

# 以 Doris 進行雷達干涉技術產生數值地形模型之 研究

The Study of DEM derived from SAR Interferometry with Doris

謝嘉聲<sup>1</sup>、史天元<sup>2</sup>

Chia-Sheng Hsieh、Tian-Yuan Shih

## 摘要

合成孔徑雷達干涉量測技術(SAR Interferometry, INSAR) 係利用雷達影像的相位(phase)值來推求地表面的空間位置，是一項可以獲得高精度數值高程模型及地表位移的方法。該項技術雖具有應用的潛力，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。

本研究以荷蘭 Delft 大學所發展的公用軟體 Doris 來進行雷達影像產生數值高程模型的研究。實驗影像採用歐洲太空總署 ERS 衛星在台灣中部地區所拍攝的雷達影像，目前實作至去除地球曲率的干涉圖。該軟體的功能相當完整，但因影像格式的不同，所以須針對差異處進行修改，才能完成所有步驟。

關鍵詞：合成孔徑雷達、數值高程模型、雷達干涉量測技術

## Abstract

Key Words : SAR, DEM, INSAR

---

<sup>1</sup> 國立交通大學土木工程系博士生

<sup>2</sup> 國立交通大學土木工程系教授

## 一、前言

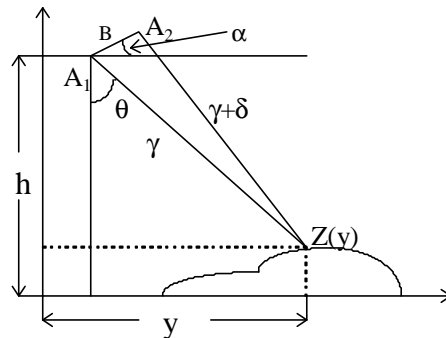
雷達干涉技術(Radar Interferometry)，利用不同時間或不同位置的雷達天線所獲得的兩幅或多幅複數影像，藉由相位值的差異量來獲取地表的三維資訊。目前主要的應用包含數值地形模型(DEM, Digital Elevation Model)的產生[Zebker et al., 1994]、地表變形量的研究等[Massonnet et al., 1993]。因為主動微波系統能全天候的蒐集地表資訊，配合相位值高精度的量測技術，因此可用以進行快速的製圖及有效的偵測地表的變形[Madsen and Feigl, 1998][Rosen et al., 2000]。

本研究以荷蘭 Delft 大學所發展的公用軟體 Doris 來進行雷達影像產生數值高程模型的研究，因為該軟體主要就是以研究獲取地表的三維資訊及地表變形而設計，且該其為一完全免費的軟體，開放軟體的程式碼供研究者使用[Kampes and Usai, 1999]。以該軟體來進行干涉的處理，除可瞭解該項技術的實用性，更可配合各種研究項目進行功能的修改，適合對雷達影像及干涉處理有興趣者使用。

因為 Doris 只能接受歐洲太空總署 ERS-1/2 衛星所獲取的雷達影像，本研究則以中大太遙中心所接收的雷達影像來進行實驗，實驗區為台灣中部地區，目前處理的進度為地球曲率修正的干涉圖。

## 二、研究方法及流程

以雷達干涉量測技術來產生地形資料的理論如圖一所示[Zebker and Goldstein, 1994]。



圖一、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 $\phi$ ，因相位差為距離差值 $\delta$ 所產生的影響；且在此發射及接收的模式中，其訊號行走之路徑差為 $2\delta$ ，故其相關式為 $\delta = \lambda\phi/4\pi$ ，由圖一的幾何關係配合三角公式的推導可得(1)

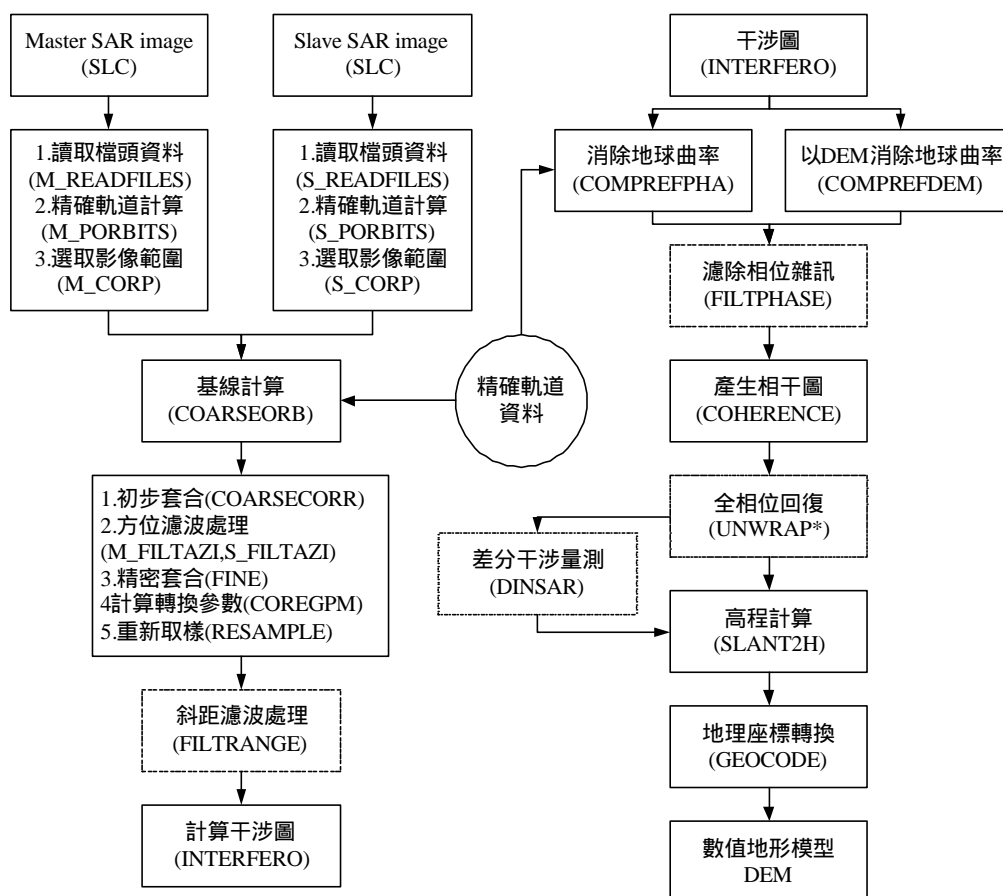
$$Z(y) = h - \frac{\left(\frac{\lambda j}{4p}\right)^2 - B^2}{2\left[B \cdot \sin(q - a) - \left(\frac{\lambda j}{4p}\right)\right]} \cdot \cos q \quad (1)$$

其中：

$Z(y)$ :	地形高度	$h$ :	衛星高度
$\lambda$ :	雷達波波長	$\phi$ :	相位差
$B$ :	基線長	$\theta$ :	視角
$\alpha$ :	傾角		

從(1)式中可知，當像對間幾何關係中的相關參數值已知，便可計算出其對應的高程值。

因為雷達的成像原理為斜距投影，與傳統的光學影像不同，其方位(azimuth)方向的位置與雷達拍攝的時間相關，斜距(range)方向的像元位置與雷達到地面間的距離有關[Rantakokko and Rosenholm,1999]。Doris 在進行處理時，將每一個步驟當成一獨立的計算模組，每一模組處理完後會有輸出檔紀錄處理的結果及數據，下一個模組在執行前會先讀取所需的參數數據，所以每一個模組都可以單獨進行測試，以瞭解其運作的情形及選擇最合適的參數值。其整體的作業流程如圖二。



圖二、Doris 作業流程圖，圖中括弧內名稱為 Doris 的模組名稱。

目前 Doris 的模組以可從一開始的 SLC 影像處理至 DEM 的結果，但中間的全相位回復(Phase Unwrapping)模組仍未完成，所以必須配合其他的軟體來完成。在整個處理模組中，其必須按照流程的順序來處理，但幾個濾波的處理，則可以選擇是否進行，這些處理可以針對不同的雜訊於以濾除，提昇處理的結果。

## 2-1 影像格式

Doris 所能處理的 SAR 影像為 ERS 1/2 SLC(Single Look Complex)的影像，儲存的格式以符合 SAR CEOS 格式的 ESA SAR.SLC 規格[Ola Grabak,1998]。

## 2-2 基線計算

基線的計算為計算影像對間的各种幾何參數值，如圖一所示，地面的高程值就必須由相關的幾何參數來計算，所以各參數的計算結果將影直接影影想成果的品質。

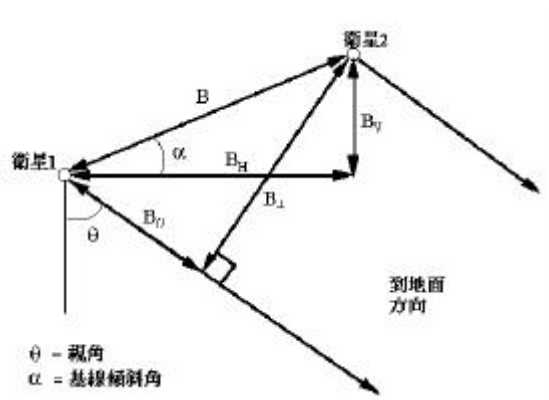
基線的計算方法：因為為重複軌道的方式，所以兩衛星軌道間的幾何位置為接近於平行的兩曲線，且基線為拍攝同一地面點時兩衛星的空間位置，依 SAR 的成像原理可知，其斜距方向與軌道方向為接近垂直之情形，其位置為兩軌道間之最短距離。如以 master 的軌道為例，選擇像中心所對應的地面點為共同點，則以此影像中心的獲取時間，配合精密軌道可以計算出衛星的瞬間位置。而在 Slave 的影像上，其共軌的衛星的空間位置為在 Slave 的軌道中，求出與前衛星軌道位置距離最短的位置，即為相對應的衛星空間座標。以此兩座標就可以計算出各種基線參數。

1. 實際的計算共軌點座標：先以 參考影像(master image)的中心點為主，求出中心點的衛星位置，再以此衛星位置，影像的座標(Line,pixel)值依 Doppler 方程式來求所對應的地面點座標。有此地面點座標後，再依 Doppler 方程式來求出所應的套合影像(Slave image)的方位時間，有此方位時間即可依精密軌道求出其衛星的空間座標。有此兩座標，就可以計算像對間的各種基線參數。

2. 經確定其兩點的座標後，其相對應的各種基線值如圖三所示。其計算式為：

$$B = \sqrt{(B_H^2 + B_V^2)} = \sqrt{(B_{\perp}^2 + B_{//}^2)}、 a = \tan^{-1}\left(\frac{B_V}{B_H}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{B_{\perp}}{B_{//}}\right) + q - \frac{p}{2}$$

$$B_H = B \cdot \cos(a)、 B_V = B \cdot \sin(a)、 B_{\perp} = B \cdot \cos(q - a)、 B_{//} = B \cdot \sin(q - a) \quad (2)$$



圖三、基線各項參數的幾何關係

### 2-3 套合處理

套合處理的目的在確定兩影像對間的空間(spatial)及光譜(spectral)的重疊區域，一般而言套合處理在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.計算干涉像對的參考影像(master image)及套合影像(slave image)位移量。2.計算預估軌道及地球的幾何關係。3.計算轉換參數。4.將套合影像轉換至參考影像坐標。

為確保套合處理能自動化且非常準確，所以將處理的部份分為三個部份，第一先以精密的軌道資料來計算兩影像間的大約位移量。計算步驟為：

- (1) 由參考的中心像元(line,pixel)計算點 P 在橢球上的座標(X,Y,Z)
- (2) 以 Doppler 方程式來計算點 P 在套合影像中的(line,pixel)。
- (3) 兩影像間的 line 及 pixel 差即為其位移量(offset)。

因為 Doppler 方程式為非線性的方程式，所以必須給予適當的起始值，該值

可以由影像檔頭內影像中心的經緯度值來計算。如果最後的結果沒有收斂，可以將兩影像以人工量取的方式來計算其大約的位移量，其精度只要在 30 個像元內即可。

第二步驟為計算兩影像的相關係數來決定其匹配的位置。該方法以不同的整數位移值來求取兩影像間的相關係數，並以最大的相關係數值所在的位移量為偏移量。該方法可以將套合的位置提昇至 1 個像元的準確度。其計算方式可以選擇在空間域的方式來計算，或將影像轉換至頻率域來計算。

雷達影像因為隨機性的斑駁，使參考影像的特徵在套合影像上未必是特徵；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，無法以一般的特徵方法來進行套合。而較常使用的方法為將兩影像中重疊區域區分為若干個網格點，每個網格點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)計算最大相關值來求區塊位移量。

第三步驟為精密的套合，該方法可將兩影像精密的套合至次像元的精度。該方法採用較大的視窗，仍然以相關係數來計算，並求出次像元的精度。在以該法來實施套合的處理前，必須確定其初始位置在幾個像元之內。

在計算出點位次像元的套合精度後，便可多項式來代表兩者間的轉換關係。計算前將相關係數值較低的點位去除，再以最小二乘法求出該轉換參數。求出轉換參數後須將套合影像依前述的多項式，予以重新取樣，經過取樣後再與參考影像進行精密套合的處理。

## 2-4 全相位回復

經地形效應糾正後之相位圖，其所對應的高程變化仍然超過  $2\pi$ ，表現在相位圖上形成一圈延著高程的等相位曲線。當我們要計算每一點的高程時，就必須加入每一相位量測中的整數波數，這個要解決實際加回多少波長( $2\pi$ )的問題，就稱為全相位回復。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。

在 doris 的軟體中，目前仍沒有全相位回復處理模組。建議在此項的處理方法可由其他的軟體來處理，Two-dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software 書中所附的軟體來進行處理。

# 三、研究成果探討

## 3.1 輸入影像資料

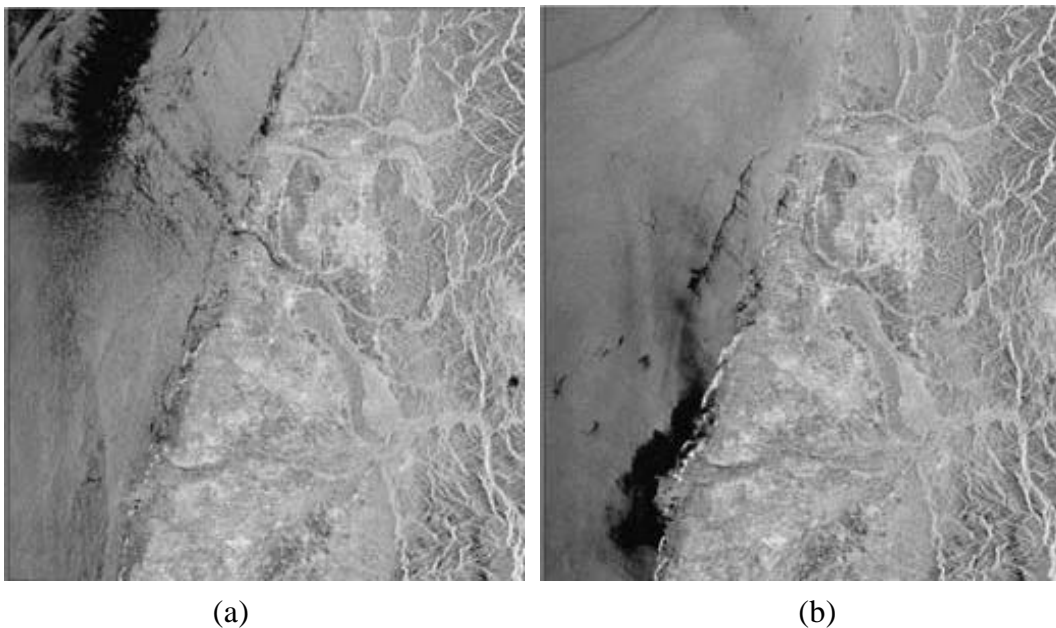
因為輸入的 SAR 影像須為 CEOS 的影像格式，且 Doris 會讀取影像的檔頭及影像的資料，因此必須具備 Image、Leader 及 Volume 等三種以上的影像資料。本研究所使用的影像為向中央大學太空及遙測中心所購買的 1996 年 3 月 6 日 ERS-1 及 1996 年 3 月 7 日 ERS-2 的 SLC(Single Look Complex)影像，影像的像元解析度為斜距方向(range)為 7.904890 m，方位方向(azimuth)為 3.947885 m。所以全幅影像的範圍為斜距方向(range)38544.243935 m，方位方向(azimuth)為 105759.885855 m。

因為中央大學太遙中心所接收的 SAR SLC 影像資料，其儲存的格式為 CCRS 的格式，雖然仍符合 CEOS 的標準，但其詳細的格式內容與 ESA 的格式有些許的不同。本研究為避免程式讀取資料錯誤，將檔頭資料予以部份更改，使其格式與 ESA 的格式相符。其中在 VOL 檔的部份，更改的項目為將第三個紀錄(records)

拿掉，只存 4 個紀錄檔。

在 Lea 檔部份，因為 ERS 的 SLC Lea 檔中包含有 SAR 影像所獲取的時間及處理的時間，根據此時間可計算其影像的空間位置，以供套合計算的起始值。實驗的影像資料 lea 檔並無此項紀錄，所以必須將此一時間加入。但因影像檔頭中無此一資料，所以僅能由其他的參數中推估，以計算的方法將此時間值加入 Lea 的檔中。

經讀取檔頭資料後，便須將影像的主體由資料檔中取出，可以選取全部的範圍，亦可選取局部的區域。經選取全幅影像，並以 Doris 軟體的工具程式來展現影像的灰值圖，如圖四所示。從圖中可以看出兩幅影像的範圍相當接近，影像所在的區域為台中、彰化一帶。



圖四、(a)1996年3月6日ERS-1影像。(b) 1996年3月7日ERS-2影像。

### 3.2 影像的基線

以 Doris 來計算之基線值，因所採用的方法為先以影像的中心來計算地面座標，而地面座標的近似值則以影像檔的中心經緯度值來計算，但因影像檔頭的格式有些不同，所以計算出來的近似值有誤，以致計算式無法收斂而產生大誤差。為解決此一問題，則由方法二來計算，所計算得之各項基線值如表一。

表一、影像對的基線資料

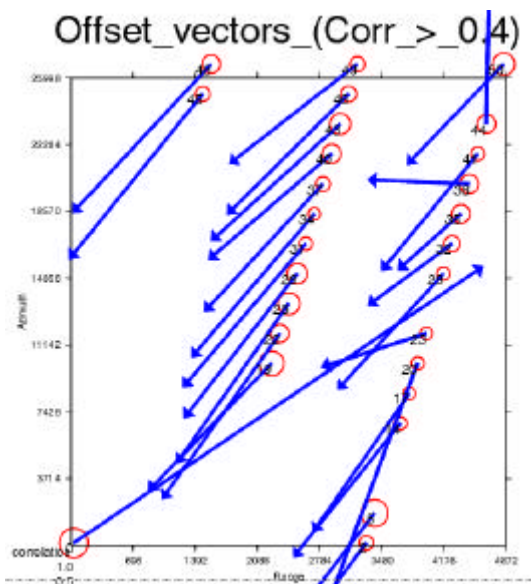
項目名稱	數值
Bperp [m]:	-58.50
Bpar [m]:	-47.12
Bh [m]:	-70.13
Bv [m]:	26.92
B [m]:	77
alpha [deg]:	159
theta [deg]:	17.68
Height_amb [m]:	-116.4
Btemp: [days]:	1

### 3.3 雷達影像套合處理

套合處理的步驟可以分成三個部份，首先大約位移量粗估的部份經計算在方位方向為-105、在斜距方向為-9 個像元。經第二步驟的影像相關計算後，修正為(-94,-6)。以此為起始值，進行精密套合的計算，得到的點位及相關係數如表二，其顯示圖形如圖五所示。

表二、套合點位的相關係數及位移量

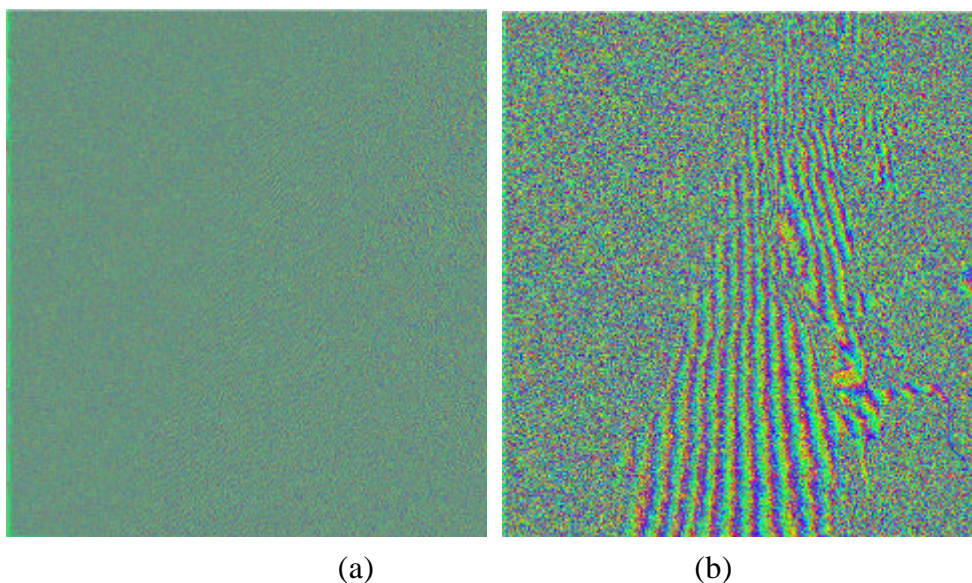
點號	line	pixel	相關係數	位移量 _L	位移量 _P
0	121	33	1	3.69	3.29
5	1788	3405	0.93	-1.63	-1.39
19	10121	2249	0.85	-1.01	-1.41
22	11787	2345	0.61	-1.39	-1.19
25	13454	2442	0.75	-1.27	-0.97
28	15121	2538	0.7	-1.02	-0.81
32	16787	4272	0.55	-0.47	0.12
35	18454	4369	0.63	-0.35	0.54
38	20121	4465	0.64	0.41	0.26
40	21787	2923	0.64	-0.35	-0.28
43	23454	3019	0.71	-0.41	-0.18
44	23454	4657	0.62	5.59	1.83
45	25120	1478	0.51	-0.47	-0.53
46	25120	3116	0.54	-0.41	0.04



圖五、影像套合處理的點位分佈、相關係數(圓圈)及位移量(箭頭)

### 3.4 產生干涉圖

所產生的干涉圖如圖六。從圖中可以明顯的看出，未經地球曲率改正的干涉圖其圖形的干涉條紋並不清楚，而在經地球曲率改正後即可看出較明確類似等高線的干涉條紋產生。



圖六、比較是否經地球曲率改正產生干涉圖之差異。(a)未經改正之干涉圖 (b)經地球曲率改正之干涉圖

## 四、結論與建議

從研究中可知，Doris 確實可以有效的進行各個模組的處理，且其說明文件亦敘述的相當清楚，非常適合雷達干涉影像的處理。但因僅讀取 ESA SLC SAR 的影像格式，與我們較易獲得的中大影像 CCRS 格式有些不同，造成處理上的困難。但因所有的程式碼都公開，所以只要能確實瞭每一個步驟處理的細節，便可以更改參數的方式來解決此一問題。

## 五、誌謝

本研究所使用的處理軟體 Doris 及其工具程式係由 Delft 大學(Delft University of Technology)DEOS(Delft Institute for Earth-Oriented Space Research)研究中心所提供之免費公用軟體。並感謝該中心所提供之精確衛星軌道。

## 參考文獻

- Kampes, B., and Usai, S. (1999). Doris: the Delft Object-oriented Radar Interferometric Software, Proceedings ITC 2<sup>nd</sup> ORS symposium, Netherlands.
- Leberl, F. W. (1990). Radargrammetric image processing, Artech House, Norwood.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. and Rabaute, T. (1993) The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, Nature, Vol. 364, pp. 138-142.
- Massonnet, D. and Feigl, K.L. (1998). Radar Interferometry and its application to changes in the earth's surface. Reviews of Geophysics. 36(4). pp.441-500.
- Ola Grabak. (1998). *ERS SAR.SLC CCT and EXABYTE*, ESA, ER-IS-EPO-GS-5902.3
- Rantakokko, H, and Rosenholm, D. (1999). Rectification of Slant Range Imagery Through a Direct Image to Ground Relationship, Photogrammetric Record, Vol. 16, No. 94, pp. 685-694.
- Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodriguez, E., Goldstein, R.M., 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry. Proceeding of the IEEE. 88(3). pp333-382.
- Zebker, H.A., Farr, T.G., Salazar, R.P., and Dixon, T.H. (1994). Mapping the world's topography using radar interferometry: the TOPSAT mission, IEEE Proceedings, Vol. 82, No. 12, pp 1774-1786.