

~~~~~  
**技術報告**  
~~~~~

台灣地區 TOPSAR 高程數據之研究
On the DEM Acquired by NASA/ JPL TOPSAR

賴子銘¹ 史天元²
Zi-Ming Lai Tian-Yuan Shih

摘 要

干涉合成孔徑雷達系統(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)擁有穿透雲霧與夜間作業的特性，可有效與以光學技術產製高程數據之作業方式互補，成為獲取大範圍數值高程數據的有利工具之一。本文簡介干涉合成孔徑雷達原理，敘述 2000 年美國 NASA/JPL 的『環太平洋全偏極合成孔徑雷達計畫』中於台灣觀測的 TOPSAR 數據，並對此一數值高程模型數據進行初步整體分析。雖然目前台灣地區已有較高精度與較高空間解析度之數值高程模型，但是 TOPSAR 為完全免費、「自由」之數據，而且其產製方式與目前產製之主要方式如空載光達或航空攝影測量原理不同。對學術探討，有重要之意義。

關鍵字：干涉合成孔徑雷達、數值高程模型

Abstract

InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) technology takes advantages of cloud penetrating capability of microwaves, being claimed as a system for all weather and day and night. It is useful in producing DEM (Digital Elevation Model) on the area where optical method is hard to be applied. In this paper, the principle of InSAR is introduced. Then the TOPSAR DEM data of Taiwan area surveyed in NASA/JPL PacRIM-II mission was also introduced and analyzed in a preliminary way. Although there are DEM products of Taiwan area with better accuracy or resolution, TOPSAR DEM is completely free, both in the sense of cost and legal restriction, and available through internet. Aside from above, it is significant in academic sense for studying the DEMs produced from INSAR technology, which is different from the primary methods such as photogrammetry or LiDAR.

Keywords: Interferometric SAR, Digital Elevation Model

¹ 英屬蓋曼群島擷適科技高級程式設計師 Senior Programmer, Getchee Inc.

² 交通大學土木工程學系教授 Professor, Department of Civil Engineering, National Chiao-Tung University

一、前言

1996 年 11 月 30 日，美國 NASA/JPL 執行『太平洋周邊國家地區實施全偏極、多波段及干涉合成孔徑雷達計畫，PACRIM』，我國由農委會、國立中央大學太空及遙測研究中心與美國太空總署共同合作(陳錕山，1999)，計畫中使用 AIRSAR 系統觀測臺灣北部、中部台中港與溪頭、南部墾丁四個區域。2000 年 9 月 27 日，NASA/JPL 再度執行後續計畫 PACRIM-II，測量地區涵蓋臺灣西部、中部、南部(Milne & Tapley, 2000)。TopSAR 為 AIRSAR 系統中之一子模式，主要目的是產生高精度高解析度

數值高程模型(DEM, Digital Elevation Model)。有關台灣地區 TOPSAR 數據之精度與誤差特性，林紀綱(2003)已有所探討，賴子銘與史天元(2006)並將 TOPSAR 成果與 SRTM 及航空攝影測量成果比對。本文之目的在敘述 PACRIM-II 計畫中台灣地區的 TOPSAR 數據，介紹「干涉合成孔徑雷達」原理，並將台灣地區 TOPSAR 高程數據進行概要之分析，以為進一步使用之參考。雖然目前台灣地區已有較高精度與較高空間解析度之數值高程模型，但是 TOPSAR 與 SRTM 為完全免費與「自由」之數據。對學術探討，有重要之意義。



圖 1：DC8 飛機外觀(JPL, 2003a)

AIRSAR 系統之載台為 DC8 飛機，其外觀如圖 1 所示，為左向側視(left-looking)雷達系統，使用三種微波波段，分別是 C 波段、L 波段及 P 波段，平均波長分別為 5.6cm、23.5cm 及 68cm，其中 C 波段與 L 波段用於干涉模式。機上雷達波發射器發射水平或垂直方向的偏極雷達波，接收器可記錄六個頻道的回訊資料，為 C、L 與 P 三個波段的水平與垂直偏極回訊(Lou, et al, 1995)。再將獲取的回訊資料以類比數位轉換器(Analog to Digital Converter)轉換成 8 位元影像資料，AIRSAR 系統也包含一個及時處理器

(real-time processor)，可處理這些頻道(channel)產生快覽影像(scrolling image)，快覽影像可以檢查雷達影像的品質，還可以確認觀測區域是否為規劃之目標區。

AIRSAR 系統配置有 GPS (Global Positioning System) 和 INS (Inertial Navigation System) 以記錄飛機觀測時的位置和姿態角。GPS 部分使用 Motorola Six-Gun GPS 接收器，具有六個頻道和穩定的時鐘，Honeywell GPS 與 INS 整合式元件(Integrated GPS and INS, IGI)，具有一個小且相當靈敏的環形雷射陀螺儀，且這個陀螺儀與

GPS 接收器整合在一起，可以進行更高精度的姿態量測。這套系統精度為 κ 角標準差 $\pm 0.02^\circ$ ， ω 角標準差 $\pm 0.01^\circ$ ， ϕ 角標準差 $\pm 0.01^\circ$ ，每個軸向的速度標準差為 $\pm 0.03\text{m/s}$ ，絕對位置標準差為 $\pm 16\text{m}$ ，需額外的處理以獲得優於 1m 的絕對位置精度(Lou, et al, 1995)。

TOPSAR 相關系統參數列於表 1，主要使用 C 波段進行干涉雷達測量產製數值高程模型。在 XT11 模式中僅使用 C 波段進行干涉雷達測量，在 XT12 模式中則用 C 波段與 L 波段進行干涉，C 波段與 L 波段對植被有不同的穿透程度，其產製之 DEM 可以協助進行植被研究，C 波段產製的 DEM 其標準差約為 1~3 公尺，L 波段約為 5~10 公尺。

相關文獻中，Madsen (1995)在美國加州與亞利桑納州中 Fort Irwin 與 Walnut Gulch 兩個實驗區所做的研究中，將 TOPSAR 數據產製之 DEM 與傳統光學立體像對產生之數據進行高

程比對，發現兩者高程差值之標準差值於平坦區為 2.2 公尺；高山區則為 5.0 公尺，Fort Irwin 實驗區包含高山與平坦地，此區高程值介於 600-1500 公尺之間，高山區巖石主要組成爲花崗岩，而 Walnut Gulch 實驗區則爲雨量少但有一長滿青草之牧場，與一些泥土岩粒組成的區域，高程值約在 1300-1600 公尺之間，由此文獻中得知 TOPSAR 數據之高程標準差值在 2.2~5.0 公尺之間，與 JPL 公佈之 1~5 公尺相符。AIRSAR 系統提供三種操作模式以供不同製圖目的使用，表 2 爲 AIRSAR 操作模式，其中全偏極指同時分別發送垂直方向與水平方向之偏極的雷達波，每一個回訊同時取得 HH 與 VV 的數據。POLARSAR 模式對水體與植被較敏感，沿軌(along track)干涉模式 ATI 則被用來量測海洋表面，這兩個模式的目的並非用來量測地形資訊(JPL, 2003c)。

表 1：TOPSAR 系統參數(Zebker, 1995)

	TOPSAR 系統參數
航高(公尺)	8000~9000
脈衝頻率(MHZ)	600
天線長(公尺)	1.6
天線寬(公尺)	0.11
基線長(公尺)	2.58
基線角(度)	62.77
距離頻寬(MHz)	40
使用波段	C, L, P
平均波長(公分)	5.6, 23.5, 68
斜距解析力(公尺)	3.75
方位解析力(公尺)	1.2
DEM 空間解析力(公尺)	5x5
觀測角度(度)	20~65
帶寬(公里)	10

表 2：AIRSAR 操作模式(JPL, 2003b)

操作模式	產生數據		
	DEM	全偏極	VV
POLSAR		波段 P, C, L	
TOPSAR XTL1	波段 C	波段 P, L	波段 C
TOPSAR XTL2	波段 C, L	波段 P	波段 C, L
ATI			波段 C, L

本文研究的 TOPSAR 以量測地表資訊為目的。為跨軌(cross-track)干涉模式，意指同時使用兩支天線接收回訊，可在一次飛航中獲取一對兩幅 SAR 影像，亦即為平行之雙軌影像，再經干涉原理由雷達影像之相位差計算高程資訊，又稱一次通過干涉(single-pass interferometry)。關於干涉合成孔徑雷達原理將於下一節詳述。所有之 AIRSAR 任務蒐集之數據均可由 JPL 之網站免費下載，其網址為：

<http://airsar.jpl.nasa.gov/cgi-bin/search.plex>

本研究所使用之數據即由此網站下載。JPL 亦提供定購之服務，以利不便於大容量線上下載之使用者。但是目前(2006 年)，線上訂購服務暫時取消。

二、干涉合成孔徑雷達原理

成像雷達(Radio Detection And Ranging)是一種主動式遙測系統，此系

統主動發射雷達波探測地物並接收回訊，由於其主動發射探測波之性質，不像光學攝影式系統被動接收太陽光的反射，因此可以夜間作業，雷達系統使用微波波段，由於長波長特性可以穿透雲霧進行觀測，可補足光學式系統於多雲霧地區無法作業之處。相對於合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)，雷達系統又稱為真實孔徑雷達。圖 2 為雷達成像幾何，其中 $V_{s/c}$ 為載台飛行方向， H 為飛行高度，在雷達成向幾何中，與一般光學系統不同之處在於方位解析度與距離解析度，每一個雷達脈衝製造出 SAR 影像上的一條線，隨著飛行方向不斷前進，掃描線亦不斷向前推進，沿著飛行方向之影像解析度稱為方位解析度，由於發射的波為扇形，因此距離航線越遠之處方位解析度越差。沿著雷達波發射方向稱為距離解析度，為脈衝頻率之函數。

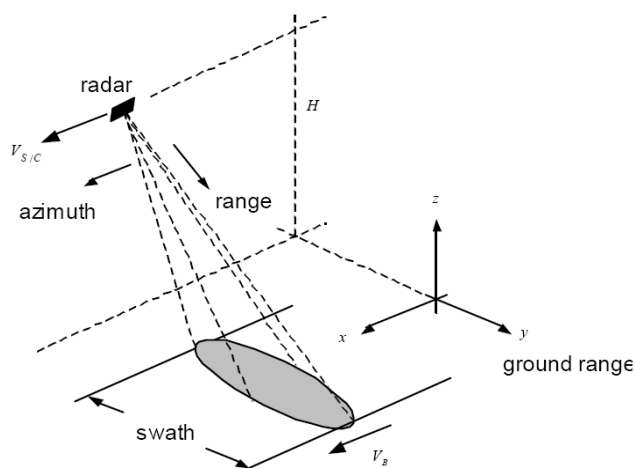


圖 2：雷達成像幾何(Bamler, 1999)

合成孔徑雷達的原理由 Wiley 於 1965 提出，著眼於真實孔徑雷達的方位解析度隨著距離而變大的缺點，合成孔徑雷達利用兩個目標點相對於雷達載具具有微小的角度差，在任一觀測時刻，它們相對於載具的相對速度會不同。因此，由這兩個目標點回來的雷達回波將有兩個明顯的都卜勒頻移量(Doppler frequency shifts)，根據此理論可將訊號合成來產生一個雷達長天線，以此改善雷達的方位解析力，使方位解析度不隨距離而變差(林紀綱，2003)。

發射的雷達波經天線接收後，經過預處理，產生單視複數影像(Single Looking Complex, SLC)，其中附帶相關飛行姿態(即空間位置和速度向量)和成像雷達的系統參數。經過預處理後的 SAR 影像每一像元的記錄包含地表回訊的振幅大小和相位資訊，並儲存成兩個參數 I 與 Q，以複數表示，如公式(1)，故稱之為複數影像：

$$f(x, y) = I(x, y) + jQ(x, y) \quad (1)$$

其強度可由以下公式計算(Mikhail et al, 2001)：

$$Magnitude = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (2)$$

合成孔徑雷達可通過空載或衛載的方式對地球表面觀測，空載 SAR 系統(如 NASA/JPL TOPSAR 系統)使用固定間距的兩個天線同時觀測，可同時獲得兩個不同觀測角度且涵蓋同一區域的 SAR 影像，稱為一次通過干涉(single-pass interferometry)。而衛載 SAR 系統多使用單天線觀測，對一個地區來說一次衛星通過只能獲得一幅 SAR 影像，衛星以一定的時間間隔和輕微的軌道偏移(相鄰兩次軌道間隔

為幾十米至 1 km 左右)重複對該地區成像以取得像對，稱為重複通過干涉(repeat-pass interferometry)(劉國祥，2000)。

干涉合成孔徑雷達系統(Interferometry Synthetic Aperture Radar, InSAR，或簡稱為 IfSAR)利用一對複數雷達影像的相位差獲取地表資訊以產製 DEM，其相位差是等比例於兩個雷達中心與地表目標點之距離差。干涉圖像由相位差產生，相位差與地表高程有高度關連性(Abdelfattah, 2002)，干涉相位的週期為 2π ，由干涉相位算取地形高程，需要求解相位未定值，稱之為相位反演(phase unwrapping)的動作，並需先移除橢球高對干涉圖像的影響量，干涉同調性影像是計算像對的常化相關係數，描述了計算高程的不確定性。

在產生干涉圖像之前，兩張 SAR 複數影像需先經過影像套合，然後第一張影像乘上另一張影像的共軛複數，同調性影像由相符的常化複數相關給予，干涉圖像表示了兩幅雷達影像的相位差，相位差與斜距差 δD 之關係如公式(3)所示：

$$\phi = K_0 * \delta R \quad (3)$$

其中 $K_0 = 2\pi/\lambda$ 為波數， λ 為波長，在一次通過系統的中為 $\delta R = \delta D$ ，在多次子中為 $\delta R = 2\delta D$ ，圖 3 為一次通過干涉成像幾何示意圖，基線是由兩個天線 A1 與 A2 形成，經過嚴密測量得到，地表高度可由公式(4)得到：

$$\sin(\theta - \alpha) = \frac{(D + \delta D)^2 - D^2 - B^2}{2DB} \quad (4)$$

$$Z(D, \theta) = H - D \cos(\theta) \quad (5)$$

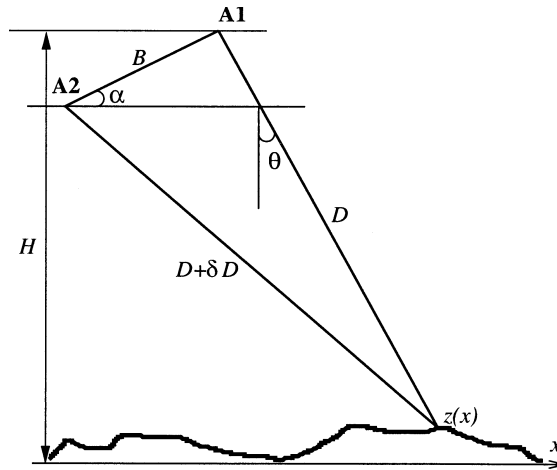


圖 3：一次通過干涉成像幾何(Abdelfattah et al, 2002)

在多次干涉幾何中，SAR 像對是由不同的飛行航線中獲取，精確的載台位置是產生干涉圖像與計算高程的要件之一，但是在取得的星曆中多半有著一些不確定性，這會對干涉幾何

造成極大的誤差，降低 SAR 像對的同調性。衛載的多次通過的系統中，好的相位高程轉換要求精確的軌道參數，穩定的太氣狀態，地表物的反射特性等。

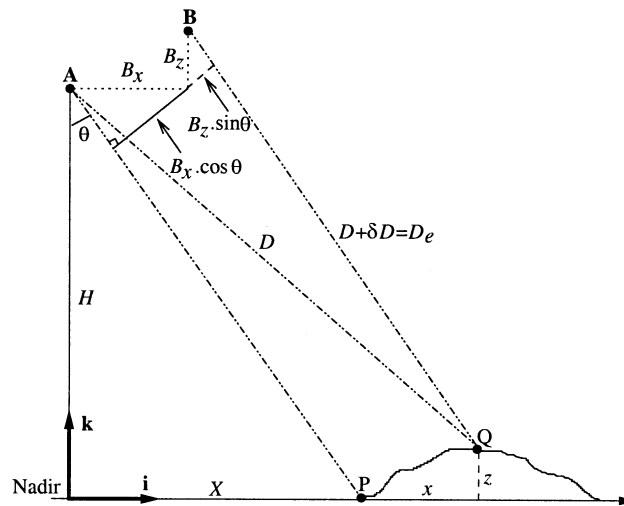


圖 4：多次通過干涉成像幾何(Abdelfattah et al, 2002)

圖 4 為多次通過干涉成像幾何，圖中航高為 H ，基線長為 B ，觀測角為 θ ， D 為斜距， δD 為兩斜距之差， z 為地表高程，基線與水平面夾角為 α ，基線的水平與高程分量 B_x 與 B_z ，

$P(X,0)$ 與 $P(X+x,z)$ 分別為在參考高度上與地表上的兩目標點。

獲取的 SAR 影像是複數格式像素組成的二維陣列，第一維是由感測器沿著飛行方向組成(方位)，第二維是由

沿著觀測方向組成(距離), 相位之關係如式(6)(Bernhard, 2003) :

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} D + \phi_{scat} + \phi_{prop} + \phi_N \quad (6)$$

其中 λ 為雷達波長(C 波段 3.1 公分, X 波段為 5.6 公分), D 感測器到地物之距離, 經地物反射後的相位漂移, $\phi_{prop1,2}$ 為經過對流層延遲的影響量, $\phi_{N1,2}$ 為雜訊影響量, 如熱雜訊與量化誤差。干涉圖像是由 SAR 像對相乘產生的相位差, 如式 (7)。

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (7)$$

以上為多次通過干涉的情況, 若為一次通過干涉, 是一個雷達波發射由另一個天線接收, 則第二頻道的相位中心為基線長的一半, 在所有公式中 $B=B/2$ 。在一次通過干涉中, 兩個天線非常相近, 經過的大氣狀況可以視為相同, 則兩者 ϕ_{prop} 與 ϕ_{scat} 項相同, 並忽略雜訊項影響, 差分後的相位方程式可簡化為

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \delta D \quad (8)$$

而相位與地表高程之關係為 $\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda D \sin \theta_1}$, 其中

$B_{\perp} = Bz \sin(\theta) + Bx \cos(\theta)$, θ_1 是主天線的觀測角度。

由上可知 λ 越小, B_{\perp} 越大則干涉越敏感, 但基線越長會導致 SAR 像對的觀測角度差異過大而減少相關性, 因此基線長度多在幾百公尺到幾公里之間。

三、台灣地區 TOPSAR 高程數據

TOPSAR 高程數據包含四個(只有 C 波段)或八個(C 與 L 波段)DEM 相關檔案, 和 1 到 12 個偏極幾何資料檔, 每一圖幅檔組成格式如表 3 所示:

表 3：TOPSAR 數據格式

DEM 數據(主要為 C 波段, L 波段不一定產生此檔)			
TS####_c.vvi2	C 波段 VV 強度影像	16bit	2.5 Mbytes
TS####.demi2	C 波段 DEM	16bit	2.5 Mbytes
TS####.corgr	相關係數圖	byte file	1.2 Mbytes
TS####.incgr	區域入射角圖	byte file	1.2 Mbytes
偏極數據			
TS####_l.datgr	L 波段偏極影像	compressed Stokes matrix	15 Mbytes
TS####_p.datgr	P 波段偏極影像	compressed Stokes matrix	15 Mbytes

其中.demi2 檔以 16bit 數值、BIL 方式儲存, 需要由以下公式換算實際橢球高:

$$H = \text{高程增量} * DN + \text{高程起始值} \quad (9)$$

高程增量與高程起始值可由檔頭參數中找到, DN 為.demi2 檔案中 16bit 數值, TOPSAR 的高程數據基準為 WGS84 EGM96 geoid 橢球高, 是以

EGM96 全球大地位模式計算全球大地起伏，EGM96 之空間解析力為 55 公里 (0.5°)，單點精度亦隨區域改變 (Lemoine et al, 1998)。與一般航空測量數據使用的正高系統所對應之大地起伏模式不同。本研究以 ENVI 軟體讀取.demi2 資料並轉出成 ASCII 格式

後續處理。由於輸出之 ASCII 格式檔案是以 BIL 方式儲存 DN，因此必須由檔頭之四個角點座標來計算每一個點之座標，作法是先將四個角點之經緯度轉成 TWD97 二度分帶之座標，並自行撰寫之 C++ 程式依照以下公式 (10)~(12) 將之轉成 ASCII XYZ 檔案。

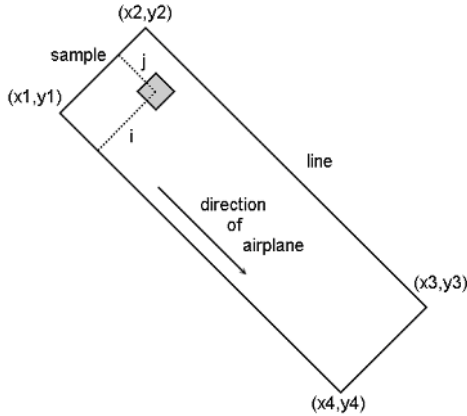


圖 5：TopSAR 高程資料 BIL 格式轉 XYZ 示意圖

$$x = x1 + i * (x2 - x1) / (sample - 1) + j * (x4 - x1) / (line - 1) \quad (10)$$

$$y = y1 + i * (y2 - y1) / (sample - 1) + j * (y4 - y1) / (line - 1) \quad (11)$$

$$z = DN * increment + offset \quad (12)$$

式子中 (x1,y1) (x2,y2) (x3,y3) (x4,y4) 為四個角點之座標，如圖 5 所示，i, j 為 BIL 格式中的位置，sample 為每條掃描線之點數，line 為掃描線之數量，increment 與 offset 為高程增量與高程起始值，並以第三角點作為檢核轉換之檢核，關係如下：

$$dx3 = x3' - x3 \quad (13)$$

$$dy3 = y3' - y3 \quad (14)$$

其中 (x3,y3) 為數據中的第三角點，與式子 (10)~(12) 算出第三角點

(x3',y3') 相減，其結果 (dx3, dy3) 作為檢核。並計算轉換後之網格大小。

台灣地區目前已有之 TOPSAR 數據共為 21 幅，包含 PACRIM 12 幅與 PACRIM-II 9 幅，整理於表四，其涵蓋範圍繪圖於圖五。PacRIM-II 的數據，根據各幅高程值分層設色，形成影像列於表 5。這些影像尚未經過地理對位，因遷就展現空間各圖之繪製比例尺亦不一致，為期最能顯現該圖之高程分佈分層設色之色彩對應亦不相同，但已可看出地形起伏情形。分層設色時，各圖均經以直方圖均衡化 (Histogram Equalization) 方式增顯。

表 4：台灣地區 TOPSAR 高程數據簡表

檔名	獲取日期	波段	解析度
Ts0259	30-NOV-96	C	10
Ts0388	30-NOV-96	C	10
Ts0530	30-NOV-96	C	10
Ts0537	30-NOV-96	C	10
TS0538	30-NOV-96	C	10
TS0539	30-NOV-96	C	10
TS0540	30-NOV-96	C	10
Ts0541	30-NOV-96	C	10
Ts0542	30-NOV-96	C	10
Ts1104	30-NOV-96	C, L	10
Ts1105	30-NOV-96	C, L	10
Ts1107	30-NOV-96	C, L	10
Ts1215	27-SEP-00	C	5
Ts1220	27-SEP-00	C	5
Ts1223	27-SEP-00	C	5
Ts1225	27-SEP-00	C	5
Ts1250	27-SEP-00	C, L	5
Ts1262	27-SEP-00	C	5
Ts1265	27-SEP-00	C, L	5
Ts1278	27-SEP-00	C	5
Ts1456	27-SEP-00	C, L	5

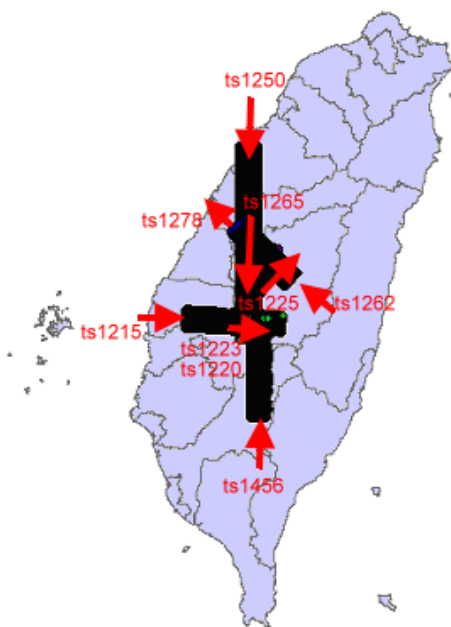


圖 6：PacRIM-II 涵蓋區域
(其中 ts1223 與 ts1220 涵蓋同一區域)

表 5：PacRIM-II TOPSAR 高程數據 DN 值影像

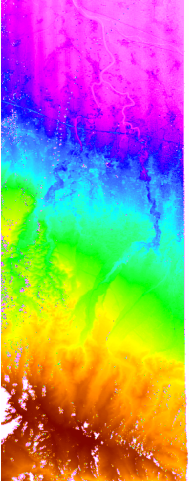
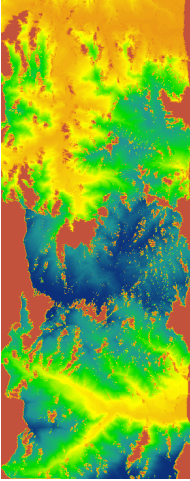
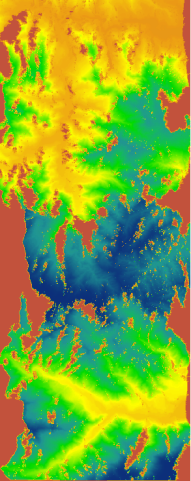
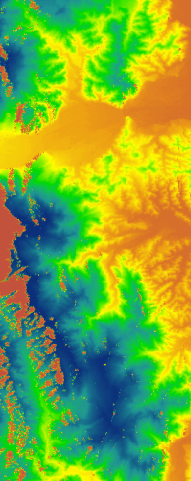
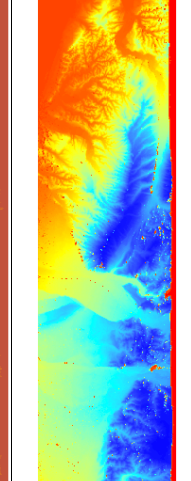
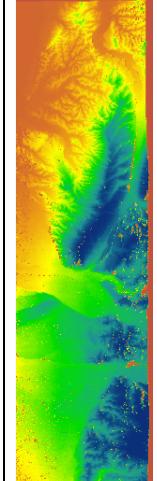
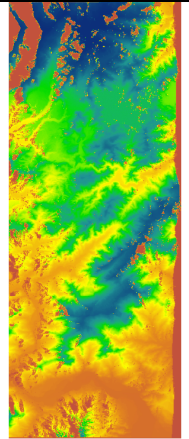
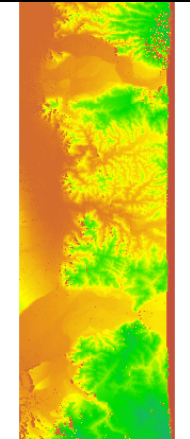
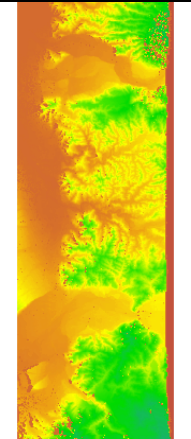
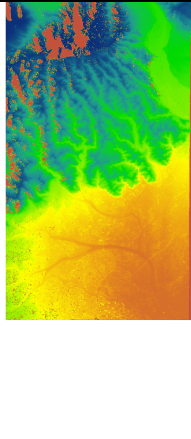
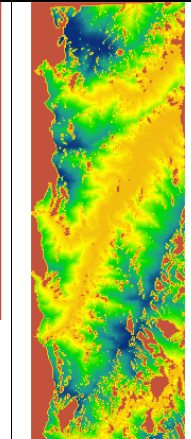
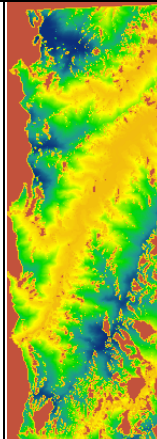
ts1215_c	ts1220_c	ts1223_c	ts1225_c	ts1250_c	ts1250_1
					
ts1262_c	ts1265_c	ts1265_1	ts1278_c	ts1456_c	ts1456_1
					

表 6：PacRIM-II 高程資料轉換成果檢核

檔名	高程最小值	高程最大值	第三角點 dx	第三角點 dy	空缺率
Ts1215	-21.10	1304.80	1.51	-0.81	7.70%
Ts1220	10.20	2863.80	0.39	0.01	19.46%
Ts1223	73.2	3168.47	-0.63	1.13	18.76%
Ts1225	-71.2	1406.15	-0.17	0.75	9.80%
Ts1250C	-73.20	867.08	0.43	-1.61	5.12%
Ts1250L	<u>-920.90</u>	<u>1082.70</u>	<u>-50.61</u>	<u>-0.39</u>	7.25%
Ts1262	-128.60	2172.37	-0.94	0.77	9.90%
Ts1265C	-124.10	2807.49	0.65	-0.47	8.42%
Ts1265L	<u>-1042.60</u>	<u>4542.847</u>	<u>-51.41</u>	<u>-0.41</u>	9.39%
Ts1278	-136.40	894.48	1.07	0.83	10.2%
Ts1456C	398.1	2898.46	0.93	-0.32	26.85%
Ts1456L	331.10	3041.34	0.34	-0.32	27.52%

本文選擇覆蓋相同區域之兩組數據 Ts1220 與 Ts1223 進行視覺比較，作為 TOPSAR 數據的初步探討，在圖 6 與圖 7 中為兩組數據之 300 公尺間距

的等高線圖，由此可以看出資料空缺的分佈情形與地勢的大致走向有關，其分佈極為相似。

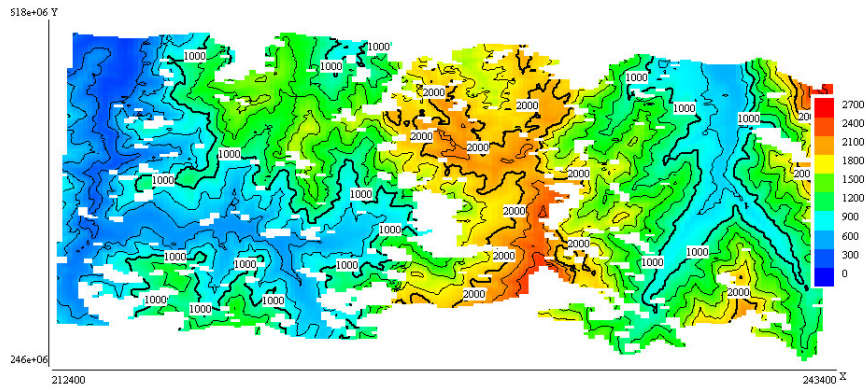


圖 6：ts1220 數據繪製等高線

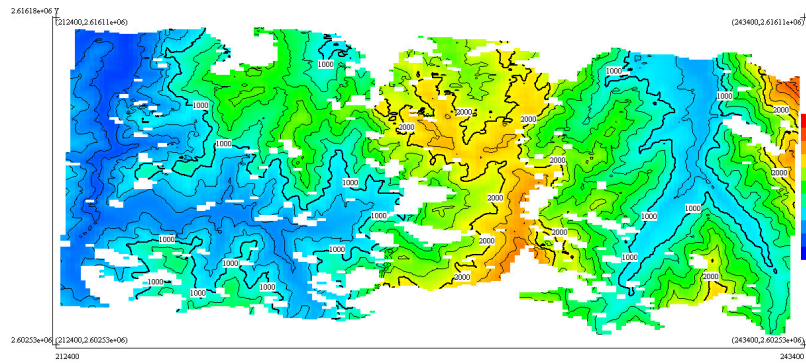


圖 7：ts1223 數據繪製等高線

從中選取位於二度分帶座標 (243355, 2616217)與(212435, 2602549)之間的區域作為測試區。測試區內的高程值約在 73.2 至 3168 公尺之間，經過 WGS84 經緯度轉 TWD97 二度分帶

轉換之後，每個高程點並非剛好為 5 公尺間距，因此將兩實驗區的高程數據經由最小曲率法重新取樣成 5 公尺間距的網格，經陰影描繪後如圖 8 所示。

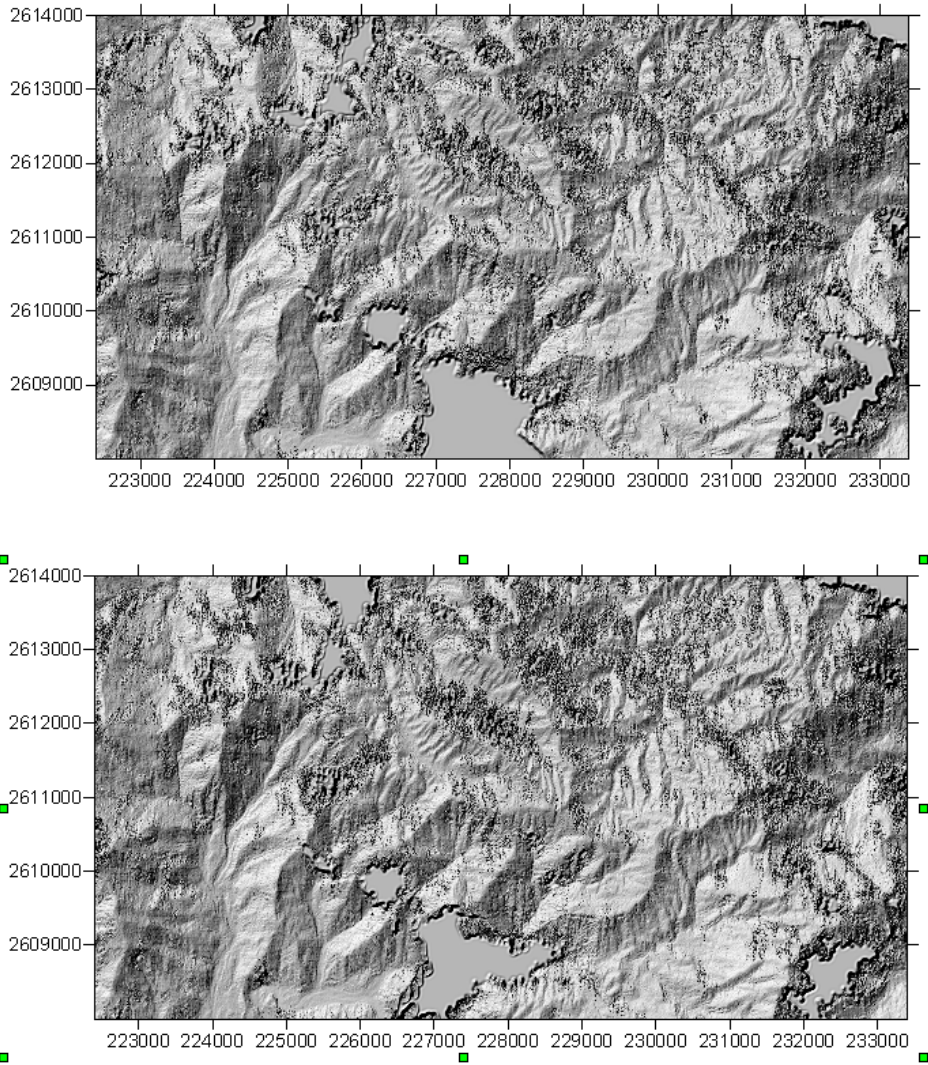


圖 8: ts1220 與 ts1223 試驗區高程數據陰影描繪圖，上圖為 ts1220，下圖為 ts1223。

計算試驗區之差值，統計後成果如表 7。差值的平均值為-10.77 公尺，最大差值為 1068.30 公尺，最小較差為 -1040.34 公尺，標準差為 63.41 公尺，與預期 TOPSAR 精度 1 公尺差異很

大，推測為空缺點沒有資料而由內插產生，導致在空缺點邊緣的較差常高達 200~300 公尺，真正誤差之估算應採取更嚴謹的方法計算，以確認 TOPSAR 數據的精度。

表 7：實驗區差值統計值(m)

	平均值	標準差	最小值	最大值	25%排序	75%排序
ts1220-ts1223	-10.77	63.41	-1040.34	1068.30	22.54	4.74

四、結語

大面積之地形測量，航空攝影測量為一主要之作業方法。自二十世紀晚期迄今，空載光達亦已發展成另一快速、高精度、高密度之作業方式。空載干涉雷達之商業化相對上規模較為有限，但是亦提供產製高程數據另一種工具。目前在北美地區，除 TOPSAR 為由官方執行作業外，商業性運作有 Intermap 與 EarthData 兩家公司，兩者產品均包含作業頻率為 X 波段者，而 EarthData 除 X 波段外，亦提供 P 波段之產品。X 波段之平面解析度包含二公尺、五公尺、十公尺之不同產品，高程精度為 0.3 至 3 公尺，平面位置精度為一至 2.5 公尺。P 波段高程精度為一至五公尺，平面位置精度為二至四公尺(NCSC, 2006)。雖然，空載干涉雷達產製之數值高程模型受地表覆蓋、地形遮蔽、特殊地表材質、之影響，其產品品質仍須更進一步驗證以評估其可用性，空載干涉雷達逐漸成熟而成為地形測量之一重要作業方式已可預見。而 TOPSAR 產製之數值高程模型，不僅就財務而言為免費，就數據之機密性與散佈而言，亦為「自由」。對於探討數值高程模型產製方法之學術性研究，與地貌變遷探討之科學性研究，均有其價值。本文針對使用 TOPSAR 數據時之轉檔問題提供一解決方案，並對其性質與數據實況為一探討，以供各界參考。

五、致謝

本研究過程承蒙服務於 JPL 之 Mr. Bruce Chapman 提供資訊、解答疑問，謹此致謝。本文撰寫過程亦承蒙國立成功大學測量及空間資訊學系蔡展榮教授指教，亦謹此致謝。本研究為國科會補助計畫「以光達、差分雷達、及空照產製數值高程模型及數值覆蓋模型研究」之一部分，研究計畫編號 93-2211-E-009-011-，亦謹此一併致謝。

六、參考文獻

- 林紀綱，2003。NASA/JPL 空載 InSAR 測定台灣地區的 DEM 成果分析。成功大學測量工程學系碩士論文。
- 劉國祥，丁曉利，陳永奇，李志林，鄭大偉，2000。極具潛力的空間對地觀測新技術—合成孔徑雷達干涉。中國科學院資源環境科學信息中心，第十五卷，2000 年，第六期。(URL:<http://159.226.136.229/cwais/DQ000620.htm>)
- 陳錕山，1999。參與美國太空總署合成孔徑雷達影像實驗-台灣地區資料獲取處理計劃(III)。八十八下半年及八十九年度農委會科技計畫期末摘要報告。農委會。
- 賴子銘、史天元，2006。SRTM/TOPSAR 高程數據比對，航測及遙測學刊，11(4):447-459。
- Abdelfattah, Riadh, Jean Marie Nicolas, 2002. Topographic SAR interferometry formulation for high-Precision DEM generation, IEEE Transactions on Ge

- oseicnece and Remote Sensing, 40(11): 2415-2426.
- Bamler, Richard, Wessling, 1999. The SRTM mission: a world-wide 30 m resolution DEM from SAR interferometry in 11 days, (Url:<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo99/bamler.pdf>)
- Bernhard Rabus, Michael Eineder, Achim Roth, Richard Bamler, 2003. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 57, 241-262.
- Lou, Yunling, Yunjin Kim, Jakob Van Zyl, 1995. The NASA/JPL airborne synthetic aperture radar system, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. (URL: http://airsar.jpl.nasa.gov/documents/genairsar/airsar_paper1.pdf)
- JPL, 2003a. AirSAR, Airborne Synthetic Aperture Radar, National Aeronautics and Space Administration (URL: <http://airsar.jpl.nasa.gov/index.html>).
- JPL, 2003b. AIRSAR integrated processor documentation data formats, National Aeronautics and Space Administration (URL: http://airsar.jpl.nasa.gov/data/data_format.pdf).
- JPL, 2003c. AIRSAR implementation, National Aeronautics and Space Administration (URL: <http://airsar.jpl.nasa.gov/documents/genairsar/chapter3.pdf>).
- Lemoine, F.G., S.C. Kenyon, J.K. Factor., R.G. Trimmer, N.K. Pavlis, D.S. Chinn, C.M. Cox, S.M. Klosko, S.B. Luthcke, M.H. Torrence, Y.M. Wang, R.G. Williamson, E.C. Pavlis, R.H. Rapp, T.R. Olson, 1998. The development of joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96, Rep. No. NASA/TP-1998-206861, National Aeronautics and Space Administration, Greenbelt, MD.
- Madsen, Soren N., Jan M. Martin, Howard A. Zebker, 1995. Analysis and evaluation of the NASA/JPL TopSAR a cross-track interferometric SAR system, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing., 33(2)383-391.
- Milne, A.K., and I. Tapley, 2000. Pacrim 2 Airsar Deployment to the Asia-Pacific region August - October 2000: Report on the data acquisition phase and early results, Asian Conference of Remote Sensing, (URL: <http://www.gisdevelopment.net/ars/acrs/2000/ts17/aima0001.asp>).
- Milkhail, Edward M., James S. Bethel, J. Chris McGlone, 2001. Introduction to modern photogrammetry, John and Wiley & Son Inc., chapter 11, 323~344.
- NCSC, 2006. IfSAR, remote sensing for coastal management, NOAA Coastal Service Center, (URL: http://www.csc.noaa.gov/crs/rs_apps/sensors/ifsar.htm).
- Zebker, Howard A., Thomas G. Farr, Ronald P. Salazar, 1995. Mapping the world's topography using radar interferometry: the TOPSAT mission, JPL, National Aeronautics and Space Administration.