

空載干涉雷達系統高解析度數位高程模型精度評估

王志添¹ 陳錕山² 饒見有³ 施盈萱⁴ 陳哲俊²

摘要

本文評估以空載雷達系統於台灣西南區域實施干涉雷達量測獲取高解析度雷達影像資料與數位高程資料之幾何精度。實驗區涵蓋嘉義、台南、高雄、屏東等縣市，約 3676 平方公里。資料經處理後得解析力為 1.25 公尺之正射化雷達影像及網格大小為 5 公尺之數位高程模型。經以內政部公佈基本控制測量成果資料之一、二等水準點資料共 292 點檢測干涉雷達量測高程後，發現其均方差為 1.5 公尺，系統偏差值為 0.6 公尺。誤差來源係因三角點高程為 GPS 樁位高程，雷達獲取高程為 GPS 樁位附近地表平均高程差異。經以水位深度模擬高屏溪口附近低漥地區，與 2001 年 7 月 5 日颱風後獲取之 RADARSAT-1 影像測得溢淹區域之成果與以上結論一致，說明此一高效率、高解析與高精度數位高程模型符合環境監測實務應用之需求。

關鍵字:干涉雷達、數位高程模型

1. 前言

對遙測系統開發者而言，欲滿足軍事、環境、商業應用所需大比例尺、高精度地形資料及地物製圖作業需求，為一大挑戰。數位高程資料(DEM)，係利用數位資訊紀錄地表地形高程。由於使用與攜帶均較傳統地形資料方便許多，因此獲得地形、水文、地表構造、火山運動、地質結構、土木工程及環境工程等各方面相當廣泛的使用。當然，不論於研究面或應用面，精度越高之數位高程資料越能提供使用者自由運用的空間。早期透過人工於地面測量測得之數位高程資料精度雖高，但若大面積測量時程過長，所耗費人力、物力、財力皆相當龐大，另一方面，透過空載或衛載光學遙測所測得數位高程資料，受限於飛行高度、鏡頭解析力及載具姿態，雖平面座標處理已達一定精度，但於後處理數位高程資料時，易產生精度降低、資料不穩定

的問題。為克服地面與光學遙測技術之弱點，美國國防部前瞻研究計畫局(DARPA)啟動數個前瞻技術研究(Zebker et al., 1986)，自概念設計—全功能系統至實務運轉量，最後確定解決途徑為干涉雷達(IFSAR)系統。美國陸軍測繪工程中心(Topographic Engineering Center, TEC)，被 DARPA 選為執行單位與評估單位。1992 年 4 月實行小比例尺工作 IFSAR 系統展示隨獲大量概念驗證工作(Zebker et al., 1992; Madsen et al., 1993)，所以在第一階段證明 IFSAR 的作業能量，DARPA 並贏得密西根環境研究院合約：設計與製造 IFDAR 系統。OASA 的射推進實驗室 JPL 是將實驗用的 IFSAR 系統安裝於 DC-8 飛機上又稱為 AIRSAR，並且陸續測試許多年 (Madsen et al., 1995)。JPL 提供技術支援、開發地面軟硬處理系統以處理雷達影像及數位高程資料及產生標準產品。透過干涉雷達利用電磁波干涉的原理，干涉雷達可分辨波長內的相位變化，同時整合慣性導航系統、GPS 系統與雷射陀羅儀等飛

¹ 國立中央大學太空及遙測研究中心副研究工程師

² 國立中央大學太空及遙測研究中心教授

³ 國立中央大學太空及遙測研究中心航太工程師

⁴ 國立中央大學太空科學研究所博士班研究生

收到日期:民國 93 年 09 月 07 日

修改日期:民國 94 年 09 月 16 日

接受日期:民國 94 年 09 月 19 日

航資料，進行及時運動補償(Tennant et al., 1996)，提升其高程精度至公分級(<50 cm)，因此以該系統搭配航空載具將可為一兼顧大面積資料並維持高精度水準之數位高程資料產生工具。處理程序首先將所獲取之數位表面高程資料參考影像資料以選取地面控制點，由透空地表高程點位修正不合理之點位，最後進行內插以得數位高程模型(Zhang et al., 2004)。

2003 年 12 月中央大學太空及遙測研究中心與德國 Intermap 公司以空載雷達系統於台灣西南區域實施干涉雷達量測，並於地面架設角反射器與 GPS 量測驗校以獲取高解析度雷達影像資料與數位高程資料，共計 16 個飛行航次，作業時程 5 天。本文即針對實驗所獲取之資料進行精度檢核，以確保資料提供後續應用之品質。所用之參考資料為內政部公佈基本控制測量成果資料之一、二等水準點資料共 292 點。其結果與誤差來源將作一討論。

2. 空載干涉雷達系統

干涉雷達系統系統為透過電磁波相位干涉原理進行數位高程資料的求取，其系統運作原理(Zebker et al., 1993)與架構如圖一描述，由圖中可知干涉技術即透過雙接收天線接收地面雷達回波，解算相位差以獲得高程變化資訊。此外更加上合成孔徑影像雷達觀測技術，使此雷達系統在擁有高解析度成像能力之餘，硬體設備體積依然十分輕巧。正因其體積輕巧，於航空載具的選擇上，本研究計畫選擇 Intermap 公司所使用的 X 波段干涉影像雷達系統僅需裝載於 Learjet 36 型六人座小型噴射商務飛機。為了搭載此干涉雷達系統，Learjet 36 本身進行改裝，機上座位僅剩四個，分別提供機師、副機師以及雷達操作員乘坐，其餘部分則搭載干涉雷達信號處理設備與記錄媒體，雷達本體則置於改裝過的機腹之中，其具備自由轉向功能，不侷限於單側觀測，降低執行時飛航航道限制。如表一列述 X 波段干涉雷達系統參數。(Bullock et al., 1997)

表一、干涉合成孔徑影像雷達規格

操作頻率(Operation Frequency)	9.35 - 9.75 GHz
系統頻寬(System Bandwidth)	400 MHz
脈衝重複率(Pulse Repetition Frequency)	up to 16 KHz
偏極性(Polarization)	HH
入射角(Incident Angle)	45 Degrees
掃描寬度(Swath Width)	Typically 2 km
飛行高度(Flight Attitude)	Typically 3 km to 4
最大輸出(Peak Power at Antenn)	1,700 Watts
平均輸出(Average Power at Ant)	32 Watts

經處理後，提供產品資料之數位表面模型(DSM)與數位高程模型(DEM)規格如下：

1. 地表水平方向為5公尺網格；
2. 垂直方向精確度：垂直高程誤差均方差小於50公分(坡度小於20° 地區)；
3. 水平方向精確度：水平位置誤差均方差小於2.5公尺(坡度小於20° 地區)；
4. 投影坐標系統：UTM；
5. 參考橢球體：WGS-84；
6. 資料格式：32位元浮點實數，含輔助說明資料；
7. 檔案涵蓋單位面積：7.5 經分 x 7.5 緯分。

正射化雷達圖像(ORRI)規格如下：

1. 像元大小1.25 公尺；
2. 水平方向精確度：水平位置誤差均方差小於2.5公尺(坡度小於20° 地區)；
3. 投影坐標系統：UTM；
4. 參考橢球體：WGS-84；
5. 影像資料格式：8位元整數，採GeoTIFF，含輔助說明資料；
6. 檔案涵蓋單位面積：7.5 經分 x 7.5 緯分。

於數位高度模型水值估算 (DEM Water Values)，由於雷達脈波並無法直接量測水深，水值估算依據下列幾項條件推估：

1. 若湖泊所處海拔大於400公尺，則寬度可由湖泊的淺灘處計算得知。
2. 若湖泊寬度大於40公尺之上的延伸距離可在符合的淺灘線取得。在內陸的水路，則自海灣口起算，依據海平面其開始數值為 0。
3. 小的湖泊和其他超出規格的水體皆須註記。如果



海岸線較鄰近海洋還低，海岸的高度將會是負值，修正為 0 (海平面)。

一些處於潮汐變化的地區，若自海平面起算，高度可能會相差 1 或 2 公尺。

3. 施測作業

3.1 雷達資料收集

主要規劃區域為南台灣，涵蓋台南、高雄、屏東等縣市，觀測陸地面積約 3676 平方公里，如圖二所示。前置作業共分為兩個階段，在計畫執行前針對測區陸地範圍、高度分佈、飛行計畫、飛行時程以及最終產品種類等相關細節進行討論。最後在飛行規劃上初步規劃如圖三所繪，其中南北向飛行路線為獲取資料路線共 11 航次，而東西向飛行路線為校驗檢核路線共 5 航次，此舉可確保最終產品資料上不會出現校正用定位點的影像以提高幾何定位精度。在飛行時程上，規劃作業時間為期一週，觀測時間為每日午夜至清晨，使用此時間主因此時航班較疏，國內線空中交通較不頻繁，且夜間人為無線干擾的情況亦較低。初步規劃資料收集任務經踏勘選定之 8 處角反射檢核點進行角反射器安置，另三處 GPS 基站檢核點(麻豆、屏東以及中央大學)。圖四為正射化雷達影像與行政縣界圖層(黃色線)、斷層線(紅色線)套合結果。圖五我們以屏東東港鎮興東路一帶為例，將高解析雷達影像與 SPOT 擬自然色光學影像融合，魚塢抽水設施、建物清晰可見，雷達影像更加突顯目標物，同時作物區顯現出高低植生特性，增加影像判讀性。由視覺判斷影像品質可以說很高，雜訊準位很低，這在後續製作高程資料時是相當有利的。低班駁雜訊主要則是系統使用了相當寬的頻寬(400MHz)，使得有效觀點數大為提高，同時維持一定的空間解析力。圖六則是以高雄壽山地區為例 DSM 與 DEM 影像的比較；DSM 影像保留地表雜訊如植被散射信號，經由地面點求取地表趨勢平面可由 DSM 獲得 DEM。

3.2 影像成果分析與精度檢核

在進行定量檢核前，我們先比較不同網格資料之比較。為此我們選擇高雄岡山地區數位高程模型比較。圖七(a)為空載雷達獲取之數位高程資料為 5 公尺網格，圖七(b)為農航所數位高程資料為 40 公尺網格，圖七(c)為 2000 年 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)數位高程資料為 90 公尺網格，分別代表不同量測系統、不同時期獲取與不同解析力之高程資料。顯然在由岡山左麓山頂變化可知早期農航所數位高程模型與 2000 年 SRTM 與 2003 年空載數位高程明顯改變外，由圖顯示高解析力資料於地形高程細微描述對於許多應用例如斷層帶的推斷與活動監測是相當重要的。

幾何精度由內政部地政司衛星量測中心提供基本控制測量資料，其所公佈基本控制測量資料中，總共採用 292 點一、二等水準點資料，以檢測干涉雷達量測高程，得到均方差 1.5 公尺，系統偏差值 0.6 公尺。最大誤差 9.6 公尺，該點鄰近地況詳見圖八。高程資料於檢核航次作交互補償，於坡向方面差異不大，檢視後發現主要誤差來源係因三角點高程為 GPS 樁位高程，雷達獲取高程為 GPS 樁位附近地表平均高程。圖九(a)(b)分別說明高程差與地形方位(aspect)及地形坡度(slope)的關係。由資料顯示，干涉雷達推算之 DEM 與地形關係相當微弱，除說明差異來源並非受地形影響如陰影或疊置等幾何變形外，同時也說明適當的飛行路線規劃與地面控制點的設置是資料品質確保的要件。其中最大誤差點為水準點 3200(點位坐標為 X：195525.8 m, Y：2539355.9 m, 高程 Z 為 88.7 m)，其鄰近地況植被覆蓋密佈且為縱深谷地如圖十，此變異劇烈之地況應為造成差異之主要來源。

最後分別將農航所數位高程資料(小於海平面，以藍色區域表示)(圖十一(a))與空載雷達獲取數位高程資料(小於海平面，以藍色區域表示，圖右藍色邊緣係缺高程資料)套繪於正射化雷達影像(圖十一(b))，紅色框區域為高屏溪畔低窪地區，該區為常遭溢淹區域，空載雷達所獲取數位高程資料

可清楚分辨此低窪地區。以 2001 年 7 月 5 日颱風後所獲取 RADARSAT-1 影像為例，推算之溢淹區域如圖十二(a)，同時以高解析數位高程資料作水位深度模擬高屏溪口附近低窪地區如圖十二(b)，與地面調查成果相當一致，說明高解析與高精度數位高程模型對於實務應用需求的重要性。

4. 結語

空載雷達系統於台灣西南區域實施干涉雷達量測，並於地面架設角反射器與 GPS 量測驗校，獲取高解析度雷達影像資料與數位高程資料。施測區涵蓋嘉義、台南、高雄、屏東等縣市，約 3676 平方公里。處理得解析力為 1.25 公尺之正射化雷達影像，網格大小為五公尺之數位高程模型。以內政部公佈基本控制測量成果資料中共 292 一二等水準點資料，檢測干涉雷達量測高程誤差均方差為 1.5 公尺，系統偏差值為 0.6 公尺。經檢視主要誤差來源為三角點高程為 GPS 樁位高程，雷達獲取高程為 GPS 樁位附近地表平均高程，結果十分優異。而高解析力 1.25 公尺正射雷達影像更有助於線形特徵之判釋。合成口徑雷達在臺灣地區資源調查、環境監測方面有相當良好之應用，配合現有來源之影像資料，更能提高航遙測影像應用範圍及資料之適時性與正確性。本次實驗則證明空載干涉雷達技術在地形高度之測製有相當高的精度且有高資料生產效率，加上其全天候之特性適用於台灣地區。

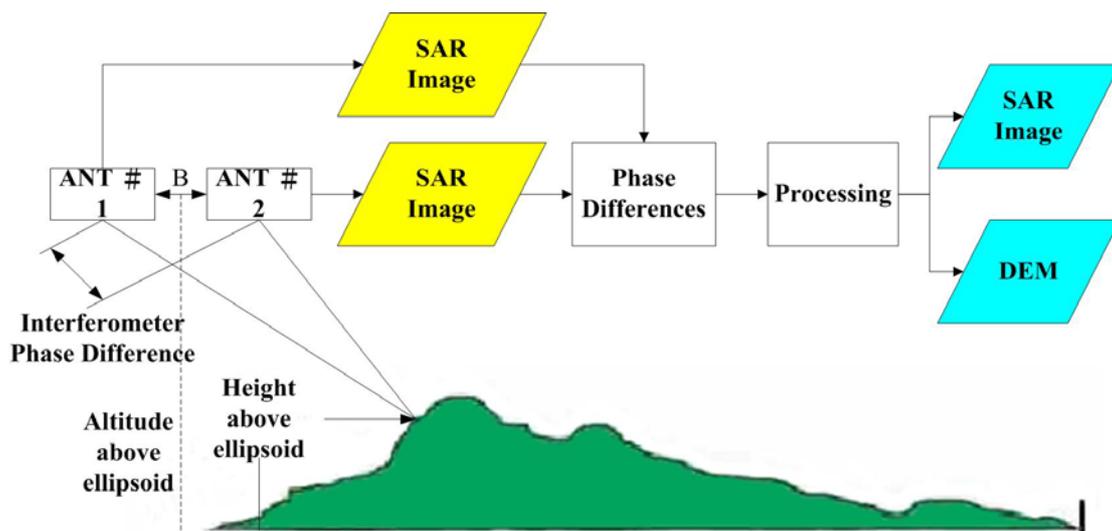
誌謝

感謝國科會研究計劃經費支持，國防部情報次長室、交通部、空軍作戰司令部、情報署、作戰署、民航局在飛航許可與安全的全面支持，華航地勤服務處於機務、通關及相關各方面的聯絡與協助，使得本次實驗順利執行。

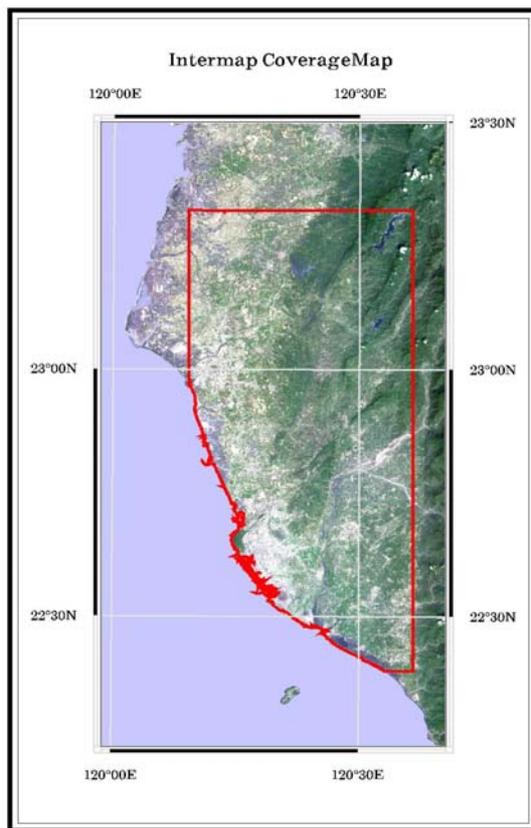
參考文獻

- Bullock, M. E., G. Lawrence, R. V. Dams and K. Tennant, 1997, Map generation utilizing IFSARE imagery and digital elevation models from the Intermap STAR-3i system, *IGARSS '97*.
- Madsen, S. N., H. A. Zebker, and J. Martin, 1993, The Topographic Mapping Using Radar Interferometry: Processing Techniques, *IEEE trans. on geosci & remote sensing*, Vol 31, No 1, pp 246-956.
- Madsen, S. N., J. Martin and H. A. Zebker, 1995, Analysis and Evaluation of the NASA/JPL TOPSAR Across-track Interferometric SAR System, *IEEE trans. on geosci & remote sensing*, Vol 33, No 2, pp 383-391.
- Tennant, J. K., T. Coyne and Z. Liu, 1996, Overview STAR-1 Synthetic Aperture Radar Navigation and Motion Compensation Upgrade, *Electrical and Computer Engineering*, Canada, on Vol 2, pp 923-926.
- Zebker, H. A. and R. M. Goldstein, 1986, Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations, *J. Geophysical Research*, Vol 91, No 5, pp. 4993-4999.
- Zebker, H. A., S. N. Madsen, J. Martin, K. B. Wheeler, T. Miller, Y. Lou, G. Alberti, S. Vetrella and A. Cucci, 1992, The TOPSAR Interferometric Radar Topographic Mapping Instrument, *IEEE trans. on geosci & remote sensing*, Vol 30, No 5, pp 933-940.
- Zhang, Yun, Vincent Tao, and Bryan Mercer, 2004, An Initial Study Automatic Reconstruction of Ground DEMs from Airborne IFSAR DSMs, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 70, No. 4, pp 427-438.



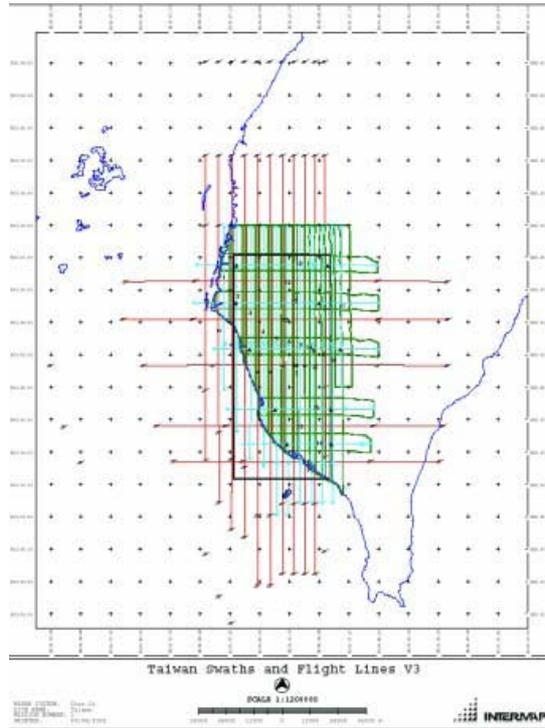


圖一、空載干涉雷達系統概念幾何示意圖

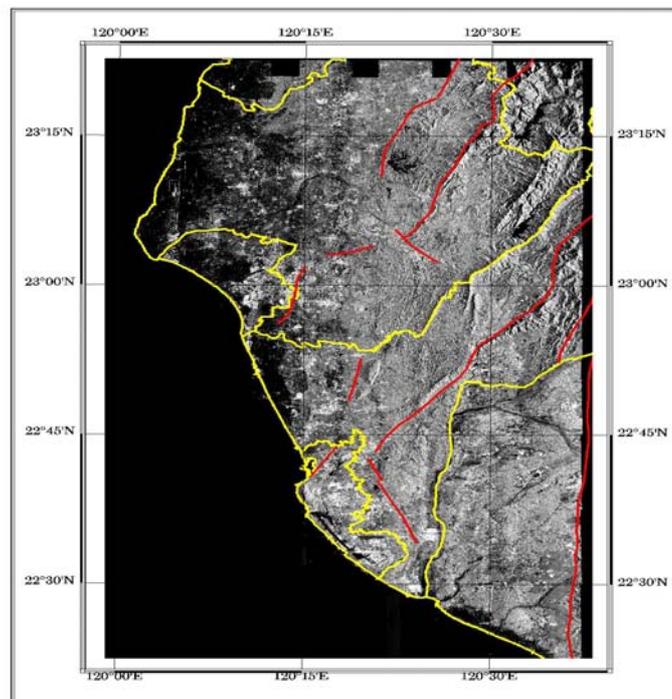


圖二、空載雷達施測區域為紅色區域範圍約 3676 平方公里，涵蓋嘉義、台南、高雄、屏東等縣市。



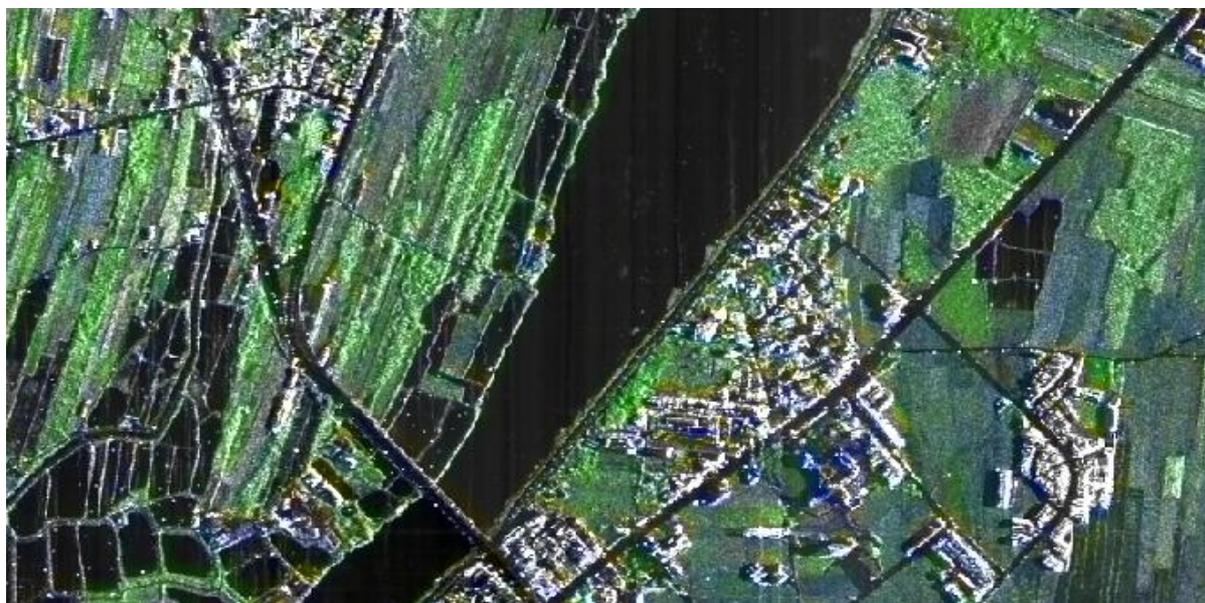


圖三、飛行路線規劃，總共 16 航次，其中南北方向為 11 航次主要獲取資料路線，東西方向為 5 航次為作為核校檢驗路線。



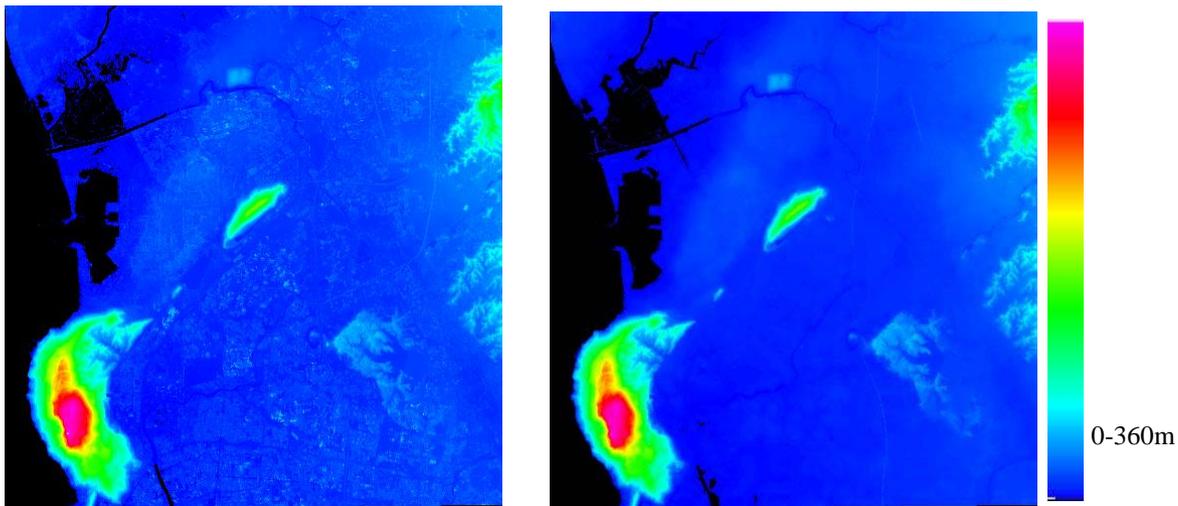
圖四、正射化雷達影像與行政縣界圖層(黃色線)、斷層線(紅色線)套合結果。



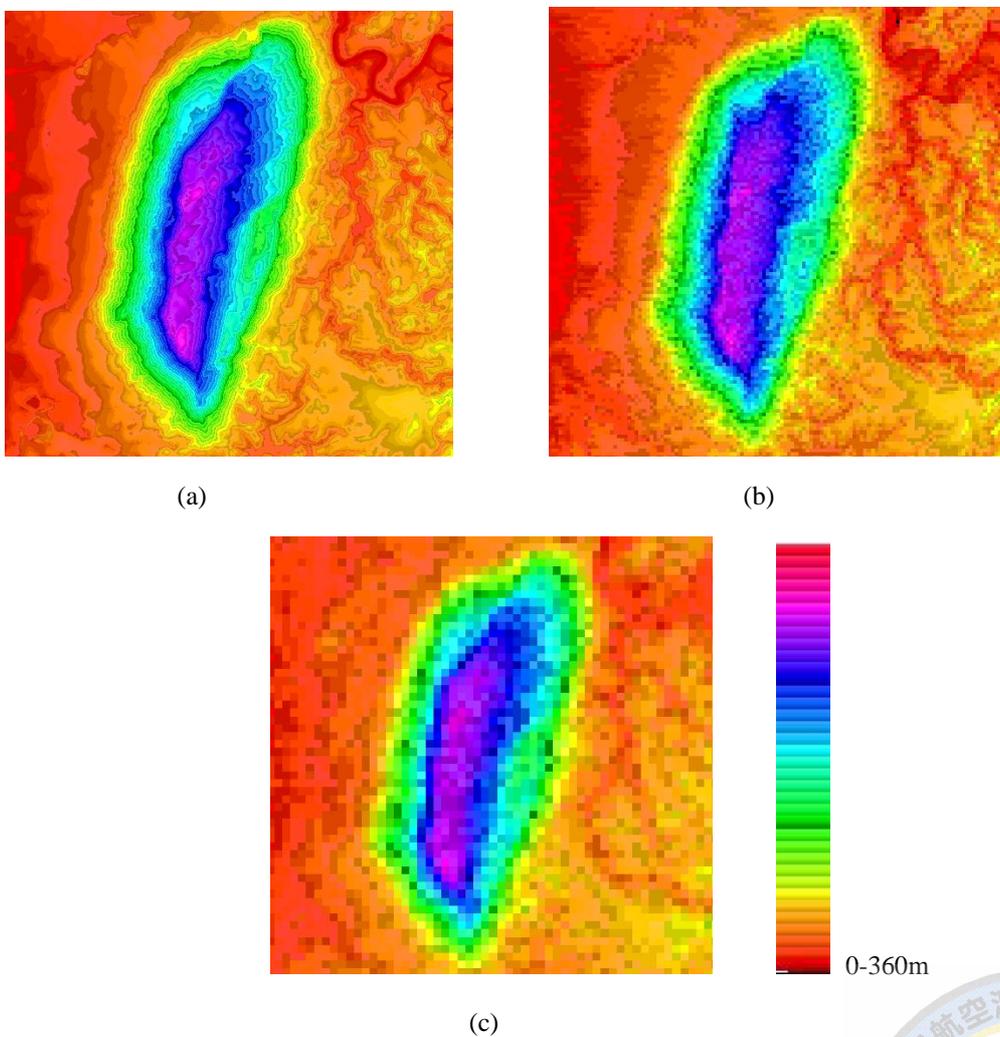


圖五 上圖為空載高解析雷達影像，屏東東港興東路一帶，解析力為 1.25 公尺；下圖為雷達影像與 SPOT 擬自然色影像融合，提昇影像判讀性。

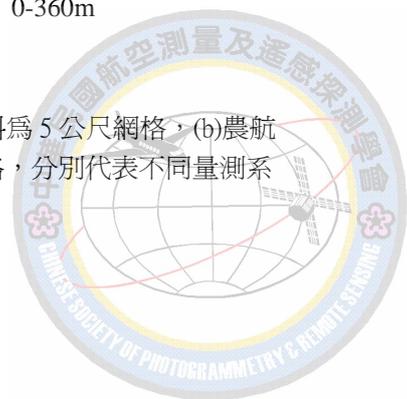


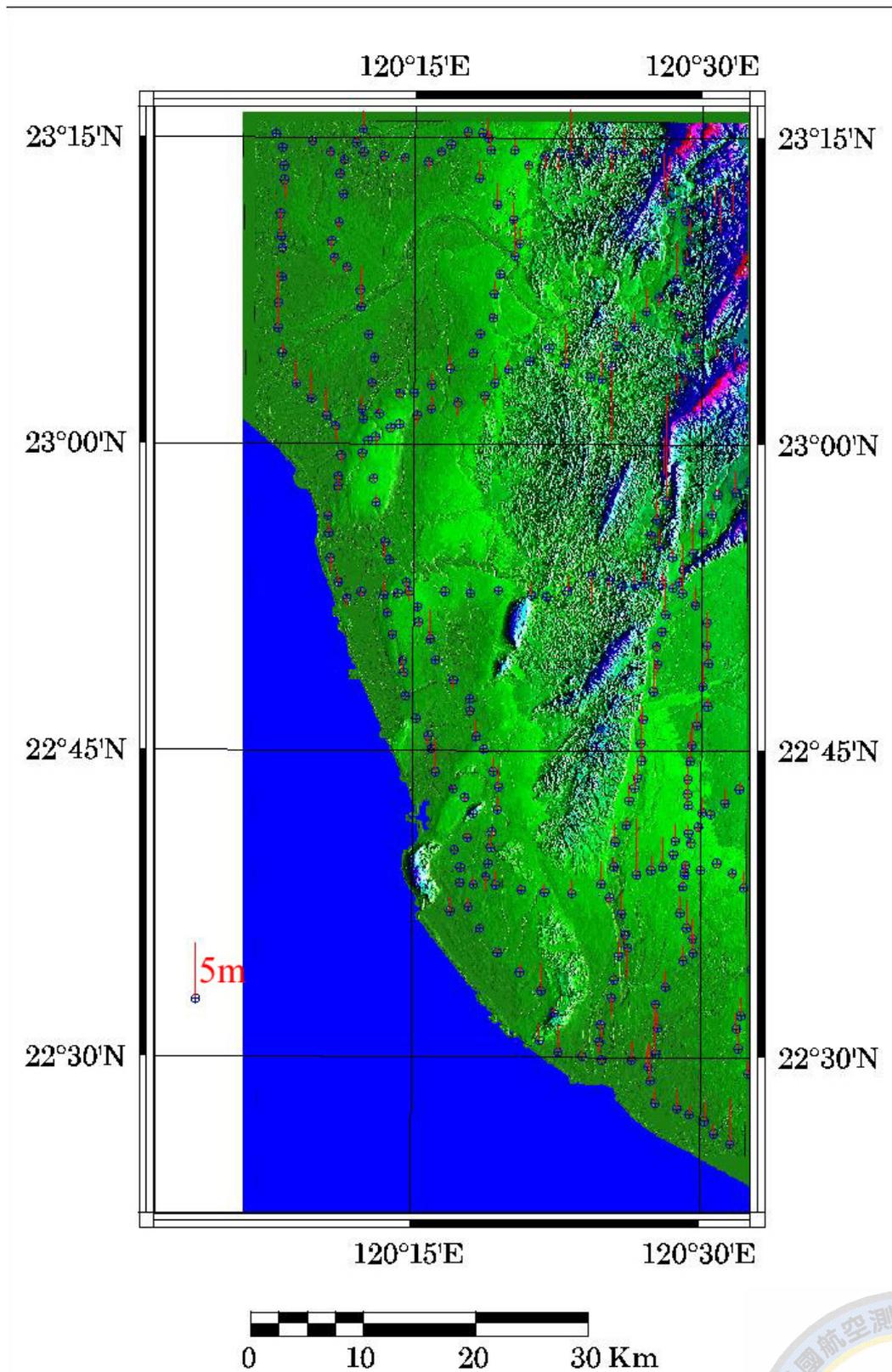


圖六 空載雷達系統以差分干涉獲取高雄壽山地區 (a)數位表面高程模型(DSM)(b)數位高程模型(DEM)。



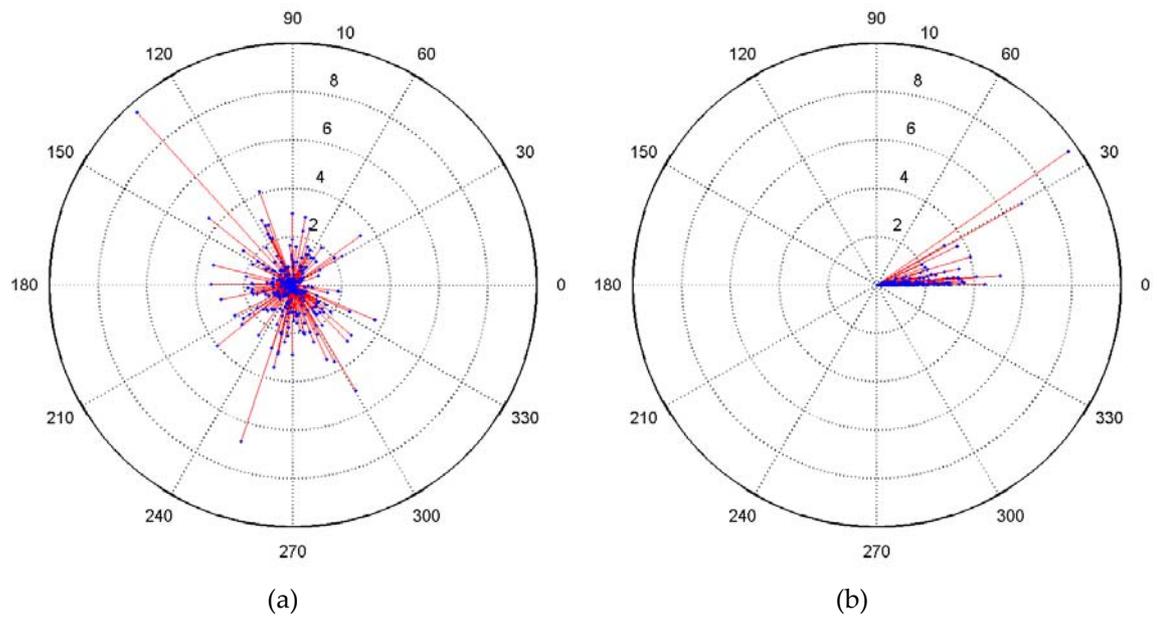
圖七 高雄岡山地區數位高程模型比較：(a)2003 年空載雷達獲取之數位高程資料為 5 公尺網格，(b)農航所數位高程資料為 40 公尺網格，(c) 2000 年 SRTM 數位高程資料為 90 公尺網格，分別代表不同量測系統、不同時期獲取與不同解析力之高程資料。





圖八 干涉雷達數位高程模型以陰影假色模擬，地形高程範圍為 0-880 公尺，涵蓋面為 3676 平方公里，藍色圈為內政部水準測點位置，紅色線段代表高程差值大小，圖例如左下角長度為 5 公尺。



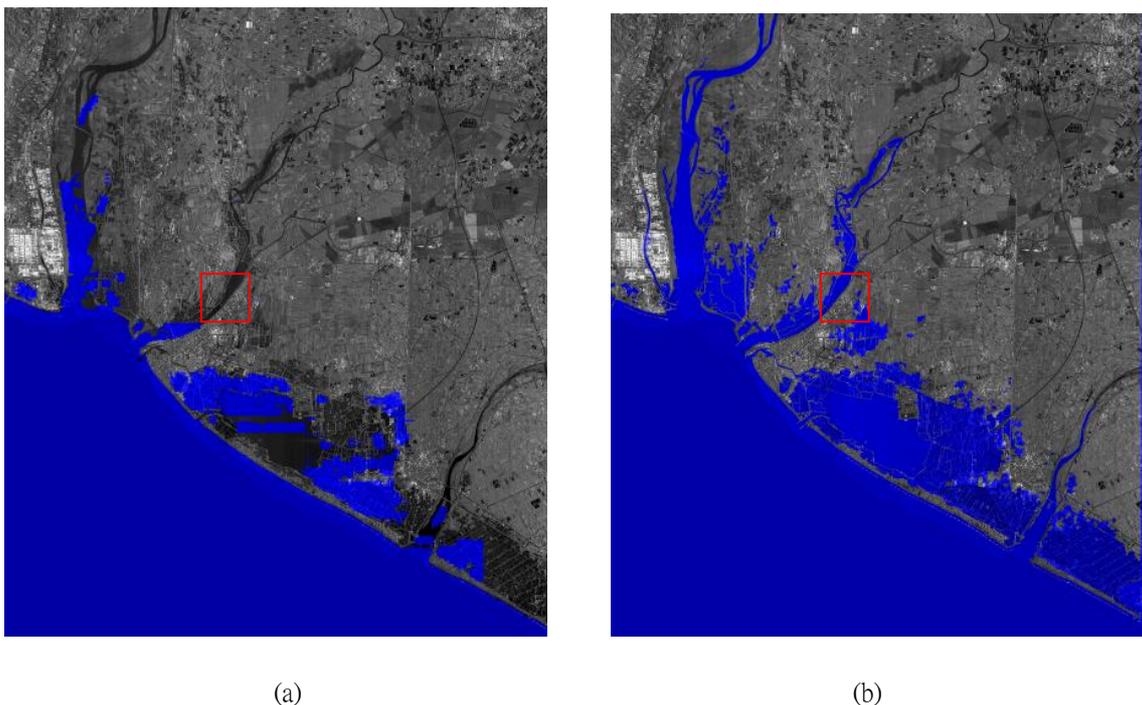


圖九 高程殘差與(a)方位、(b)坡度的關係示意圖，徑向為高程差值(單位公尺)。

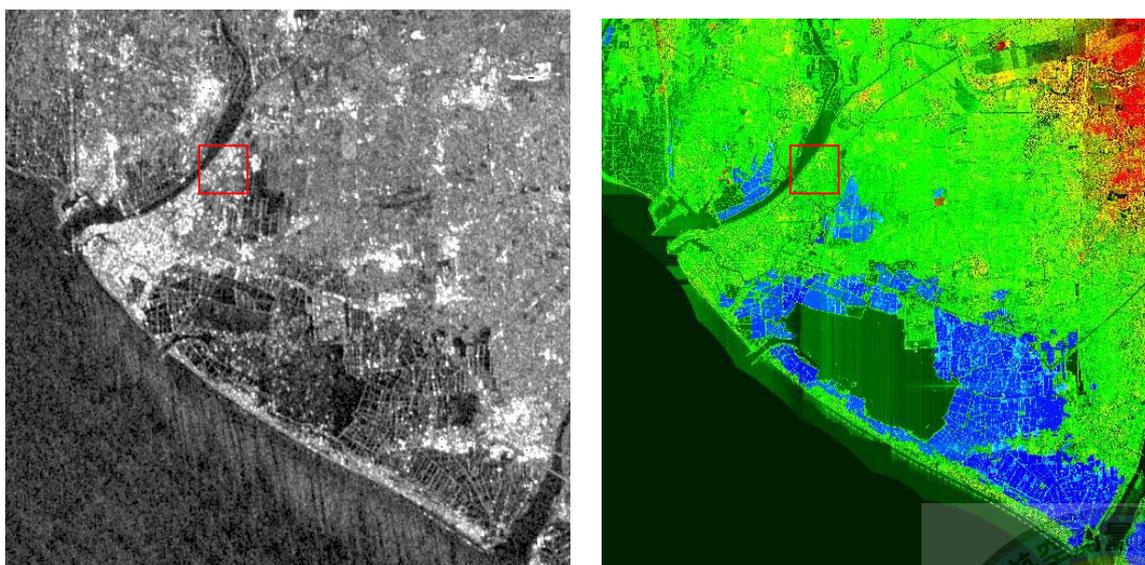


圖十 內政部地政司衛星測量中心之水準點編號 3200，點位高程為 88.68 公尺，如照片顯示該水準點鄰近地況植被覆蓋密布。

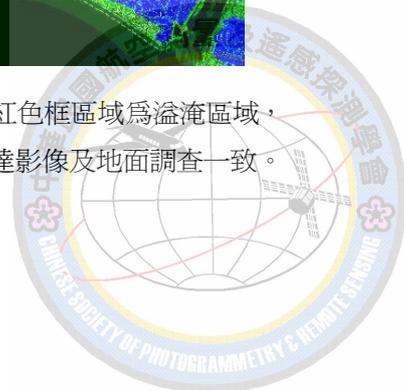




圖十一 將 (a) 農航所數位高程資料 (小於海平面, 以藍色區域表示) 與 (b) 空載雷達獲取數位高程資料 (小於海平面, 以藍色區域表示, 右邊藍色邊緣為缺高程資料所致) 套繪於正射化雷達影像, 圖中紅色框區域為高屏溪畔低窪地區, 常遭受溢淹區域, 在此空載雷達獲取數位高程資料可清楚分辨此低窪地區。



圖十二 (a) 為 RADARSAT-1 (2001/07/05, Standard 7, Ascending Mode) 颱風後影像, 紅色框區域為溢淹區域, (b) 以空載雷達獲取數位高程資料模擬, 藍色區域為低窪地區, 與 2001/07/05 雷達影像及地面調查一致。



Accuracy Assessment of High Resolution Digital Elevation Model Derived from Airborne InSAR System

C. T. Wang¹ K. S. Chen² J. Y. Rau³ Joy Shih⁴ A. J. Chen²

ABSTRACT

This paper presents accuracy assessment of InSAR derived DEM acquired by Intermap's IFSAR system. The flight area was located southwestern Taiwan covering counties of Chiayi, Tainan, Kaohsiung and Pingtung with about 3676 squared km mapping size. The output data included ortho-rectified radar image at 1.25 m resolution and digital elevation model at 5 meter posting. We compared the DEM with 292 ground control points provided by Satellite Survey Center, Department of Land Administration, MOI. It was found that the height difference standard deviation was around 1.5 m and the bias was 0.6 m. In this experiment campaign, the accuracy obtained from InSAR derived is highly acceptable for many applications. The error sources were attributed to the difference between the use of GPS point height and InSAR area (averaged over 5 squared meters) height. The relation of height difference to aspect and slope illustrated that there exist weak dependence of terrain effects. For purpose of demonstration, we overlaid the flooded area derived from RADARSAT-1 with DEM at fine and coarse resolution to illustrate the importance of high resolution DEM data in assessing the flood risk.

Key Word: Interferometric SAR, Digital Elevation Model

¹ Associate Research Engineer, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University

² Professor, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University

³ Specialist, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University

⁴ Ph. D. Student, Institute of Space Sciences, National Central University

Received Date: Sep. 07, 2004

Revised Date: Sep. 16, 2005

Accepted Date: Sep. 19, 2005

