

굴 양식장에서의 SAR 영상 및 간섭위상 특성

김상완 · 이창욱 · 원중선
연세대학교 지구시스템과학과

Characteristics of the SAR Images and Interferometric Phase over Oyster Sea Farming Site

Sang-Wan Kim, Chang-Wook Lee, and Joong-Sun Won

Department of Earth System Sciences, Yonsei University

Abstract : We carried out studies on SAR image intensity and interferometric phase over oyster sea farms. Strong backscattering was observed in amplitude images, and that was considered as a radar signal double bouncing from horizontal bars. These sea farming structures are not visible in satellite optical images except IKONOS image, so that it demonstrates the value of radar remote sensing as an effective tool in support of sea farm detection. The intensity of the image is sensitive to system parameters including wavelength, polarization, and look direction, but does not correlate to tide height. We found that the strongest backscattering can be obtained by L-band HH-polarization with a look direction perpendicular to the horizontal bar. We also succeeded in generating 21 coherent JERS-1 SAR interferometric pairs over the oyster farms. The general trend of the fringe rate of the interferometric phases appeared to be governed by altitude of ambiguity. The general trend was modeled by an inverse function and removed to have a residual phase. The residual phase showed a linear relation with the tide height. The results demonstrate for the first time that SAR can possibly be used to estimate sea level. However, the r.m.s. error of a regression line is 11.7 cm, and that is so far too large to make reliable assessments of sea level in practical applications. Further studies is required to improve the accuracy specifically using multi-polarization SAR data.

Key Words : SAR interferometry, Tide Height, Oyster Sea Farms, JERS-1 SAR, Image Intensity.

요약 : 굴 양식장 및 주변해역에서 얻어진 SAR 자료의 반사강도 및 레이더 간섭위상에 대한 분석을 실시하였다. 진폭영상에서는 매우 강한 역산란 현상이 관측되었으며, 이는 수평막대에 의한 이차산란(double bounce) 신호에 의한 것으로 해석된다. 굴 양식장 구조물은 IKONOS와 같은 고해상도 광학영상 외에는 관측 할 수 없으며, 이는 레이더 영상의 활용이 매우 유용하다는 것을 잘 보여준다. 연구지역에서 나타나는 SAR 진폭영상 화소값은 조위와는 상관관계가 거의 없으며, 이보다는 파장, 편광, 관측방향에 더 민감한 것으로 나타났다. L-밴드 HH-편광 신호가 수평막대에 수직의 관측방향을 가질 때 가장 큰 반사강도를 나타낸다. 또한 JERS-1 SAR 영상을 이용하여 해수면에서 최초로 매우 높은 긴밀도를 유지하는 21개의 간섭도를 생성하였다. 이들 간섭도의 fringe 변화율은 일차적으

로 altitude of ambiguity와 매우 밀접한 관계를 갖는다. 이를 역함수를 이용하여 최적화된 모델로 위상을 제거한 후 얻어진 잔여간섭위상은 조위 변화와 선형의 관계를 보이며, 이는 SAR를 이용한 조위차 관측의 가능성을 제시한다. 그러나 직선 회귀식의 최소제곱근 오차는 11.7 cm로 정밀도가 아직 실제 활용 가능한 정도는 아니며, 정밀도를 높이기 위해 앞으로 다중편광 SAR 자료를 이용한 추가적인 연구가 필요하다.

1. 서론

영상레이더인 SAR를 이용한 레이더간섭(radar interferometry) 기술은 지난 1990년대 이후 급속하게 발달한 마이크로파 원격탐사의 핵심 기술 중 하나이다. 이 기술은 정밀 지형고도 추출(Zebker *et al.*, 1992; Zebker *et al.*, 1994a) 뿐만 아니라 지진, 화산활동, 지반침하 등 자연재해 연구에 필수적인 기술이 되었다(Goldstein *et al.*, 1993; Massonnet *et al.*, 1993; Zebker *et al.*, 1994b; Massonnet *et al.*, 1995; Ferretti *et al.*, 2000; Amelung *et al.*, 2000).

그러나 레이더 간섭효과는 해양이나 범람지역과 같이 표면이 지속적으로 변화하는 물에서는 적용이 불가능한 것으로 알려져 왔다. 최근 Alsdorf *et al.*(2000, 2001a, 2001b)는 L-밴드 HH-편광 SAR 자료를 이용하여 아마존의 침수된 범람원 지역의 식생에 의한 double-bounce 신호(물의 표면에서 1차 반사 후 나무의 수직줄기에 의한 2차 반사)를 이용하여 수면고도 변화를 cm 단위의 정밀도로 측정하는데 최초로 성공하였다. 이를 위해 SIR-C 및 JERS-1 레이더 간섭자료와 TOPEX-POSEIDON 고도레이더(altimetry) 자료를 함께 이용하여 물에서도 특수한 조건에서는 레이더 간섭 기술을 적용할 수 있음을 제시하였다.

우리나라 남해 연안에는 많은 해양양식장이 분포하고 있으며, 양식 대상은 지역마다 다양하지만 해초나 김양식이 가장 많은 비율을 차지하고 있다. 해초나 김양식을 위해 해수면 위에 설치된 사각형의 부유성 인공구조물은 광학영상을 이용한 원격탐사에서 쉽게 관측될 수 있다. 이와는 반대로 대부분의 다른 해양 양식 구조물은 해수면 아래에 설치되어 있기 때문에 원격탐사에 의해 거의 관측

되지 않는다. 본 연구에서 가덕도 주변의 굴양식장에 대하여 레이더 간섭기술의 적용 가능성을 검토하고자 한다. 굴양식을 위해서는 길이 약 1.5m 지름 약 10cm의 나무를 사용하여 1개의 수평 및 두 개의 수직 나무막대로 구성된 구조물을 설치하며 일반적으로 약 50~100개의 수평막대가 배열로 구성되어 있다. 이 구조물은 1~2m 공간해상도를 갖는 고해상도 광학영상(예, IKONOS)으로도 관측이 쉽지 않으며 이 보다 저해상도의 다른 광학 위성시스템에 의해서는 전혀 관측되지 않는다. 그러나 이 연구를 통하여 SAR 영상에서는 적절한 조건 하에서 이들 구조물이 잘 관측된다는 사실을 발견하였다.

본 연구에서는 부산시 녹산국가공단과 가덕도 북부에 위치한 놀차도 사이 해양지역에 위치한 굴양식장에서 나타나는 SAR 영상의 강한 산란 특성 분석하고, 레이더 간섭위상의 특징과 이용한 조위의 변화를 측정 가능성을 토의하고자 한다. 특히 이 방법은 해수면에서 레이더 간섭 기술의 적용 가능성에 대하여 처음 실시하는 것으로, 범람지역에서 성공한 Alsdorf *et al.*(2000)의 경우와는 다르게 수직줄기에 의한 corner reflection 효과보다는 수평막대에 의한 double bouncing 효과의 가능성에 대한 토의라는 점에서 그 의미를 갖는다.

2. 시험지역 및 자료

연구지역의 JERS-1 SAR 영상은 Fig. 1과 같다. 굴 양식장은 Fig. 1에서 사각형으로 표시한 지역으로 매우 밝은 산란체로 나타나고 있다. 이 지역의 연안환경 특성은 고철환(2001)에 의해 자세하

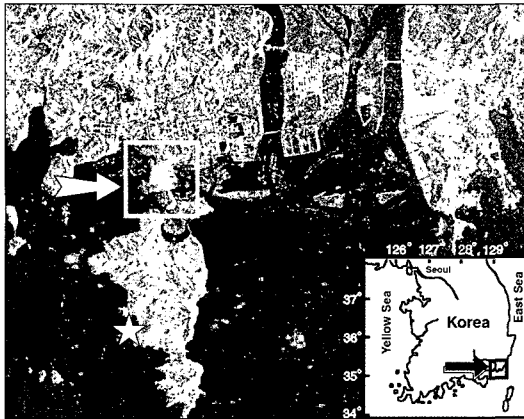


Fig. 1. Location map of the study area and a JERS-1 SAR amplitude image. The oyster farms are marked by the white square. Star denotes the location of tide gauge.

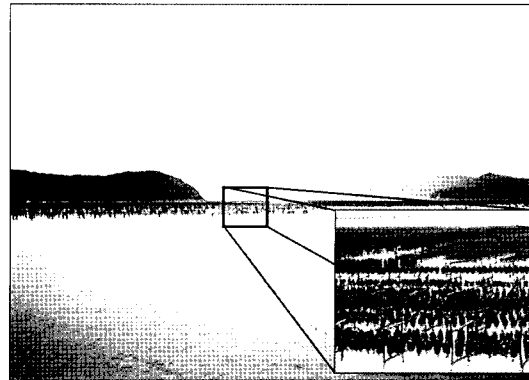


Fig. 2. Field photograph of the oyster farming structures.

게 기술되었다. 연구지역의 굴 양식장은 등록되어 있지 않은 양식장으로 따라서 어떠한 공식적인 정보(규모, 개수, 양식구조물의 분포 등)도 얻을 수 없는 상태이다. 원격탐사를 이용하여 이와 같이 양식장의 유무를 파악할 수 있는 것도 그 가치를 갖는다. 수평막대와 수직막대로 연결된 굴 양식장의 일반적인 인공구조물에 대한 현장사진은 Fig. 2와 같다. 두 개의 수직막대는 해저면에 고정되어 있으며, 수평막대는 계절 및 조위에 관계없이 항상 0.5~1m의 높이로 수면위로 드러나 있도록 유지되고 있다. 즉 조위에 따라 수직막대의 노출 정도는 변화를 갖으나 수평막대는 항상 노출된 상태를 유지하고 있다.

본 연구지역에서 25개의 SAR 자료를 획득하였으며, 사용된 SAR 자료의 종류, 자료 획득시각 및 당시의 조위는 Table 1에 요약되어 있다. 조위 자료는 국립해양조사원에서 제공되었으며, 관측위치 (Fig. 1에 ☆로 표시)는 연구지역과 가장 가까운 부산시 강서구 천가동 천성방파제 끝단(북위 35°1'18", 동경 128°48'47")에 위치한 가덕도 검조소로 검조기(tide gauge)에 의해 1분 간격으로 측정된 자료를 사용하였다.

비록 5개의 RADARSAT C-band SAR 자료가 획득되었지만, 빔모드가 모두 다르기 때문에 간섭쌍을 형성할 수 없었다. 또한 한 개의 ERS-1/2

Table 1. Summary of the SAR data sets.

Data No.	Sensor	Date (Local time)	Tide height (cm)
1	JERS-1 SAR	1992/12/17 (11:03)	88
2	"	1994/01/17 (11:01)	167
3	"	1995/05/16 (11:06)	156
4	"	1995/08/12 (11:08)	146
5	"	1995/11/08 (11:09)	129
6	"	1996/05/02 (11:10)	69
7	"	1996/06/15 (11:10)	80
8	"	1996/10/25 (11:10)	68
9	"	1997/01/21 (11:09)	80
10	"	1997/06/02 (11:08)	49
11	"	1997/10/12 (11:11)	49
12	"	1997/11/25 (11:13)	75
13	"	1998/01/08 (11:14)	64
14	"	1998/02/21 (11:15)	91
15	"	1998/05/20 (11:16)	63
16	"	1998/07/03 (11:17)	89
17	"	1998/08/16 (11:18)	94
18	"	1998/09/29 (11:18)	93
19	ERS-1	1995/12/27 (22:41)	96
20	ERS-2	1995/12/28 (22:41)	74
21	RADARSAT(F4)	1996/08/05 (18:29)	62
22	"(S5)	1996/08/12 (18:25)	164
23	"(S3)	1997/04/07 (06:29)	134
24	"(F2)	1998/01/22 (18:25)	77
25	"(F3)	1999/11/13 (06:21)	71

tandem pair 중, ERS-1 영상에서는 굴 양식장에 의한 매우 강도가 큰 역산란 현상이 관측되지만 ERS-2 영상에서는 관측되지 않았다. 따라서 Fig. 3에서와 같이 ERS-1/2 tandem pair의 경우 양식장

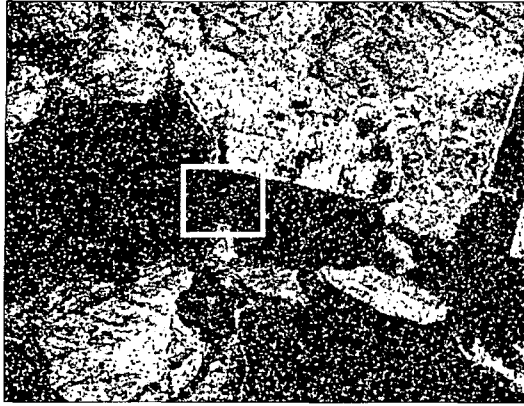


Fig. 3. Coherence map of the ERS-1/2 pair.

주변에서의 긴밀도가 매우 낮으며, 이에 따라 의미 있는 간섭위상을 갖는 간섭도(interferogram)를 만들 수 없었다. Fig. 4는 두 개의 RADARSAT 영상으로 거의 유사한 조위조건(약 6cm 조위차)에서 얻어진 것으로, Fig. 4a는 descending mode로



Fig. 4. RADARSAT images acquired by: (a) fine beam 2 ascending mode, and (b) fine beam 3 descending mode.

Table 2. Summary of the JERS-1 SAR interferometric pairs.

No.	SAR image		Altitude of ambiguity(ha)	Tide height difference(cm)
	Master	Slave		
1	95/08/12	95/11/08	-241.99	-17
2	96/05/02	96/10/25	256.72	-1
3	96/05/02	97/01/21	-156.27	11
4	96/06/15	96/10/25	273.44	-12
5	96/06/15	97/01/21	-152.82	0
6	96/10/25	97/01/21	-104.57	12
7	96/10/25	97/06/02	-238.7	-19
8	97/01/21	98/05/20	-106.35	-17
9	97/06/02	98/05/20	-119	14
10	97/11/25	98/01/08	-85.29	-11
11	97/11/25	98/02/21	-281.48	16
12	97/11/25	98/07/03	275.74	14
13	97/11/25	98/09/29	149.7	18
14	98/01/08	98/02/21	114.88	27
15	98/01/08	98/07/03	72.51	25
16	98/02/21	98/07/03	194.61	-2
17	98/02/21	98/08/16	-115.37	3
18	98/02/21	98/09/29	105.86	2
19	98/07/03	98/08/16	-74.48	5
20	98/07/03	98/09/29	216.06	4
21	98/08/16	98/09/29	51	-1

Fig. 4b는 ascending mode로 획득되었다. 연구지역 내의 굴 양식장 구조물에 의한 강한 역산란은 단지 Fig. 4a에서만 관찰되는데, 이러한 특징은 양식장 구조물의 배열상태에 의해 특정 관측방향(look direction)에서 역산란을 많이 유발하기 때문으로 해석된다. 이 점에 대해서는 다음절에서 좀 더 자세히 설명하겠다. 또한 AIRSAR 자료(XTII 모드)가 2000년 9월 30일 획득되었으나 아직 JPL에서 자료처리 중으로 본 연구에는 사용할 수 없었다.

RADARSAT이나 ERS-1/2의 경우와는 달리 굴 양식장 구조물은 JERS-1 L-밴드 HH-편광에서 매우 잘 관찰된다. 본 연구지역에서 19개의 JERS-1 SAR 자료를 획득하였으며, 이들은 모두 descending mode로 얻어진 것이다. JERS-1 SAR 영상을 이용하여 비교적 긴밀도가 높은 21개의 레이어 간섭도를 생성하였다. 생성된 각 간섭쌍의 자료획득시간, altitude of ambiguity 및 조위차는 Table 2에 요약되어 있다. 해양에서는 일반적으로

간섭쌍이 전혀 생성되지 않는 것으로 알려지고 있으나, Alsdorf 등(2001b)의 경우와 유사하게 이 연구에서도 JERS-1 자료의 경우는 긴밀도가 매우 높은 간섭쌍이 굴 양식장 주변에서 만들어 졌다. 특히 Alsdorf(2000, 2001a, 2001b)의 연구에서는 여러 개의 간섭쌍을 만들지는 못하였으며 단지 SIR-C와 JERS-1 자료에서 각각 1개의 간섭쌍을 생성하는데 그쳤으며, 이에 따라 이 연구에서와 같이 시간 변화 및 baseline 변화에 따른 간섭쌍의 특성을 분석할 수 없었다. 그러나 이 연구에서는 하루 간격의 ERS-1/2 tandem 자료를 이용해서도 얻을 수 없는 것으로 알려진 해수의 표면에서 21개의 간섭쌍을 성공적으로 얻을 수 있었으며, 특히 긴밀도가 두 자료가 얻어진 시간적 간격에 거의 무관하며 단지 baseline의 거리가 충분히 가까우기에 따라 긴밀도 높은 간섭쌍이 만들어 질 수 있다는 사실을 처음 보고한다.

3. 결 과

1) SAR 진폭영상의 반사강도 특성

일반적으로 C-밴드 SAR 영상보다는 L-밴드 HH-편광으로 얻어진 영상에서 굴 양식장 구조물이 높은 반사강도를 갖는 것으로 나타났다. 우선 Fig. 4의 RADARSAT C-밴드 HH-편광으로 얻어진 영상에 대하여 먼저 정성적인 분석을 할 수 있다. 연구지역내의 굴 양식장 구조물에 의한 강한 역산란은 단지 Fig. 4a에서만 관찰되는데, 이러한 특징은 양식장 구조물의 배열상태에 의해 특정 관측방향(look direction)에서 역산란을 많이 유발하기 때문으로 해석된다.

Fig. 4a는 F3 모드로 Fig. 4b의 F2 모드 보다 입사각(incidence angle)이 더 크다. 만일 수직막대에서의 double bouncing이 주요 역산란의 요인이라면 입사각이 더 크고 노출이 더 많은(즉 조위가 더 낮은 상태) Fig. 4b의 경우가 더 강한 역산란을 나타내야 한다. 그러나 이와는 반대로 Fig. 4a의 경

우가 더 강한 역산란을 보이며, 이는 결국 영상의 관측방향(즉 descending과 ascending 모드에 따른 상대적인 관측방향의 차이)이 반사강도에 더 중요한 역할을 담당하고 있다고 생각된다. IKONOS 영상을 이용하여 이 지역의 양식장 배열방향을 관찰한 결과, 수평막대 방향은 약 N80 E 로 ascending 모드에서 관측방향과 거의 평행하게 배열되었다. 만일 수직막대의 역할이 중요하다면 SAR 안테나의 관측방향에는 무관해야 한다. 이러한 사실로부터 우리는 본 연구지역에서 나타나는 강한 산란형상은 수직 막대보다 수평막대에 의한 영향이 우세한 것으로 해석할 수 있다.

굴 양식장 구조를 가장 잘 반영하고 있는 JERS-1 SAR 자료의 경우 SAR 영상 내에서 여러 산란체에 의해 반사된 레이더 신호 강도의 절대비교를 위해서는 SAR 영상으로부터 sigma naught을 구해야 한다. 하지만 JERS-1 SAR의 경우 안테나 문제로 인하여 sigma naught을 구하는 방법이 수립되지 못했다. 특히 본 연구에서 사용된 영상과 같이 근거리(near range) 지역에서 해양과 같은 낮은 반사강도를 갖는 산란체와 원거리(far range) 영역에서 도시, 산림과 같은 높은 반사강도를 갖는 산란체가 분포하는 자료인 경우에는 더욱 많은 문제점들이 있다(Shimada, 1998). 따라서 절대적인 레이더 반사 강도를 비교할 수는 없지만, 굴 양식장과 해수면에서 나타나는 SAR 진폭영상 값의 통계적 분포특성을 이용하여 화소값의 특성을 분석하였다.

SLC(single-look complex) SAR 진폭영상의 화소값은 일반적으로 균질한 표면에서 Rayleigh 분포를 보이는 것으로 알려져 있으며(Ulaby *et al.*, 1982), 따라서 이 연구에서는 각 지역에서의 영상 화소값의 히스토그램을 Rayleigh 곡선을 이용하여 최적화(fitting)되었다. Fig. 5a에서 A(굴 양식장)와 B(해수면) 지역을 선택하여 모든 영상에 대하여 통계값을 구하였다. Fig. 5b는 1998/7/3 자료를 이용한 결과로써 가는 실선은 원래의 자료의 히스토그램을 나타내며, 굵은 실선은 각각 최소자승법을 이용하여 최적화된 굴 양식장과 해수면에 대한

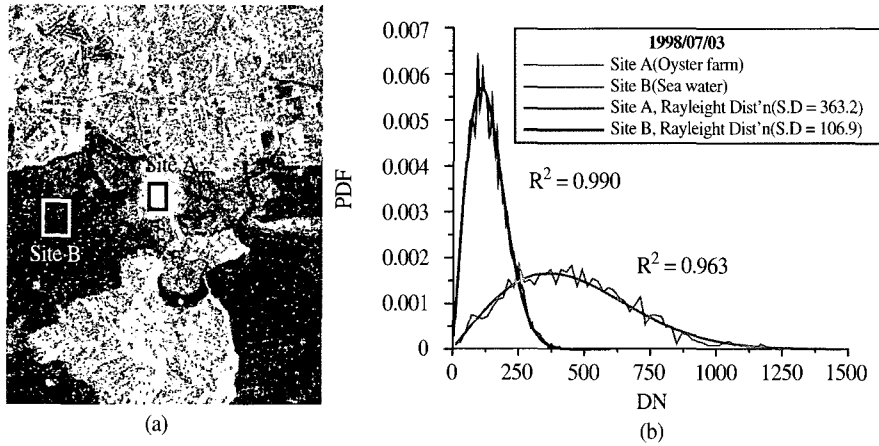


Fig. 5. (a) Sites used for the brightness evaluation, and (b) histogram and fitted function to the brightness of JERS-1 SAR amplitude images.

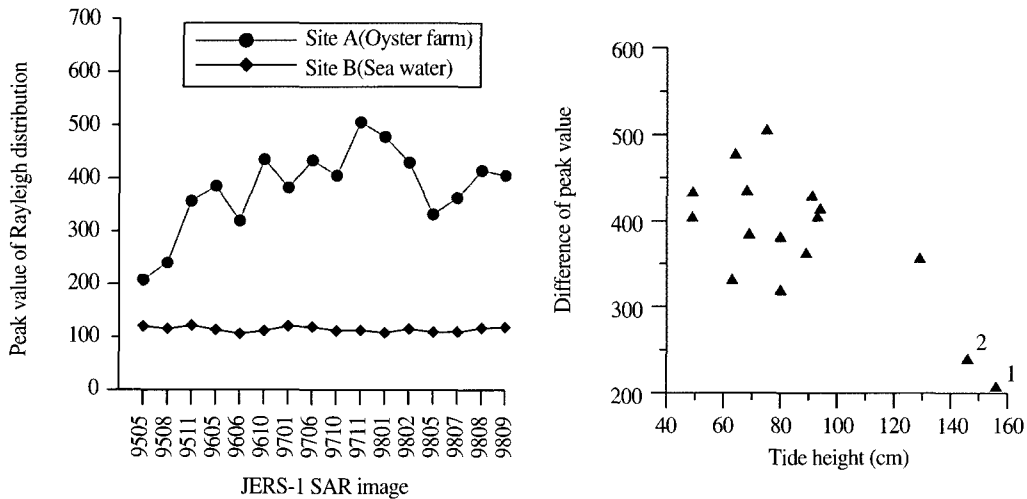


Fig. 6. (a) Variation of brightness with respect to JERS-1 SAR acquisition date, and (b) tide height versus the peak value of fitted Rayleigh function.

Rayleigh 분포곡선이다. 최적화된 곡선의 결정계수 R^2 (Ross S.M., 1987) 값은 모두 0.95 이상으로 Rayleigh 분포를 잘 따르고 있음을 알 수 있다. 사용된 자료 중 3개의 SAR 영상(1992/12/12/, 1993/3/15, 1994/1/17)에서는 굴 양식장에 해당되는 반사 특성이 관찰되지는 않았으며, 이는 1994년 2월 이전 자료로 이때까지는 양식장 시설이 미비했던 것으로 판단된다. 이 세 자료를 제외한 나

머지 16개의 JERS-1 SAR 영상에서는 모두 공통적인 강한 역산란의 특징을 보였으며, 진폭영상 값을 이용해 Rayleigh 분포에 최적화하였다. 이들 결과의 R^2 값은 모두 0.9 이상으로, 앞서 보여준 Fig. 5b의 결과와 같이 Rayleigh 분포와 매우 잘 일치하였다.

시간에 따른 화소값의 변화 양상을 분석하기 위해 Fig. 6a에서와 같이 영상이 취득된 시간에 따

라 최적화된 Rayleigh 분포의 최대값을 도시하였다. 해수면에서 진폭영상의 화소값은 평균 114.5, 표준편차 5.1로 매우 안정된 낮은 값을 보여주고 있다. 그러나 굴 양식장에서는 평균 381.1, 표준편차 78.5로 변화가 매우 큰 것을 알 수 있다. 해수면에서의 화소값이 거의 일정한 값을 보이므로 비록 σ naught 값은 아니지만 상대적 비교가 충분히 가능하다. Fig. 6a를 볼 때 자료가 획득된 시기와 양식장에서 나타나는 화소값과의 연관성은 없는 것으로 판단된다. 또한 Fig. 6b는 굴 양식장에서 최적화된 Rayleigh 분포의 최대값(P_{oyster})과 조위와의 관계를 도시한 것이다. 16개의 SAR 자료를 모두 이용하여 구한 두 값 사이의 상관계수는 -0.72로 역 상관관계가 존재 것으로 해석할 수도 있으나, 1995/05/16, 1995/08/12 자료(Fig. 6b에 표시된 1, 2)를 제거하고 난 후 계산된 상관계수는 -0.27로 거의 서로 무관하다. 즉 1994/01/17 이전 자료에서는 굴 양식장이 관측되지 않았으므로 1995년 8월 당시까지도 양식장 시설이 전 지역에 대하여 충분히 설치되지 않은 상태로 판단된다. 즉 1995년 5월과 8월의 자료는 조위와의 관계에 의해 약한 반사강도를 나타내기보다는 양식장의 시설이 충분히 많지 못했기 때문으로 여겨진다. 이는 1996년 이후 자료에서의 조위와 P_{oyster} 사이에 관계성이 거의 없는 상태로 분포하는 것을 Fig. 6b에서 잘 보여주고 있으며, 따라서 조위와 굴 양식장에서의 화소값은 거의 연관성이 없는 것으로 해석된다.

이와 같이 굴 양식장 구조에서의 반사강도가 조위와 상관관계가 낮다는 점은 중요한 의미를 갖고 있다. 만일 굴 양식장 구조물에서 나타나는 강한 역산란이 아마존 범람지역에서와 같이 수직의 구조물에 의한 double-bouncing이 주요한 반사요인이라면 조위가 낮을수록 이에 비례하는 강한 반사강도를 갖아야 하며 또한 관측방향에 무관해야 한다. 그러나 이 연구에서 관심을 갖는 굴 양식장의 경우는 반사강도가 관측방향에 민감하며 조위에는 무관하다. 따라서 굴 양식장의 수직막대에 의한 corner scattering은 매우 제한적인 역할을 하고

있으며, 따라서 수평막대가 레이더 산란에 큰 영향을 주고 있다고 결론지을 수 있다.

2) 간섭위상 분석

JERS-1 SAR 영상을 이용하여 생성된 21개의 레이더 간섭도 중 대표적인 2개를 Fig. 7에 도시하였다. 이 그림에서 간섭도의 밝기는 긴밀도 값을 나타낸다. 전반적으로 해양지역에서 긴밀도가 매우 낮다. Fig. 7a는 9711/9802 간섭쌍이고 Fig. 7b는 9807/9808 간섭쌍으로 굴 양식장 내에서의 위상이 매우 높은 긴밀도를 유지하고 있다. 굴 양식장에 대한 긴밀도는 조석 상태, 자료간의 시간간격 및 계절에 거의 독립적이며, 단지 수직 baseline이 1km 이하로 근접도를 유지하는 JERS-1 SAR 자료를 이용하면 긴밀도가 높게 나타났다. 즉 수면에서는 temporal decorrelation으로 인하여 거의 간섭쌍을 얻을 수 없다는 기존의 개념과는 달리 L-밴드 HH-편광인 경우 baseline만 적절하면 자료간의 시간간격에 무관하게 굴 양식장과 유사한 구조가 존재하는 경우에는 긴밀도가 높은 간섭쌍을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

JERS-1의 궤도 정보는 부정확하기 때문에 NASDA에서 제공하는 궤도정보만을 이용한 JERS-1 간섭쌍에 대한 flat-earth 보정은 신뢰할 수 없다. 따라서 이 연구에서는 가능한 정밀한 flat-earth 보정을 위해서 Seymour(2000)가 제시한 방법과 유사한 기법을 이용하여 육지지역에 나타나는 간섭쌍의 위상과 DEM을 이용하여 모사된 간섭쌍과의 위상 차이가 최소화되도록 baseline을 보정을 실시하였다.

Fig. 8은 이와 같은 방법으로 굴 양식장에서 얻어진 21개의 간섭위상의 fringe 패턴을 나타낸 것으로, 후처리 필터링은 적용하지 않은 상태이다. 해양에서 나타나는 이와 같은 fringe는 아직 보고된 바 없다. Fig. 8의 간섭쌍은 지형에 의한 위상과 변위에 의한 위상을 함께 포함하고 있다. 그러나 해수부분의 절대고도 0값을 갖는 수평면으로 가정할 수 있기 때문에 여기서 나타나는 fringe는 결국 differential 간섭쌍의 경우와 동일하게 변위에 의한

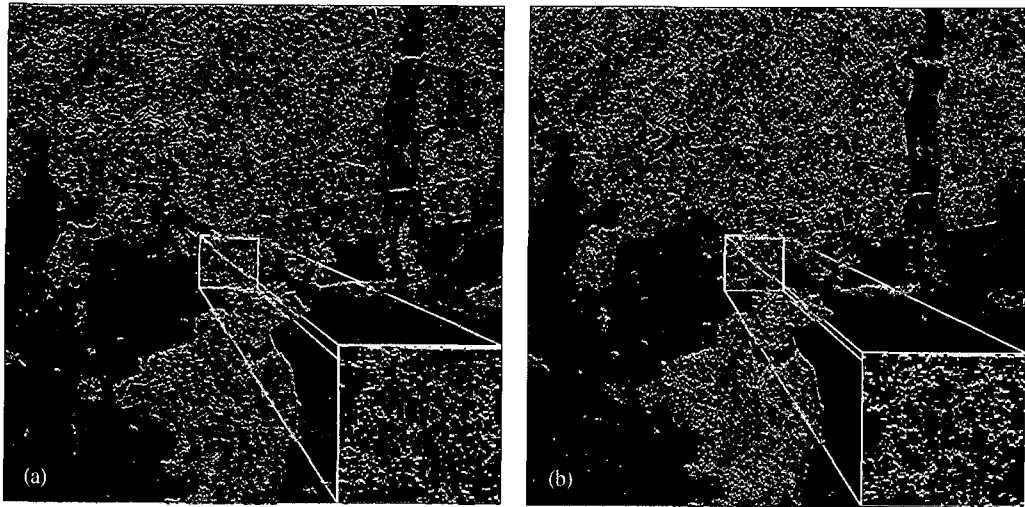


Fig. 7. JERS-1 SAR interferograms showing oyster farming structures: (a) 9711/9802 pair, and (b) 9807/9808 pair.

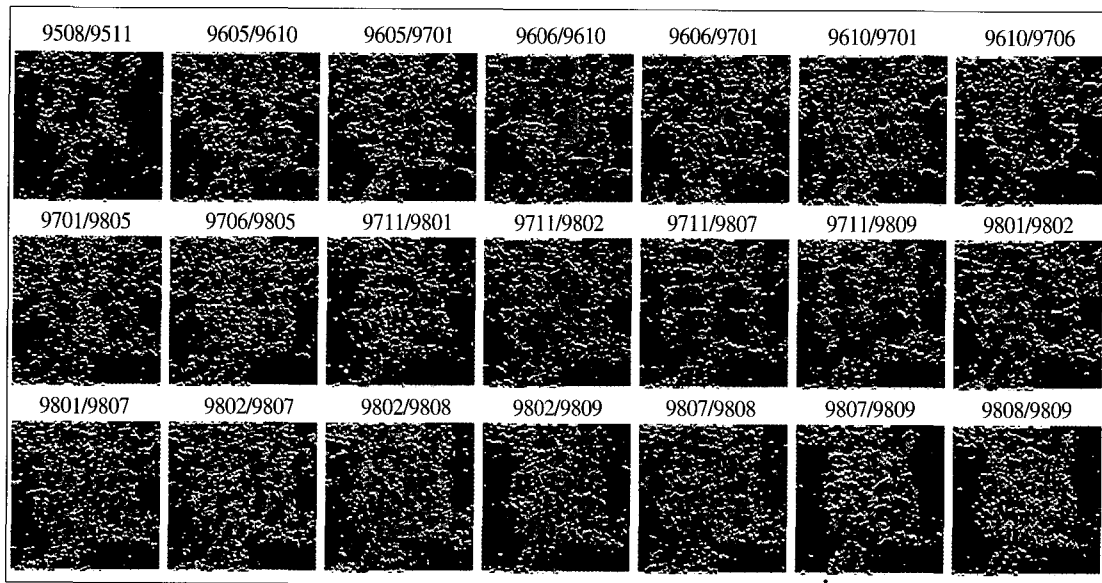


Fig. 8. Twenty-one interferograms over the oyster farms.

것으로 해석할 수 있다.

한가지 특징은 모든 fringe 패턴이 거의 방위 (azimuth) 방향에 평행하게 발달하고 있다는 것이다. 우리는 우선 이러한 간섭위상 fringe가 두 SAR 자료의 획득 시각의 조위차에 의해 발생하는 것으로 가정하였다. 하지만 두 값 사이의 상관 계수는 0.05로 거의 0에 가까운 값으로 fringe의 파수 대 조위차를 도시한 Fig. 9에서와 같이 거의 상

관성이 없는 것으로 나타났다. 따라서 fringe와 조위차의 관계를 직접 추정하는 것은 불가능하였다.

비록 굴 양식장에서 나타나는 간섭위상 fringe가 조위차와 직접적인 상관관계를 갖지는 못하지만 Fig. 10에서와 같이 altitude of ambiguity와 매우 밀접하게 나타났다. Altitude of ambiguity는 지형위상의 경우 간섭도에서 한 fringe(즉 2π 값)가 나타내는 고도변화 값으로 수직 baseline과 반비례 관

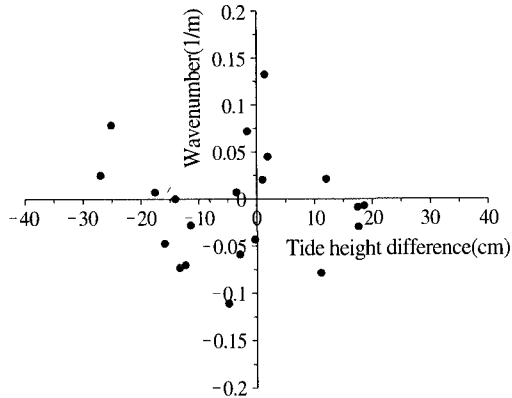


Fig. 9. Plot of tide height difference versus interferometric phase.

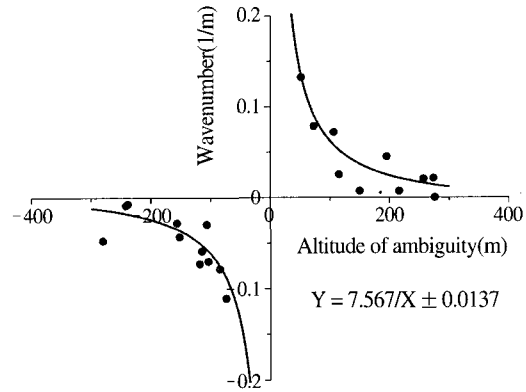


Fig. 10. Plot of altitude of ambiguity versus interferometric phase.

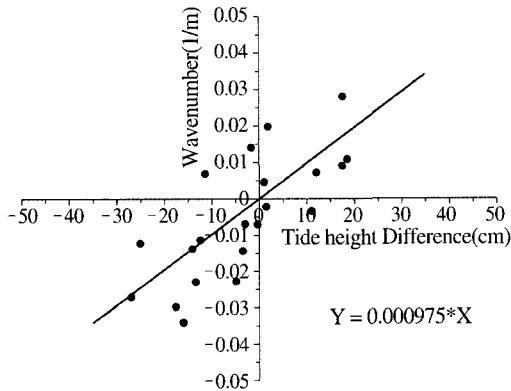


Fig. 11. Plot of tide height difference versus residual interferometric phase.

계를 갖는다(Massonnet, 1998). 이러한 현상은 일차적으로 baseline 추정오차(즉 지구곡률 위상제거 오차)에 의한 것으로 간주될 수 있다. 이와 같은 가정은 특히 Fig. 10에서와 같이 fringe와 altitude of ambiguity가 반비례 함수로 최적화 될 수 있다는 점으로 설명될 수 있다.

이 연구에서는 이와 같은 간섭도에서 일차적으로 얻어진 위상이 baseline을 이용하여 지구곡률 효과를 제거하는 과정에서 발생한 것으로 가정하였으며, 이를 제거하기 위해 모든 자료를 Fig. 10에서와 같이 도시한 후 altitude of ambiguity와 간섭위상 fringe의 관계를 모델링을 통하여 baseline과 밀접한 관련성을 보이는 위상을 제거하고자 하였다. 최적의 관계식을 구하기 위해 역함수, 지수

함수, 로그함수 등 다양한 함수를 가정하여 계산하였으며, 역함수가 상관계수와 F 값을 근거로 할 때 가장 최적화된 함수로 나타났다. 이는 altitude of ambiguity(h_a)가 수직 baseline의 역함수로 표현되기 때문에 최적함수가 역함수라는 점은 간섭위상의 fringe가 baseline과 밀접한 관계를 갖고 있다는 것을 지지한다. 최적화된 역함수는 Fig. 10에 실선으로 도시되어 있으며, 이때 fringe와의 상관계수는 0.96 이며 F 값은 194.9 이다. 전체 간섭위상(f_{obs})에서 이와 같이 계산된 회귀모델을 이용하여 baseline 영향을 제거함으로써 최종의 잔여간섭위상(f_{res})을 구하였다. 즉,

$$f_{res} = f_{obs} - f_{model} \quad (1)$$

$$\text{여기서 } f_{model} = \frac{a}{h_a} + b, (a, b \text{는 상수})$$

이다. 이와 같은 과정을 통하여 최종적으로 얻어진 잔여간섭위상과 조위차는 Fig. 11에 도시하였으며 선형의 관계를 갖음을 알 수 있다. 비록 잔여 위상은 최적화된 직선에서 다소 흩어져 있지만 일반적인 선형의 경향을 갖으며 추정된 1차 직선과 잔여간섭위상과의 상관계수는 0.75 이며 F 값은 27.0로 잔여간섭위상은 통계적으로 선형의 관계를 갖고 있다고 할 수 있다. 그러나 직선 회귀식의 r.m.s. 오차는 11.7cm로 조위차의 범위를 고려할 때 비교적 큰 편이다. 이와 같은 결과를 종합적으로 볼 때 굴 양식장 지역에서 나타나는

fringe로부터 계산된 잔여간섭위상은 조위차와 선형관계를 갖고 있으나 정밀도는 십 여 cm로 낮다.

4. 고찰

이 연구결과 우리는 굴 양식장에서 주요 산란의 요인이 수직막대 보다는 수평막대에 의한 것이라는 결론을 도출하였다. 이와 같은 결론은 두 가지 현상 즉 i) RADARSAT 영상에서 굴 양식장의 반사강도가 ascending과 descending mode에 민감하며 이는 결국 관측방향에 반사강도에 영향을 준다는 점과, ii) JERS-1 SAR 영상에서 조위차(즉 수직막대의 노출정도)가 반사강도와 거의 무관하다는 점이다. 이와 같은 해석은 해수면에 도달된 입사파가 수면에서 반사된 후 수평 혹은 수직 막대에 이차적으로 산란되어 안테나 방향으로 전파될 것이라는 산란모델을 가정한 해석이다. 즉 수직막대가 주요역할을 한다면 모서리산란(corner scattering)이 우세할 것이며, 반대로 수평막대가 주요 역할을 한다면 단순한 double bouncing에 의한 것으로 생각한 것이다. 그러나, 역산란 모델링 등을 통한 정량적인 분석을 실시하지 못하였으며, 우리는 아직 굴 양식장 구조물에서 발생하는 정확한 역산란 모델을 알고 있지 못하다. 따라서 향후 굴 양식장과 유사한 구조물에서 발생할 수 있는 보다 사실적인 산란 모델의 수립과 검증이 필요하다. 특히 여기서 가정된 두 경우 모두 double bouncing이 주요 원인으로 생각하고 있으나, 이는 다중편광 자료를 이용한 SAR 편광분석(radar polarimetry)이 필요하다. 즉 만일 반사가 현재의 두 종류 외에 수평막대에서 직접적인 산란이 주요한 요인이라면 SAR 간섭위상은 조위차를 반영하지 못할 것이다. 이에 대해서는 현재 JPL에서 자료처리 중인 AIRSAR 자료를 얻게되면 LL- 및 RR-변환을 통한 편광분석으로 검증이 가능할 것이다.

두 번째 아직 해결되지 못한 것은 현재 우리가 얻은 간섭위상의 fringe가 왜 비행방향에 평행하며

또한 altitude of ambiguity와 밀접한 관계를 갖는가 하는 점이다. 이에 대해 이 논문에서는 flat-earth 보정단계에서 baseline의 오차에 의한 것으로 가정하였으며, 이를 모델을 사용하여 제거한 후 잔여 간섭위상에서 조위차와 1차식의 관계를 갖는 것을 보였다. 그러나, 실제 baseline 오차에 의해 나타날 수 있는 굴 양식장에서의 fringe 오차는 매우 미미하다. 연구지역의 자료처리를 위해 JERS-1 SAR 전체 영상으로부터 방위 방향으로 5100 화소, 거리(range) 방향으로 1500 화소의 영상을 선택하였다. 한편 간섭위상 fringe가 방위방향에 거의 평행하므로 단지 range 방향의 변화만을 고려하면, range 방향의 양끝에서 $\Delta f_{flat-earth}$ 만큼의 지구곡률 위상 보정 오차가 발생하였을 때 굴 양식장 지역(range 방향으로 약 100 화소)에서 발생할 수 있는 오차값(Δf_{oyster})은 다음 식과 같다.

$$\Delta f_{oyster} = \frac{100}{1500} \cdot \Delta f_{flat-earth} \quad (2)$$

따라서 지구곡률 위상제거 과정에서 1 fringe(실제 오차값은 이보다 훨씬 더 작음)의 잔여오차가 남아 있더라도 실제 굴 양식장에서 추정된 fringe 주파수 오차는 단지 1/15 fringe에 지나지 않는다. 따라서 이러한 현상은 baseline 오차에 기인한다고 볼 수 없다. 우리는 아직까지 이 현상의 원인을 밝히지는 못하였으며, SAR 영상취득 과정 중 산란 메커니즘 또는 조류의 방향 및 세기 등과 같은 보다 근본적인 단계에서 그 원인을 찾아야 할 것이다. 또한 flat-earth 보정방법이 육상에서 적용되는 방법과 동일하게 가정하여 적용하였으나, 해수 표면의 경우에 대한 근본적인 flat-earth 보정방법에 대한 검토와 분석이 필요하다.

본 연구 결과만으로는 SAR를 이용하여 굴 양식장과 유사한 구조물이 있을 때 해수면의 조위차를 관측하는데 직접 적용할 수 있을 정도로 정밀하지 못하며, 명확한 산란모델을 제시하지는 못하고 있다. 이 지역에서 PACRIM-II 실험에 의해 2000년 9월 30일 얻어진 AIRSAR XTII 모드(L- 및 P-밴드 다중편광 모드, C-밴드 Topsar 모드) 자료의 분석이 중요한 역할을 할 것이다.

5. 결 론

가덕도 일대 굴 양식장에서 얻어진 SAR 자료의 영상강도 및 간섭위상을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

i) 광학 영상에서 잘 관측되지 않는 굴 양식장 구조물은 레이더 영상을 이용하면 효과적으로 관측할 수 있으며, 특히 L-밴드 HH-편광을 갖고 구조물의 수평막대와 수직의 관측각을 갖는 경우가 가장 효과적이다. 이는 해수면 위에 노출된 수직 및 수평막대 구조물에 의한 강한 double bounce 신호를 제공하기 때문인 것으로 판단된다. ii) 이때 반사강도는 조위와는 거의 무관하며 대신 파장, 편광 및 관측방향 등의 시스템 요소에 민감하다. C-밴드인 RADARSAT의 경우는 descending mode인 경우가 ascending mode 보다 영상화에 우수하며, 이는 관측방향이 매우 중요하다는 것을 보여주고 있다. iii) L-band SAR 자료인 경우 해수면의 상태(조위, 조류, 굴의 성장상태 등)가 지속적으로 변화함에도 불구하고 temporal decorrelation은 큰 문제가 되지 않으며, 이 보다는 baseline이 충분히 작다면(약1km 이하의 수직 baseline) 굴 양식장에서 긴밀도가 높은 레이더 간섭도를 생성할 수 있다. 이와 같이 해수면에서 굴 양식장과 같은 구조물이 있는 경우 간섭도를 생성할 수 있다는 사실은 처음 보고된다. iv) 굴 양식장에서 획득된 JERS-1 SAR 간섭도의 fringe rate는 조위차와 직접적으로 선형의 관계를 나타내지 못하며, 오히려 altitude of ambiguity와 매우 밀접한 관계를 갖고 있다. 이러한 현상의 원인이 원래의 산란특성 때문인지 혹은 자료처리 과정에서 발생한 오차인지는 규명하지 못했으며, 향후 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 다만 JERS-1 SAR 자료로부터 추출된 간섭위상으로부터 역합수를 이용하여 최적화된 위상을 제거한 결과 잔여 간섭위상은 조위차와 선형관계를 가지고 있는 것으로 나타났다. 따라서 SAR를 이용한 조위차 관측 가능성을 제시할 수 있었다.

그러나 직선 회귀식의 최소제곱근 오차는 11.7 cm로 정밀도가 낮으며, 따라서 아직은 실제 활용 단계는 아니며 정밀도를 높이기 위한 추가적인 연구가 필요하다. 앞으로 연구지역에서 획득된 AIRSAR 다중편광 및 간섭모드 자료에 대한 분석을 통하여 이 연구에서 해결하지 못한 문제점을 정량적으로 분석하는 연구가 필요할 것이다.

참고문헌

- 고철환, 2001. 한국의 갯벌(환경, 생물 그리고 인간), 서울대학교 출판부.
- Alsdorf D.E., L.C. Smith and M. Melack, 2001a. Amazon Floodplain Water Level Changes Measured with Interferometric SIR-C Radar, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(2): 423-431.
- Alsdorf D.E., J.M. Melack, T. Dunne, L.A.K. Mertes, L.L. Hess and L.C. Smith, 2000. Interferometric radar measurements of water level changes on the Amazon flood plain, *Nature*, 404: 174-177.
- Alsdorf D.E., C. Birkett, T. Dunne, J. M. Melack and L.L. Hess, 2001b. Water Level Changes in a Large Amazon Lake Measured with Spaceborne Radar Interferometry and Altimetry, *Geophysical Research Letters*, 28(14): 2671-2674.
- Amelung F., S. Jonnson, H.A. Zebker and P. Segall, 2000. Widespread uplift and 'trapdoor' faulting on Galapagos observed with radar interferometry, *Nature*, 407: 993-996.
- Ferretti A., C. Prati and F. Rocca, 2000. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5): 2202-2211.

- Goldstein R.M., H. Engelhardt, B. Kamb and R.M. Frolich, 1993. Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an Antarctic ice stream, *Science*, 262: 1525-1530.
- Massonnet D. and K.L. Feigl, 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface, *Rev. Geophys.*, 36: 441-500.
- Massonnet D., P. Briole and A. Arnaud, 1995. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry, *Nature*, 375: 567-570.
- Massonnet D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Fiegl and T. Rabaute, 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 364: 138-142.
- Ross S.M., 1987. *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Seymour M.S. and I.G. Cumming, 1996. An iterative algorithm for ERS baseline estimation, *FRINGE '96*, Sep. 30- Oct. 2 1996, Zurich, Switzerland.
- Shimada M., 1998. *User's Guide to NASDA's SAR products*, Earth Observation research center National Space Development Agency of Japan, pp. 1-24.
- Ulaby F. et al, 1982. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*, Vol. II, ch. 7: 483-492.
- Zebker H.A., C.L. Werner, P.A. Rosen and Scott Hensley, 1994a. Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 32: 823-836.
- Zebker H.A., P.A. Rosen, R.M. Goldstein, A. Gabriel and C.L. Werner, 1994b. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake, *J. Geophys. Res.*, 99: 19617-19634.
- 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. Geosci. Remote Sens.*, 30: 933-940.