

IFSAR 기법 활용을 위해 SAR 설계시 요구조건, 고려사항 및 최대 베이스라인 연구

정회원 홍인표*, 박한규**

Study on the Requirement, Consideration, and Critical Baseline in SAR Design Process for the IFSAR Technique

In-Pyo Hong*, Han-Kyu Park** *Regular Members*

요약

SAR 데이터는 크기와 위상정보를 가지고 있으며, 위상정보를 이용하는 IFSAR 기법은 고 정밀 고도정보를 산출할 수 있는 매우 유용한 첨단기술이다. 본 논문에서는 SAR 운용시 IFSAR 기법을 효율적으로 활용할 수 있도록 하기 위하여 SAR 설계시 고찰해야할 필수적인 요구조건과 주요 고려사항을 제시하였다. 또한 핵심요소 중 하나인 최대 베이스라인에 대한 수식을 유도하였으며, E-SAR에 대한 시뮬레이션과 결과분석을 통하여 활용방안을 제안하였다.

ABSTRACT

SAR data consist of magnitude and phase, and IFSAR technique using phase data is very useful high technology producing fine height information. To use IFSAR technique effectively in the operation of SAR, this paper suggests the essential requirement and main consideration during SAR design process. Also the critical baseline, one of the principal elements, is derived, and it proposes applicable method through the simulation and discussion to the E-SAR.

1. 서론

SAR(Synthetic Aperture Radar) 데이터를 활용하여 고도정보를 획득할 수 있는 방법으로 Stereo SAR와 IFSAR(Interferometry SAR)기법이 있다.

IFSAR 기법은 Stereo SAR 기법에 비해 정밀도가 매우 우수하고 응용분야가 다양하지만 응용분야에 따른 데이터 획득기간 및 전자파 반사가 일정치 않은 영역에서는 성능이 제한적이다. IFSAR 기법은 27년 전 Graham에 의해 제안되었다^{[1][2]}. 최근에는 Zebker와 Goldstein이 화소단위로 고도정보를 추출할 수 있는 항공기용 IFSAR 체계로 획득된 지형데이터를 제시하였다^{[3][4]}. IFSAR 기법은 서로 다른

위치 혹은 서로 다른 시간에 안테나에 수신된 복소 영상을 결합하는 것이다^[5]. 그리고 고도정보를 추출하기 위하여 2개의 복소 영상을 이용하며, 경로 거리 차가 인터페로그램(interferogram)의 형태로 구해지면, 영상화되는 지역에 대한 고도정보를 획득할 수 있다. 인터퍼런스(interference) 효과의 결과는 광학과 음향학 분야에서 이미 잘 알려져있다. IFSAR 기법은 전자파 스펙트럼의 마이크로파 영역에서 생기는 유사한 현상이며, SAR가 반사파(echo)의 크기와 위상을 획득할 수 있는 반면 광학센서는 광자량만을 구할 수 있다^[6].

인터페로그램은 DEMs(Digital Elevation Models)를 제공하거나 지반 침하, 지진 및 화산활동에 의한 지면 변화를 탐지할 수 있다. 또한 지면 산란체들

* 국방과학연구소(hip7777@hanmail.net)
논문번호 : 010084-0427, 접수일자 : 2001년 4월 27일

** 연세대학교 전기전자공학과

이 영상을 획득하는 사이에 불규칙적으로 움직인다(즉, 토지 경작활동 등에 의한), 이것은 노이즈(noise)가 증가되는 형태로 인터페로그램에서 분명히 나타나며 토지사용 분류를 위한 추가적인 속성을 제공할 수 있다.

SAR에서 획득할 수 있는 기본적인 정보는 반사파의 크기와 위상이고 위상에서 보다 정확하고 많은 정보를 추출할 수 있으며, 위상정보를 추출하고 이를 활용할 수 있도록 기반을 제공하는 유일한 방법이 IFSAR 기법이다. 따라서 SAR 설계시 IFSAR 기법을 적용할 수 있도록 고려하는 것은 필수적인 사항이며, 그러치 않을 경우 SAR에서 획득할 수 있는 정보의 반 이상을 포기하는 것과 같다.

본 논문에서는 SAR 설계시 IFSAR 기법을 활용하는데 필요한 요구조건과 고려사항을 제시하였다. 또한 그중 가장 중요한 사항중의 하나인 최대 베이스라인(critical baseline)에 대한 수식 유도, 분석 및 가상의 SAR 체계인 E(Experimental)-SAR에 대한 시뮬레이션을 수행하고 이를 분석 및 고찰하였다. E-SAR는 SAR체계 설계기준에 근거⁷⁾⁸⁾하여 설계된 가상의 위성탑재 SAR 시스템이며, 과학적인 목적으로 운용되는 체계로 설정한다. 따라서 본 논문에서는 IFSAR를 활용할 수 있도록 SAR 설계단계에서 이를 반영할 수 있는 매우 유용한 방안을 제안하였다.

II. SAR 설계시 요구조건 및 고려사항

SAR 설계 변수들의 주요내용은 농작물 작황 조사와 같은 응용분야의 요구조건, 재정적인 측면 및 실질적인 사항을 분석하므로써 도출 될 수 있다. 일반적으로 주요한 응용분야의 요구조건을 만족시키는 SAR 설계내용(예 : 시스템 노이즈 등)이 또한 IFSAR 기법에 대한 요구조건을 만족시킨다. 그러나 SAR 설계시 특별히 IFSAR 기법과 관련된 요구조건을 기술하면 아래와 같다.

●인터페로그램에서 노이즈 레벨이 증가되기 때문에 일반적으로 볼륨 스퀈터링(volume scattering)이 우세한 상황은 피해야 한다. 그러므로 HV (Horizontal & Vertical) 혹은 VH 편파는 IFSAR 기법을 적용하는데 적합치 않다.

●SAR 탑재체가 요(yaw)를 조종할 수 있는 능력을 필수적으로 가져야만 하며, 이렇게 하므로써 신뢰할 수 있는 IFSAR용 데이터를 획득할 수 있다. 즉, 지구가 회전하므로써 생기는 효과를 줄일 수 있

다.

●방위방향의 자세제어(요와 피치(pitch))가 빙폭보다 적어야 한다(< 빙폭의 10%). 예를 들면, ERS(European Remote Sensing Satellite)는 요 스티어링(steering)을 할 수 있어서 IFSAR용 데이터를 정규적으로 쉽게 제공할 수 있는 반면에 Radarsat은 요 스티어링 능력이 없으므로 IFSAR용 데이터를 쉽게 제공하지 못하고 있다.

●SAR 탑재체의 반복 주기 사이에 허용 가능한 이동거리(drift)에 대한 제한사항으로 이것은 IFSAR 기법에 사용될 수 있는 SAR 영상 쌍(pair)의 개수를 최대화하는데 도움이 된다.

●베이스라인은 영상 획득시 반복궤도 간의 거리로서 푸리에(Fourier) 스펙트럼 상에서 두 영상간에 겹쳐지는 부분이 있는 최대거리 내에 있어야만 한다.

●SAR 프로세서(processor)가 초기(raw) 데이터를 처리할 때 위상을 보전하고 있어야 한다.

●SAR 탑재체의 반복주기가 짧을수록 보다 정확하고 유용한 데이터를 획득할 수 있다.

●그리고 가장 중요한 사항은 실제 운용시 동일한 운용모드(operating mode)에서 동일한 해상도와 관측폭(swath width)을 갖도록 운영되어야 한다는 것이다. 그러치 않을 경우 IFSAR 기법을 활용할 수 있는 데이터를 전혀 획득할 수 없다.

상기 요구조건 이외에 SAR 설계시 고려해야할 사항을 기술하면 다음과 같다.

산림이 많은 산악지형은 산림이 우거져 있으므로 IFSAR 기법을 적용하기가 매우 어려운 상황이다. 산림이 지형을 뒤덮고 있기 때문에 그 지역의 고도를 결정하기가 쉽지 않다. 또한 산림은 시간적인 상관관계에 매우 민감하며, 특히 반복되는 주기가 길어지면 획득되는 데이터의 상관관계가 거의 없어진다. 즉, 시간적인 상관관계는 반복주기가 짧을수록 좋아진다. 따라서 SAR 설계시 응용분야에 따른 데이터의 시간적인 상관관계를 고려해야 한다.

지형의 경사도가 가파름으로서 레이오버(layover), 섴도잉(shadowing), 혹은 베이스라인이 매우 큰 경우에 한 위상주기가 한 화소 내에서 이루어지는 등의 문제가 발생되어 정보를 손실할 수가 있다. 이러한 문제들은 여러 가지 방법으로 완화시킬 수 있다. 첫 번째로 적절한 베이스라인을 선택하는 것이고 두 번째로는 어센딩(ascending) 데이터에서 획득한 DEMs와 디센딩(descending) 데이터에서 획득한 DEMs를 결합시킴으로써 보상을 할 수 있다.

IFSAR용 데이터의 정확도는 잡음에 의해서 제한된다. 잡음이 적을수록 정확한 고도정보를 추출할 수 있으며, 이러한 영역에서의 잠재적인 절대 정확도는 약 3m이고 상대적인 정확도는 약 1(m)가 된다. 그러나 정확도는 잡음이 증가하면 감소된다. 한 신(scene)에 대한 평균 절대 고도에러는 10 - 15(m)가 되며, 이것은 코히어런스의 높고 낮은 지역을 망라한 전체 신에 대한 값이다. 또한 IFSAR 데이터는 1cm의 지형 고도변화에 대해서도 민감하게 반응한다. 잡음이 IFSAR 데이터의 정확도에서 중요한 위치를 차지하는 이유중의 하나는 잡음이 위상 복원(phase unwrapping) 성능에 영향을 끼치기 때문이다. 위상 복원 알고리즘의 성능은 잡음이 증가하면 감소한다.

III. 최대 베이스라인

IFSAR에서의 “베이스라인”은 영상을 획득하는 탑재체 궤도간의 떨어진 거리이다. 이 베이스라인은 여러 가지 방법으로 정의될 수 있다. 예를 들면, 교차 트랙거리(B_c) 혹은 경사거리 방향에 수직한 거리(d_1) 등이다. IFSAR 기법을 적용하기 위해서는 이 베이스라인이 최대 베이스라인 값보다 적어야만 하며, 그림 1에 이에 대한 설명이 나타나 있다.

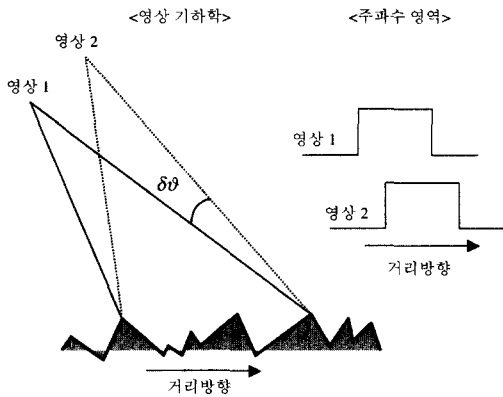


그림 1. 영상데이터의 베이스라인 증가에 따른 효과

궤도상의 거리 차가 증가하므로써 영상간의 입사각(incidence angle)의 차인 $\delta\theta$ 가 증가하게 되며, 그 결과 거리 차가 증가하므로써 산란되는 주파수의 분포가 달라지게 된다. $\delta\theta$ 가 작을수록 산란되는 주파수의 스펙트럼은 두 영상에서 비슷해지며,

이러한 경우를 코히어런트(coherent)하다고 한다. $\delta\theta$ 가 증가함에 따라 산란되는 주파수의 유사한 부분의 범위가 감소하며, 이 경우에 두 영상은 코히어런스가 적어지게 된다. 결과적으로 어떤 $\delta\theta_c$ 에서 두 영상의 산란된 주파수범위 내에 유사성이 없게 된다; 이러한 경우에 해당되는 궤도간의 거리 차가 최대 베이스라인이다. 성공적인 IFSAR를 위하여 $\delta\theta$ 가 적어야 한다는 요구조건은 서로 다른 관측점에서 획득된 영상은 IFSAR 쌍으로 사용될 수 없다는 것을 의미한다. 지상의 표면은 백색으로 산란되는 스펙트럼을 형성하는데 기여하는 공간 주파수의 요소로 생각할 수 있는 반복적인 특성을 가지고 있다. SAR 송신파장의 절반에 해당되는 길이를 가지고 있는 반복구조는 반사 파가 코히어런트하게 합성되므로 강한 레이더 반사파를 제공하게 된다. 이러한 효과를 Bragg Scattering이라고 하며, 그림 2에 설명되어 있다.

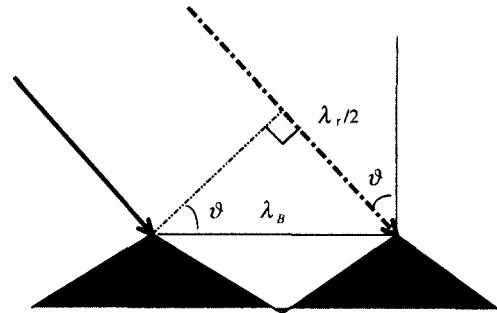


그림 2. Bragg Scattering 설명

그림 2에서 Bragg 파장(λ_B)은 아래 식(1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\lambda_B = \frac{\lambda_r}{2} \frac{1}{\sin \theta} \tag{1}$$

여기서 λ_r 은 레이더 파장이다. $K_r = \frac{2\pi}{\lambda_r}$ 를 대입하면, $K_B = K_r 2 \sin \theta$ 가 된다.

한 레이더에 대해 지상표면에서 Bragg 파장의 범위가 있으며, 그 범위는 아래 식(2)와 같다.

$$\Delta K_B = 2 \sin \theta \Delta K_r \tag{2}$$

여기서 ΔK_r 은 레이더 공간 주파수의 범위이다. IFSAR에 사용되는 2개의 영상 기하학에서 각각의

영상 기하학에 대한 서로 다른 Bragg Scattering 파장이 있으며, 아래 식(3)과 같이 두 영상간에 차이가 있다.

$$\delta K_B = 2K_r \delta(\sin \theta) = 2K_r \cos \theta \delta \theta \quad (3)$$

서로 다르게 산란된 공간 주파수 사이의 위상관계는 불규칙적이다. IFSAR를 하기 위해서는 2개의 영상이 어느 정도 동일하게 산란된 공간 주파수를 가지고 있어야만 한다. 그렇지 않으면, 두 영상간의 위상관계가 불규칙해지며, 인터페로그램에 잡음만 있게 된다. 그러므로 두 영상간의 Bragg Scattering 파장의 차가 한 영상의 Bragg Scattering 파장의 범위보다 적어야만 한다. 즉, $\delta K_B < \Delta K_B$ 이 되며, 따라서 $2 \cos \theta K_r \delta \theta < 2 \sin \theta \Delta K_r$ 의 관계가 성립한다. 이 식을 재정리하면 아래 식(4)와 같이 된다.

$$\delta \theta < \tan \theta \frac{\Delta K_r}{K_r} \quad (4)$$

그림 3은 R 이 경사거리 이고 d_1 가 한 영상 점에 대한 2개의 경사거리의 수직거리일 때의 각 $\delta \theta$ 를 나타내고 있다. 그림 3에서 $\tan \delta \theta = \frac{d_1}{R}$ 를 구할 수 있으며, $\delta \theta$ 가 적으면 $\tan \delta \theta \cong \delta \theta$ 가 된다. 파장에 대한 주파수를 대입하므로써 아래 식(5)를 구할 수 있다.

$$d_1 < R \tan \theta \frac{\Delta f}{f} \quad (5)$$

여기서 f 는 레이더 중심 주파수이며, Δf 는 펄스 밴드폭이다.

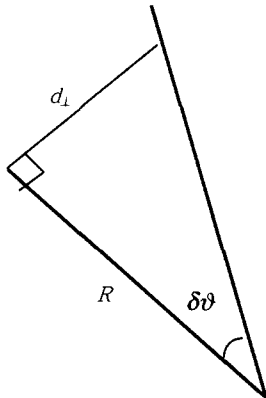


그림 3. 각 $\delta \theta$

베이스라인은 두 종류로 정의 될 수 있으며, 그 중의 한 종류가 2개의 영상 위치사이의 교차트래 거리이다. 이것을 구하는 수식은 위 식(5)에 아래 수식(6)을 대입하므로써 구할 수 있다.

$$f = \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{1}{\Delta f} = \frac{2R_r \sin \theta}{cF} \quad (6)$$

여기서 R_r 는 지상 거리방향 해상도이고 F 는 확산계수(broadening factor)이다. $d_1 = B \cos \theta$ 를 대입하여 최대 베이스라인 B_c 를 구하면 아래 식(7)과 같다.

$$B_c = \frac{\lambda R F}{2R_r \cos^2 \theta} \quad (7)$$

IV. 시뮬레이션 및 결과분석

E-SAR 체계는 과학적인 목적의 위성탑재 SAR로 Strip 모드(mode)로 운용되며, 입사각을 조정하여 영상획득 지역을 변경시킬 수 있다 : 즉, 입사각의 변화에 따라 영상획득 지역이 S1에서 S20까지 변하지만 관측폭은 40km로 동일하다. 아래 표 1에 E-SAR에 대한 주요변수가 제시되어 있으며, 이를 이용하여 최대 베이스라인에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과 및 분석내용은 아래와 같다.

표 1. E-SAR 주요변수

주요변수	단위	값	비고
운용모드		Strip	
위성 반복주기	일	21	
위성고도	km	700	
지구반경	km	6370	38° N
경사거리	km	717~990	
관측폭	km	40	
파장	m	0.032	
입사각	°	13~46	variable
거리방향 해상도	m	6~11	
해밍 웨이팅		0.7	

III장 식(7)에서 통상적인 해밍 웨이팅(Hamming weighting)은 0.7이고 이때의 F 는 1이며, 해밍 웨이팅이 없으면 $F = 0.8859$ 가 된다. ERS의 경우 이

식을 이용하여 B_c 를 구하면 1389(m)가 된다. E-SAR의 해밍 웨이팅은 0.7이고 F 는 1이므로 이 값을 대입하여 최종적인 E-SAR의 최대 베이스라인에 대한 방정식을 구하면 아래 식(8)과 같다.

$$B_c = \frac{\lambda R}{2R_s \cos^2 \theta} \quad (8)$$

표 2에 E-SAR에 대한 B_c 와 d_{\perp} 의 계산결과 값이 제시되어 있다. ERS의 경우 B_c 와 d_{\perp} 두 가지 모두 관측폭의 중앙(mid.)을 이용하여 계산하고 있으며, IFSAR 프로세싱을 하는 데는 주로 d_{\perp} 을 사용한다. E-SAR의 반복주기는 21일이므로 ERS의 35일 반복주기 보다 유용한 IFSAR용 데이터를 제공할 수 있다. 즉, 베이스라인의 관점에서만 보았을 때 유용한 데이터를 추출할 수 있는 가능성이 3배로 증가되며, 시간적인 간격이 보다 짧기 때문에 인터페로그램의 코히어런스가 좋아진다. 그러나 파장이 짧기 때문에 ERS에 비해 변화에 민감하다.

표 2에서 알 수 있는 바와 같이 E-SAR는 각 관측번호(swath number) 별로 고유한 최대 베이스라인을 가지고 있으므로 ERS의 경우와 다르게 하나의 최대 베이스라인을 정의할 수 없다. 예를 들면 ERS의 경우에 $d_{\perp} < 1055(m)$ 이고 E-SAR의 S10(mid)는 $d_{\perp} < 2349(m)$ 가 된다. 따라서 E-SAR의 S10(mid)에서 획득된 영상 쌍을 IFSAR에 사용하기 위해서는 d_{\perp} 의 값이 2349(m) 보다 적어야 한다. 실제 경험을 통하여 판단하여 보면 베이스라인의 길이가 이론적인 길이의 1/2 이하인 경우에 일반적으로 유용한 IFSAR 정보를 추출할 수가 있다. 그리고 E-SAR의 경우 입사각을 변화시켜 관측범위를 확대시킬 수 있는 장점이 있는 반면에 IFSAR 데이터를 획득하기 위해서는 동일한 관측번호(즉, 동일한 입사각)로 운용되어야 한다. ERS의 경우 최대 베이스라인이 이론적으로는 약 1300(m)인 반면에 실질적으로는 약 600(m)이다. 그러나 적당한 해상도의 고도정보를 추출하기 위해서는 고도 변화나 토지 이용을 위한 목적이 아니라 할지라도 지형지도를 제작하기 위해서는 베이스라인이 충분히 떨어져 있어야만 하며, 이 값은 지형 고도에 따라 달라지지만 통상적으로 이론적인 한계의 약 30%정도 된다. 위성탑재 SAR 영상쌍 간의 베이스라인을 구하기 위하여 통상적으로 궤도 전파 소프트웨어가 이용되며, 여기서는 위성의 궤도 경로를 정확히 그리기 위하여 알려진 궤도 상태벡터(orbit state

vector)를 사용한다. ERS의 경우에 이들 궤도 상태 벡터들은 3초마다 생성되며, 그 결과 약 10m의 정확도를 갖는다. 다른 방법으로는 GPS(Global Positioning System)를 이용하여 궤도정보를 획득할 수 있다.

또한 한반도 지역의 경우 산악지형이 많고 산림이 우거져 있으므로 획득한 데이터에 잡음이 많을 것으로 예상된다. 따라서 베이스라인 뿐만 아니라 잡음에 강한 위상 복원 알고리즘을 구현하는 것이 매우 중요하며, 필요시 위상 복원이 되지 않는 지역을 적당히 분리하여 처리해야 한다.

표 2. E-SAR의 B_c 와 d_{\perp} 계산결과 값

관측 번호	B_c (m)			d_{\perp} (m)		
	near	mid.	far	near	mid.	far
S1	1144	1317	1498	1113	1272	1435
S2	1257	1426	1603	1211	1362	1517
S3	1224	1374	1531	1167	1297	1430
S4	1412	1571	1739	1330	1464	1602
S5	1612	1782	1962	1498	1637	1780
S6	1826	2008	2201	1672	1817	1965
S7	2055	2251	2458	1853	2003	2158
S8	2301	2512	2734	2042	2198	2359
S9	2567	2792	3032	2237	2400	2568
S10	2566	2785	3018	2197	2349	2507
S11	2652	2873	3107	2229	2377	2530
S12	2791	3017	3257	2300	2447	2599
S13	1922	2075	2237	1553	1649	1748
S14	2114	2279	2453	1673	1773	1876
S15	2321	2498	2686	1799	1903	2011
S16	2544	2735	2937	1929	2038	2151
S17	2784	2989	3207	2066	2179	2296
S18	3043	3263	3497	2208	2326	2448
S19	3321	3558	3809	2356	2480	2607
S20	3619	3875	4145	2511	2639	2771

V. 결론

IFSAR 기법은 SAR의 위상정보를 이용하여 고도 데이터를 추출할 수 있는 유일한 방법으로 그 결과를 활용하여 표적복원 및 식별, 지형탐사 등 활용범위가 방대하다.

본 논문에서는 IFSAR 기법을 활용하기 위하여 SAR 설계시 필요한 요구조건과 주요 고려사항을 제시하였다. 그리고 주요 요소인 최대 베이스라인에

대한 수식을 유도하였으며, E-SAR에 적용하여 시물레이션을 수행하고 ERS 경우와 비교하여 분석하였다. 그 결과 E-SAR는 입사각을 변화시켜서 관측범위를 증가시킬 수 있다. 그러나 E-SAR의 최대 베이스 라인(d_{max})은 관측번호에 따라 1113m에서 2771m까지 변화함을 알 수 있다. 따라서 IFSAR 데이터를 획득하기 위해서는 동일한 관측번호로 동일한 지역을 관측하도록 운용되어야 한다. 즉, 운용목적에 따라 SAR를 적절히 운용하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 SAR를 운용시 IFSAR 기법을 유용하게 활용할 수 있도록 SAR 설계 초기단계에서 이것을 설계에 반영할 수 있는 필수적인 방안을 제안하였다.

현재 국내에서는 주로 IFSAR 기법의 결과를 이용하여 여러 분야에 응용하는 연구가 수행되고 있으나 IFSAR 기법에 대한 알고리즘 및 핵심기술에 대한 연구가 매우 미흡한 실정이므로 차후 이에 대한 연구가 단계적으로 수행되어야 할 것이다.

REFERENCES

[1] L. C. Graham, "Synthetic interferometer radar for topographic mapping", in *Proc. IEEE*, vol. 62, pp. 763-768, June 1974.

[2] Fabio Gatelli, Andrea Monti Guarnieri, etc., "The wavenumber shift in SAR Interferometry", *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 32, No. 4, July 1994.

[3] H. Zebker and R. M. Goldstein, "Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations", *J. Geophys. Res.*, vol. 91, pp. 4993-4999, Apr. 10, 1986.

[4] Fuk K. LI and R. M. Goldstein, "Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars", *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28. No. 1, January 1990.

[5] Floyd M. Henderson and Anthony J. Lewis, *Principles & Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing*, chapter 6, p359, third edition, volume 2, 1998.

[6] Didier Massonnet, "Satellite radar interferometry", *Scientific american*, p32-39, February 1997.

[7] Charles Elachi, *Spaceborne Radar Remote Sensing : Applications and Techniques*. New York : IEEE

press, ch. 1, 4, 5, 1988.

[8] Charles Elachi, T. Bicknell, Rolando L. Jordan, and Chialin Wu, "Spaceborne synthetic aperture imaging radars : Applications, techniques, and technology", in *Proc. IEEE*, vol. 70. no 10, pp. 1174-1209, Oct. 1982.

홍 인 표(In-Pyo Hong)
한국통신학회 논문지 Vol. 26, No. 9B,
2001년 9월 참조

정희원

박 한 규(Han-Kyu Park)
한국통신학회 논문지 Vol. 26, No. 9B,
2001년 9월 참조

정희원