);
    printf("\nThe range, y0= (default) 255000 ");
    y0=255000;
    alpha=y0/EARTH_RAD;
    rho0=sqrt((h+EARTH_RAD)*(h+EARTH_RAD)+EARTH_RAD*EARTH_RAD-2*EARTH
_RAD*(h+EARTH_RAD)*cos(alpha));
    printf("\nrho0=%f",rho0);

/*read raw data*/
    printf("\nReading DEM data ");
    if ((fp=fopen(dem,"rb")) ==NULL)

```



```

        {printf("File open error.\n");
          exit(0);
        }
/* printf("Writing output file..."); */
if ((ft=fopen(out,"wb")) ==NULL)
    {printf("Output file open error.\n");
      exit(0);
    }
printf("\nProcessing...\n");
for (loop_i=0;loop_i<DIM_Y;loop_i++)
    {
        fread(data,2,DIM_X,fp);
        /*generate radar-look-angle matrix*/
        previous_n=0;
        line_index=(int)(loop_i*40.0/spacing_a+.5);
        for(loop_j=0;loop_j<DIM_X;loop_j++)
            {
                raw_data=data[DIM_X-loop_j-1];
                alpha=(y0+loop_j*40*ratio)/EARTH_RAD;
rho=sqrt((h+EARTH_RAD)*(h+EARTH_RAD)+(EARTH_RAD+raw_data)*(EARTH_RAD
+raw_data)-2*(EARTH_RAD+raw_data)*(h+EARTH_RAD)*cos(alpha));
                n=(int)((rho-rho0)/spacing_r+.5);
                pre_data=data[DIM_X-loop_j];
                if(n > 0)
                    {
                        if (n>= DIM_X)
                            {
raw_data=pre_data+(raw_data-pre_data)*(DIM_X-previous_n)/(n-previous_n);
                                n=DIM_X-1;
                                loop_j=DIM_X;
                            }
                        m=n-previous_n;
                        if (m>0)
                            data2[n]=raw_data;
                        if (m>=2)
                            for (i=previous_n+1;i<n;i++)
data2[i]=pre_data+(raw_data-pre_data)*(i-previous_n)/m;
                                previous_n=n;
                            } /* end if n>0 */
                    } /* end loop_j */
                fwrite(data2,2,OUT_X,ft);
            }
        fclose(fp);
        fclose(ft);
        printf("Output file:radar.raw pixel= %d x %d",OUT_X,OUT_Y);
    }

```

## 二、調整 DEM 影像：

此轉換程式以 Matlab 語言撰寫，相關使用說明如下：

輸入影像：radar.raw(3000×3000)。

輸入參數：位移量(從雷達影像與 DEM 轉換影像中量測得知)。

輸出影像：good\_dem.raw

```
YShift=320;      %the offset between SAR and dem
XShift=210;      %
In_Y=3000;
In_X=3000;
Out_Y=2560;
Out_X=2700;
fid = fopen('radar.raw','r');      %the original big dem in radar coord
F = fread(fid,[In_Y,inf],'uint16');
fclose(fid);
size(F)
fid =fopen('good_dem.raw','w');
fwrite(fid,F(1+YShift:1+YShift+Out_Y-1,1+XShift:1+XShift+Out_X-1),'uint16');
fclose(fid);
```



## 三、計算因距離差所引起的相位差：

此轉換程式以 C 語言撰寫，相關使用說明如下：

輸入影像：good\_dem.raw。

輸入參數：垂直基線、平行基線。

輸出影像：interfer。

```
/* Read matrix from rotated dem transformed in radar coord */
/* (short int, 2 bytes for each elevation) */
/* and calculate radar interferogram */
```

```
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
```

```
const double PI=3.1415926535897;
const short DIM_X=2560;      /* dimension of the image */
const short DIM_Y=2700;
const short OUT_X=2560;
```

```

const short OUT_Y=2700;
const short XShift=0;
const short YShift=0;
const short RelativeV=0;
const double ratio=1;
const short az_looks=5*2;
const short range_looks=2;

char in[20]="good_dem.raw"; /* input data file name (rotated image) */
char out[20]="interfer"; /* output data file name */

/* constants not allowed to modify */
const double c=299792456.; /* speed of light */
const double fs=18.96e6; /* range sampling freq */
const double prf=1679.9;
const double wavelength=0.0565647;
const double lamda=0.0565647;
const double h=786534; /* altitude of radar */
const double EARTH_RAD=6378e3; /* radius of Earth */
const double re=6378e3; /* also, radius of Earth */
const double v=7480; /* velocity of sv */

void main(int argc,char* argv[])
{
FILE *fp,*ft;
double Bperp0,Bpar0,Bperp,Bpar,B,y0;
double BperpInc=0,BparInc=0;
short data[2560]; /* matrix to put elevation data */
float real_part; /* matrix to put real part of phase */
float img_part; /* matrix to put imaginary part of phase */
double rho,rho0;
double alpha; /* for calculation of geometric distortion */
double alpha0,theta,delta,phi,theta0; /* for calculation of phase phi */
int loop_i,loop_j; /* loop vars etc. */

double spacing_r=c/2/fs*range_looks; /* range spacing */
double spacing_a=v/prf*(re/(h+re))*az_looks+0.25;

if(argc<3){printf("usage: makeint Bperp Bpar [y0]");
exit(0);
}
if (argc==3)
{ Bperp0=atof(argv[1]);
Bpar0=atof(argv[2]);
y0=255000;
}
else
{ Bperp0=atof(argv[1]);
Bpar0=atof(argv[2]);
y0=atof(argv[3]);
}
printf("\nThe slant range spacing (meters between pixels)=%f",spacing_r);
printf("\nThe azimuth spacing (meters between pixels)=%f",spacing_a);

```

```

printf("\nBperp0=%f  Bpar0=%f",Bperp0,Bpar0);
alpha=y0/EARTH_RAD;
rho0=sqrt((h+EARTH_RAD)*(h+EARTH_RAD)+EARTH_RAD*EARTH_RAD-2*EARTH
_RAD*(h+EARTH_RAD)*cos(alpha));
rho=rho0;
theta0=acos((rho*rho+(h+re)*(h+re)-pow(re,2))/(2*rho*(h+re)));
printf("\n rho0=%f  theta0=%f degrees",rho0,theta0/PI*180);

/*read raw data*/
printf("\nReading DEM data from file %s  ",in);
if ((fp=fopen(in,"rb")) ==NULL)
{ printf("\nFile open error.\n");
  exit(0); }
if ((ft=fopen(out,"wb")) ==NULL)
{ printf("Output file open error.\n");
  exit(0); }

/*generate interferogram data*/
printf("Doing transform...\n");
alpha0=2.79060694101;
for(loop_i=0;loop_i<DIM_Y;loop_i++)
{
  Bperp=Bperp0+(loop_i-RelativeV)*BperpInc;
  Bpar=Bpar0+(loop_i-RelativeV)*BparInc;
  B=sqrt(Bperp*Bperp+Bpar*Bpar);
  fread(data,2,DIM_X,fp);
  for(loop_j=0;loop_j<DIM_X;loop_j++)
  {
    rho=spacing_r*loop_j+rho0;
    theta=acos((rho*rho+(h+re)*(h+re)-pow(re+data[loop_j],2))/(2*rho*(h+re)));
    delta=sqrt(2*rho*B*sin(alpha0-theta)+rho*rho+B*B)-rho;
    phi=4*PI*delta/lamda;
    real_part=cos(phi);
    img_part=sin(phi);
    fwrite(&real_part,4,1,ft);
    fwrite(&img_part,4,1,ft);
  }
} /* end for loop_i */
fclose(fp);fclose(ft);
printf("\nOutput file(radar interferogram):%s OUT_X=%d
OUT_Y=%d\n",&out,OUT_X,OUT_Y);
}

```

#### 四、從原始干涉圖中消除該相位值：

此轉換程式以 C 語言撰寫，相關使用說明如下：

輸入影像：i2(雷達干涉圖)、interfer(DEM 計算的相位值)。

輸出影像：diff(經平坦化處理的干涉圖)。

```
/* subtract phase of simulated img from radar interferogram */
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

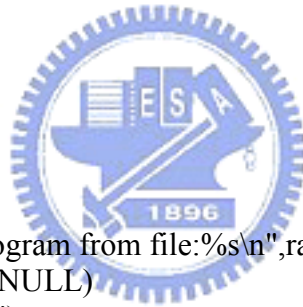
const double PI=3.1415926535897;
const short RADAR_X=2560;      /* dimensions of radar interferogram */
const short RADAR_Y=2700;
const short SIM_X=2560;       /* dimensions of simulated interferogram */
const short SIM_Y=2700;

void main(void)
{
    FILE *fp1,*fp2,*ft;

    char radar[20]="i2";
    char sim[20]="interfer";
    char output[20]="diff";
    float sim_real,sim_img;
    float r_real,r_img;
    int loop_i,loop_j;
    float t_real,t_img,t_mag;

    /* read interferogram */
    printf("Reading radar interferogram from file:%s\n",radar);
    if ((fp1=fopen(radar,"rb")) ==NULL)
        {printf("File open error.\n");
        exit(1); }
    printf("Reading dem interferogram from file:%s\n",sim);
    if ((fp2=fopen(sim,"rb")) ==NULL)
        {printf("File open error.\n");
        exit(1); }
    if ((ft=fopen(output,"wb")) ==NULL)
        printf("Output file open error.\n");

    /* subtract simulation from radar interferogram */
    printf("Calculating phase difference...\n");
    for (loop_i=0;loop_i<RADAR_X;loop_i++)
    {
        for(loop_j=0;loop_j<RADAR_Y;loop_j++)
        {
            fread(&r_real,4,1,fp1);
            fread(&r_img,4,1,fp1);
            fread(&sim_real,4,1,fp2);
            fread(&sim_img,4,1,fp2);
            t_mag=sqrt(sim_real*sim_real+sim_img*sim_img);/* mag of sim image */
            if (fabs(t_mag)<1e-8)
```



```
        t_mag=1;
        t_real=(r_real*sim_real+r_img*sim_img)/t_mag;
        t_img=(r_img*sim_real-r_real*sim_img)/t_mag;
        fwrite(&t_real,4,1,ft);
        fwrite(&t_img,4,1,ft);
    }
}

fclose(fp1); fclose(fp2);fclose(ft);
printf("\nDifference output file:%s\n",output);
}
```



## 附錄 B 座標定位計算程式

附錄 B 將本文所推導的座標定位方式，以 Matlab 程式提供參考，相關使用說明如下：

輸入影像：經全相位回復的 hgt 格式。

已知參數：程式中的已知參數為所使用的雷達系統參數，本程式內的參數數值為 ERS 影像的相關參數。

輸入參數：為每幅影像的幾何參數值，此參數值在進行干涉處理時已可從誠信幾何關係中預先求出。

輸出檔案：檔名為 hgtgeo，為 hgt 格式影像。

```
function [data] = hgt2geo(infile,width)
% Geocoding using spherical earth:

%const
% known parameters:
fs = 18960000;          % sampling frequency, Hz
veff = 7480;           % effective spacecraft velocity, m/s
lambda = 0.0565647;    % radar wavelength, m
prf = 1679.9;          % PRF, m
c = 299792456;         % speed of light, m/s
re = 6378144;          % local earth radius, m

% input parameters
y0=250712;
r0=825523.9;
phi=12.8944*pi/180;
h=786532.40;

res=80;
azlooks= 5*4;
rangelooks = 4;

%read data
fid=fopen(infile,'r');
aa=size(fread(fid));
line=aa(1)/8/width
frewind(fid);

F = fread(fid,[width*2,line],'float32');
F = F';
```



```

A=F(:,1:width);
F(:,1:width) = []; % omit amplitudes
figure
imagesc(F);
axis image;

%calculation
dr = c/(2*fs)*rangelooks; % range pixel spacing, m
daz = veff*re/(re+h)/prf*azlooks; % azimuth pixel spacing, m

for l=1:line
    for p=1:width
        a=(p*sin(phi)+l*cos(phi)*res)/daz;
        alpha=((p*cos(phi)-l*sin(phi))*res+y0)/re;
        r=(sqrt((h+re)*(h+re)+(re)*(re)-2*(re)*(h+re)*cos(alpha))-r0)/dr;
        if( a <=1)
            data(l,p)=0;
            data1(l,p)=0;
        elseif(a > line)
            data(l,p)=0;
            data1(l,p)=0;
        elseif( r < 1)
            data(l,p)=0;
            data1(l,p)=0;
        elseif( r > width)
            data(l,p)=0;
            data1(l,p)=0;
        else
            aa=floor(a);
            rr=floor(r);
            data(l,p)=(F(aa,rr)+F(aa+1,rr)+F(aa,rr+1)+F(aa+1,rr+1))/4;
            data1(l,p)=(A(aa,rr)+A(aa+1,rr)+A(aa,rr+1)+A(aa+1,rr+1))/4;
        end
    end
end

for l=1:line
    for p=1:width
        tt(l,p)=data(l,width-p+1);
        tt1(l,p)=data1(l,width-p+1);
    end
end

figure;
imagesc(data);
axis image;
fid=fopen('hgtgeo','w');
fwrite(fid,[tt1,tt'],'float32');
fclose(fid);

```



## 作者簡歷

姓名：謝嘉聲(Hsieh, Chia-Sheng)

出生日期：民國 56 年 2 月 20 日

出生地：臺灣省嘉義縣

通訊地址：桃園縣大溪鎮三元三街 14 號

電話：(03)3891141 0936184868

學歷：

博士	民國 86 年 9 月 ~ 民國 95 年 7 月	交通大學土木工程學系
碩士	民國 81 年 9 月 ~ 民國 83 年 6 月	交通大學土木工程研究所
學士	民國 75 年 9 月 ~ 民國 79 年 7 月	中正理工學院測量工程學系

經歷：

助教	民國 79 年 ~ 民國 81 年	中正理工學院測繪工程學系
講師	民國 83 年 ~ 民國 86 年	中正理工學院測繪工程學系
兼任講師	民國 88 年 ~ 民國 89 年	交通大學土木工程學系

獎勵：

當選中正理工學院八十六年優良教師
當選國防部國軍軍事院校八十六年優良教官
當選國防部九十二年國軍模範單位主官
當選國防大學中正理工學院九十四年度教育訓練楷模

## 學術著作目錄

### (A) Referred Paper

1. 謝嘉聲、史天元，1998。數據整合方法應用於 SPOT 衛星影像之分析研究，航測及遙測學刊，第三卷第三期，pp. 1-19。
2. 謝嘉聲、史天元，1999。以雷達干涉量測技術產生數值高程模型資料實作探討，地圖，第十期，pp. 69-82。
3. 趙錫民、謝嘉聲、史天元，2003。立體鏡式桌上型數位攝影測量系統之地形製圖評估，航測及遙測學刊，第八卷第二期，pp. 69-80。
4. Hsieh, C. S. and T. Y. Shih, 2006, On Error Detection Methods for Control Points in Image Registration, *Journal Chung Cheng Institute of Technology*. 34(2), pp191-207. [EI]
5. Huang, M. H., J. C. Hu, C. S. Hsieh, K. E. Ching, R. J. Rau, E. Pathier, B. Fruneau and B. Deffontaines, 2006, A Growing Structure near the Deformation Front in SW Taiwan as Deduced from SAR Interferometry and Geodetic Observation, submitted to *Geophysical Research Letters*. 33, L12305, doi:10.1029/2005GL025. [SCI]
6. Hsieh, C. S. and T. Y. Shih, 2006, The Chi-Chi Earthquake Deformation in Taiwan Detected by Synthetic Aperture Radar Interferometry and GPS data, submitted to *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO)*. 17(3), pp517-532. [SCI]

### (B) Conference Paper

1. Shih, T. Y. and C. S. Hsieh, 1997. A Comparative Study on the Techniques for Merging SPOT Panchromatic and Multispectral Image Data. Proceeding of ASPRS/ACSM 1997

- Annual Convention, (3):64-73.
2. Hsieh, C. S. and T. Y. Shih, 1998. On the Entropy Analysis of Grayscale Images, The 19<sup>th</sup> Asian Conference on Remote Sensing, Nov. 16-20, Manila, Philippines, R-11.
  3. 趙錫民、謝嘉聲、史天元，2000。以立體鏡式桌上型數位攝影測量系統製圖之評估，第 19 屆測量學術及應用研討會，彰化建國技術學院，pp. 716-725.
  4. 呂秀慧、謝嘉聲、史天元，2000。網格資料向量化作業之研究，第 19 屆測量學術及應用研討會，彰化建國技術學院，pp. 383-391.
  5. 謝嘉聲、史天元，2001。以 Doris 進行雷達干涉技術產生數值地形模型之研究，第 20 屆測量學術及應用研討會，中壢中央大學，pp.
  6. 趙錫民、史天元、陳思聖、謝嘉聲，2001。數位影像萃取語意資訊研究，第二十屆測量學術及應用研討會，中壢中央大學，論文編號 A24，pp. 191-198。
  7. 謝嘉聲、史天元，2002。以雷達干涉技術偵測地表變形之研究，第二十一屆測量學術及應用研討會，新竹交通大學，論文編號 A141，pp. 471-478。
  8. 年佩芬、謝嘉聲、胡植慶、黃孟涵，2004。利用合成孔徑雷達差分干涉技術在屏東地區地殼變形觀測之研究，九十三年度中國地質學會年會暨學術研討會，論文編號 06-P-058。
  9. Huang, M. H. J.-C. Hu and C. S. Hsieh, 2004. The application of InSAR for land subsidence in Changhua and Taichung area, Central Taiwan, 九十三年度中國地質學會年會暨學術研討會，桃園渴望園區，論文編號 06-P-059。
  10. 黃鐘、詹瑜璋、胡植慶、黃孟涵、謝嘉聲、史天元，2004。空載雷射掃描技術製成之數值高程模型在台灣中部地區構造地形分析上的應用，九十三年度中國地質學會年會暨學術研討會，桃園渴望園區，論文編號 06-P-060。
  11. Huang, M. H., J. C. Hu and C. S. Hsieh., 2004. The application of InSAR for crustal deformation and land subsidence in Taiwan, Eos Trans. AGU, 85(47), Fall Meeting Suppl., San Francisco, California, USA, Abstract T11D-1308, 13-17 December 2004

12. 黃孟涵、謝嘉聲、胡植慶、景國恩、饒瑞鈞，2005，The application of InSAR for crustal deformation in Southern Taiwan，九十四年度地球物理學會年會，論文編號 O-15。
13. Huang, M. H., J. C. Hu, C. S. Hsieh and L. Y. Chiao, 2006, The Application of InSAR and Other Geodetic Observation for Crustal Deformation Induced by Chi-Chi Earthquake, Central Taiwan: *European Geosciences Union*, Vienna, Austria, Vol. 8, 01828.

