

차분 간섭 기법을 이용한 지표면 수분함유량 변화 탐지

Remote Sensing of Soil Moisture Change Using a Differential Interferometry Technique

박 신 명 · 오 이 석

Sin-Myeong Park · Yisok Oh

요 약

본 논문에서는 차분 간섭 기법(differential interferometry)을 이용하여 지표면의 높이 변화를 탐지하고, 이를 이용하여 지표면 수분함유량의 변화를 알아낸다. 본 연구에서는 COSMO-SkyMed SAR 영상을 이용하여 DInSAR (DiFferential Interferometric SAR) 기법을 확인한다. 침투 깊이는 지표면 수분함유량에 따라 달라지며, 그에 따라 수신하는 신호의 위상이 변하게 된다. 지표면의 높이와 그 변위는 두 수신 신호의 위상차를 이용하는 레이더 간섭 기법(radar inteferometry)을 통하여 탐지할 수 있다. 변위 변화를 분석하기 위해 동일 지역의 영상 3장 중 한 장을 기준 영상(reference image)으로 사용한다. 동일 지역의 기준 영상과 나머지 두 영상은 각각 차분 간섭 기법으로 처리한다. 이 차분 간섭 기법을 검증하기 위해 실제 영상 획득 지역의 수분함유량을 측정하였다. 측정 한 수분함유량을 이용하여 지표면의 침투 깊이를 계산하고, 차분 간섭 기법을 통하여 얻은 지표면 변위 정보와 비교 분석한다.

Abstract

This paper presents a differential interferometry technique for soil moisture change detection by measuring surface-height variation. COSMO-SkyMed SAR images were used to verify the DInSAR(differential interferometric SAR) technique. The soil penetration depth changes according to soil moisture, that causes phase change of the received signal. The height of soil surface and its displacement can be detected by a radar interferometry technique using phase difference of two received signals. To retrieve displacement variation, one of three SAR images is used as a reference image. Reference image and other two images are processed by the differential interferometry technique in the same area. The soil moisture was measured for the test sites to verify the DInSAR technique. The penetration depth is calculated by using the in-situ measured soil moisture data and it is compared with the displacement values acquired by the DInSAR technique.

Key words : Soil Moisture, Interferometry SAR, Penetration Depth, DInSAR

I. 서 론

최근 국내외로 완전 편파 SAR(Synthetic Aperture Radar) 시스템의 개발 및 운용이 늘어나면서 위성

SAR 시스템을 이용한 원격 탐사 분야의 활용도 늘어나고 있다. SAR 시스템 기반 기술 중 SAR 영상을 이용하여 지표면의 높이, 변위 등을 알아낼 수 있는 SAR 간섭 기법(Interferometry SAR: InSAR) 기반 기

홍익대학교 전자정보통신공학과(Department of Electronic Information and Communication Engineering, Hongik University)

· Manuscript received October, 9, 2012 ; Revised February 8, 2013 ; Accepted March 12, 2013. (ID No. 20121009-108)

· Corresponding Author : Yisok Oh (e-mail : yisokoh@hongik.ac.kr)

술도 많이 활용되고 있다. SAR 간섭 기법은 지진이나 화산 활동 등에 의한 지표면 변화 탐지에 적합한 수단이며, 차분 간섭 기법(Differential Interferometry SAR: DInSAR)은 자연적인 지각운동으로 인한 지표면의 변형이나 인공적인 요인에 의한 지표면의 미묘한 변형을 추정하는데 성공적으로 적용되어 왔다^[1].

SAR 간섭 기법은 두 SAR 신호의 복소 상관 계수(complex correlation coefficient)를 이용하여 수치 표고 모델(digital elevation model)과 지표면 정보를 추출하는 기법으로 두 신호의 위상 차이에 의해 결정된다.

토양에서의 전파 산란은 지표면의 유전율과 지표면 거칠기에 의해서 결정되며, 지표면의 유전율은 지표면 수분 함유량에 의해 결정된다^[2]. 지표면의 유전율에 따라 전파의 침투 깊이(penetration depth)가 달라지며, 위성 SAR로부터 지표면에서 반사되는 지점까지의 거리가 달라진다. 전파의 위상은 거리에 따라 달라지며, 위상 차이를 이용하여 지표면의 고저 및 변위에 대한 정보를 얻는 SAR 간섭 기법의 경우, 침투 깊이에 따라 다른 정보를 도출하게 된다.

본 논문에서는 SAR 간섭 기법을 이용하여 지표면 정보를 추출하고, 지표면의 수분함유량에 따른 변화를 알아낸다. 지표면 정보 변화를 분석하기 위해 동일한 수원 지역을 촬영한 X-밴드 대역의 SAR 인 COSMO-SkyMed SAR 영상 3장을 이용하였으며, 3장 중 하나를 기준 영상(reference or master image)으로 정하여 나머지 2장과 각각 SAR 간섭 기법을 이용하여 지표면 정보를 추출하였다. 또한, SAR 영상 획득 당일 수원 지역의 지표면 변수(ground truth) 데이터인 수분함유량, 지표면 거칠기를 측정하였다. 지표면 수분함유량을 이용하여 지표면 침투 깊이를 계산하고, SAR 간섭 기법을 이용하여 추출한 지표면 변위 정보와 비교 분석한다.

II. 이론적 배경

2-1 SAR 간섭 기법과 차분 간섭 기법

SAR 간섭 기법과 차분 간섭 기법의 일반적인 기하학적 구성은 그림 1과 같다. 위성 위치(M, S_1, S_2)에 의한 안테나 배열, 두 안테나 사이의 거리 기선거리 B (baseline), 기선이 지표면과 이루는 방위각 α 그리

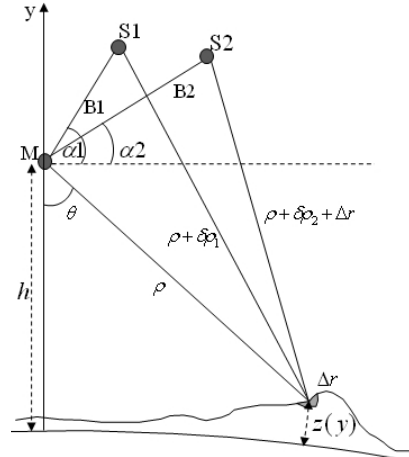


그림 1. 차분 간섭 기법 구성도
Fig. 1. Geometry of differential interferometry SAR.

고 기준면으로 입사되는 전파의 입사각 또는 관측각 θ 로 표현할 수 있다. 동일 지역에 대해 위성 M 과 S_1 에서 수신한 신호로부터 복소 간섭도(complex interferogram)를 얻을 수 있다.

두 위성에서 M 과 S_1 에서 지표면까지의 거리를 ρ 와 $\rho + \delta\rho_1$ 로 놓았을 때, 두 안테나의 위상 차이는 아래처럼 표현된다.

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \delta\rho_1 \tag{1}$$

여기서, λ 는 안테나의 파장, $\delta\rho_1$ 는 두 위성관측 위치에 따른 지표면까지의 거리 차이를 나타낸다. 영상으로부터 얻은 위상 차이 ϕ 와 위성의 위치정보, 기선거리 B , 관측각 θ 등을 이용하여 고도 y 에 따른 지표면의 높이 z 를 구할 수 있다^[3].

$$z(y) = h - \frac{\left(\frac{\lambda\phi}{2\pi}\right)^2 - B^2}{2\left[B\sin(\alpha - \theta) - \frac{\lambda\phi}{2\pi}\right] \cos\theta} \tag{2}$$

간섭 기법처리의 첫 단계로 영상복원 과정과 더불어 각 영상의 비행 궤적 차를 고려해 부 영상(slave image)을 기준 영상에 정합시키는 과정이 필요하다. 수치 표고 모델 및 지표 변위를 추출하기 위한 일련의 자료 처리 과정으로 두 개의 SAR 영상 간의 정합, 부 영상의 재배열, 간섭도 필터링, 위상 unwrapping 등은 주요한 자료 처리 단계이다.

두 SAR 자료가 취득되는 사이에 지표 변위 Δr 이 발생되면, 간섭도에는 지표면의 높이와 지표의 변화에 의한 위상이 함께 기록된다. 차분 간섭 기법의 기본 개념은 간섭도에서 지표면에 의한 위상을 제거함으로써 변위에 의한 위상 효과를 분리해내는 것이다. M 과 S_1 에 의한 첫 번째 간섭쌍으로부터 얻은 수치 표고 모델과 위성 궤도 정보, 기선 거리 정보를 이용하여 위상 시뮬레이션을 하여 M 과 S_2 에 의한 두 번째 간섭쌍에 있는 지형에 의한 위상을 제거할 수 있으며, 지표 변위에 의한 위상은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (3)$$

지표면의 의한 위상을 제거하기 위한 차분 간섭 기법으로는 수치 표고 모델을 이용하는 방법^[4]과 세개의 SAR 영상 데이터를 이용하는 three-pass 방법^[5]이 있다.

2-2 지표면 수분함유량과 침투 깊이

자연적인 흙 표면의 수분함유량 특성은 깊이에 따라 다양한 상태를 가지고 있기^[6] 때문에 깊이에 따라 유전율 값이 변화한다. 전파의 침투 깊이는 주파수와 유전율 값에 따라 달라진다. 흙 속에 있는 물의 양 때문에 젖은 땅과 마른 땅의 유전율은 큰 차이가 나며, 침투 깊이 또한 많은 차이를 보인다^[7]. 지표면의 수분함유량으로부터 침투 깊이를 계산하기 위해 참고문헌 [8]의 Table 2를 이용하여 깊이에 따른 유전율을 구하였다. 깊이에 따른 유전율을 이용하여 투과계수와 반사계수를 계산한다^[9]. 여기서 전파의 침투 깊이는 “지표면 투과 후 전파의 세기가 e^{-1} (i.e., 약 0.368)으로 감쇠했을 때의 깊이”로 정의된다^[10]. 다층 구조에서의 투과 계수와 반사 계수는 참고 문헌 [9]를 참고하여 구할 수 있다.

III. SAR 영상을 이용한 지표면 변위 정보 추출

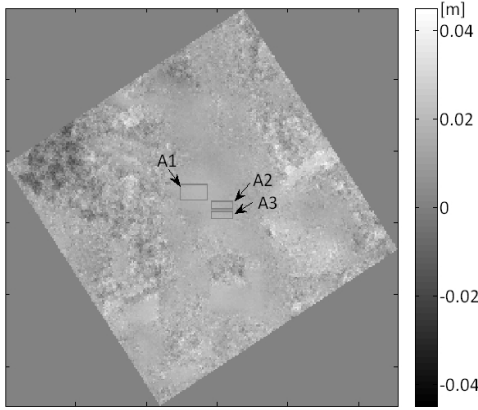
실제 위성 SAR 데이터로부터 추출한 지표면 변위 정보와 측정된 수분함유량으로부터 계산한 침투 깊이를 비교 연구하기 위해서, 앞선 SAR 간섭 기법

을 실제 위성 SAR 데이터에 적용하였다. 이를 위해 사용된 위성 SAR 데이터는 COSMO-SkyMed의 1A-SCSB 급으로 처리된 Stripmap mode data를 적용하였다.

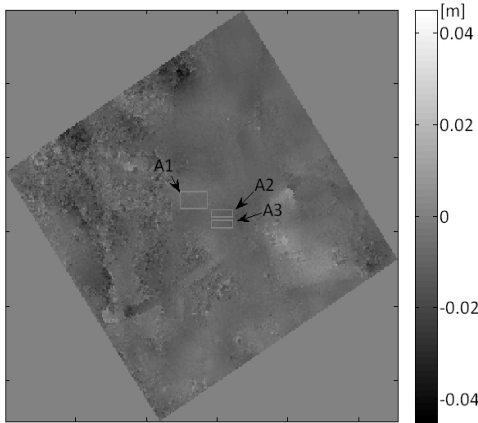
SAR 간섭 기법을 처리하기 위해 비행 궤적이 서로 다른 15일 간격의 동일한 입사각 정보를 갖는 3장의 SAR 영상을 이용하였다. 젖은 땅과 마른 땅을 비교하기 위해 영상 촬영 날짜와 그 전 날의 강우량을 조사하여 1장의 영상은 비가 온 날(10월 15일), 나머지 2장의 영상은 비가 오지 않은 날(10월 31일, 11월 15일)로 하여 3장의 영상을 정하였다. 2011년 10월 31일을 기준영상으로 정하고, 10월 15일과 11월 15일 영상을 부 영상으로 정하여 10/31 & 10/15, 10/31 & 11/15 영상 쌍에 대해 각각 SAR 간섭 기법을 적용하였다. 작물이나 나무, 건물 등 외부 요인에 의한 오차를 줄이기 위해 수원에 위치한 국립식량원 발작물 연구소의 맨 땅을 기준으로 하여 SAR 간섭 기법을 적용하였다. 그리고 차분 간섭 기법을 적용하기 위해 NASA에서 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)을 통해 구축한 수치 표고 모델을 이용하였다. 위상 unwrapping은 MCF(Minimum Cost Flow) 기법을 이용하였으며, 위상 unwrapping 시 유수(residue)를 계산하면서 발생하는 오차를 줄이기 위해 수원에 위치한 공군 비행장을 기준점으로 정하여 처리하였다.

그림 2는 발작물 연구소를 포함하는 수원 지역의 수직 변위 정보로 그림 2에서 10/31 & 11/15의 변위 정보를 보면 평균적으로 모든 지역의 변위가 0 m에 가까운 것을 볼 수 있으며, 그와는 반대로 10/31 & 10/15의 변위 정보를 보면 평균적으로 모든 지역의 변위가 +0.02 m에 가까운 것을 볼 수 있다. 그림 2에서 발작물 연구소의 맨 땅의 수직 변위 정보만 추출하여 비교해 보았다(표 1 참조).

이를 통해 10/31 & 11/15의 경우, 두 날의 지표면의 수분함유량의 차이가 크지 않으며, 차분 간섭 기법에서 사용한 수치 표고 모델에 비해 지표면의 높이가 낮게 나온다는 사실을 알 수 있다. 이에 반해 10/31 & 10/15의 경우, 두 날의 지표면의 수분함유량의 차이가 크며, 차분 간섭 기법에서 사용한 수치 표고 모델에 비해 지표면의 높이가 높게 나온다는 사



(a) 10월 31일과 10월 15일의 변위 정보
(a) Displacement on 31 Oct. and 15 Oct.



(b) 10월 31일과 11월 15일의 변위 정보
(b) Displacement on 31 Oct. and 15 Nov.

그림 2. 수원 지역의 수직 변위 정보
Fig. 2. Vertical displacement maps of the test area.

표 1. 맨 땅의 변위 정보
Table 1. Displacement of bare soil.

영상 날짜	밭	변위 정보(m)
10/31 & 10/15	A1	+0.0181
	A2	+0.0173
	A3	+0.0171
10/31 & 11/15	A1	-0.0097
	A2	-0.0045
	A3	-0.0050

실을 알 수 있다. 이를 통해 SAR 영상을 통해 지표면의 수분함유량의 변화를 탐지할 수 있다는 사실을 알 수 있다.

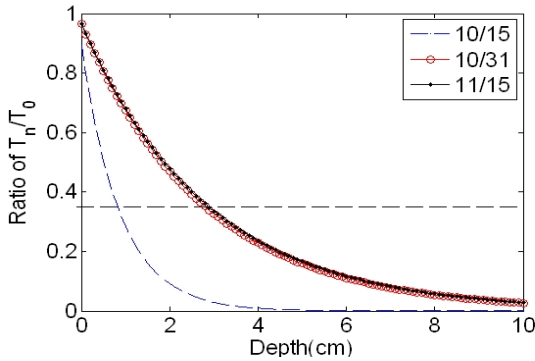
IV. 침투 깊이와의 비교 및 분석

전파의 침투 깊이는 토양 수분 함유량과 주파수의 함수이며, 수분 함유량에 따라 변화의 폭이 넓다. 위성 SAR 데이터로부터 추출한 지표면의 변위 정보를 검증하기 위해 실제 SAR 촬영 지역에서 촬영 당일 지표면 변위를 측정하였다. 측정 지역의 토양 수분 함유량을 측정하기 위해서, 깊이 3 cm와 5 cm에서 수분함유량 측정 센서(ProCheck, EC-5, DECA-GON DEVICES 社)를 이용하여 데이터를 획득했다. 각 날짜에 대해 데이터를 측정하였으며, 10월 15일은 5개, 10월 31일은 20개, 11월 15일은 25개의 샘플을 측정하였다. 10월 15일은 SAR 촬영 전 날과 당일 모두 비가 온 경우이며, 10월 31일과 11월 15일은 전 날과 당일 모두 비가 오지 않은 경우이다. 10월 31일과 11월 15일의 수분함유량은 비슷한 수치임을 확인할 수 있다. 표 2는 측정된 지표면의 물의 부피와 토양의 부피 비인 부피 수분함유량(cm^3/cm^3)을 나타낸다.

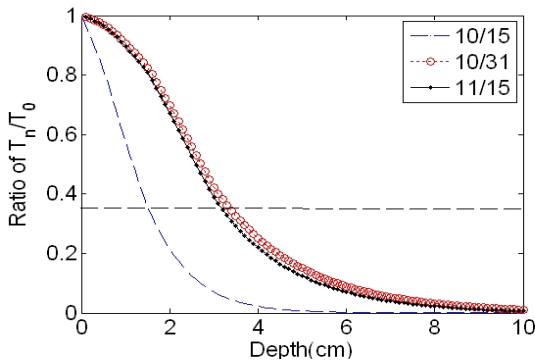
3 cm와 5 cm 데이터의 평균값을 보간법을 이용하여 10 cm를 0.1 cm 간격으로 나누어 총 100층의 깊이 별 수분함유량 데이터를 생성하였다. 보간법을 이용하여 생성 수분함유량 데이터를 이용하여 각 맨 땅 별로 침투 깊이를 계산하였다. 그림 3에서 약 0.4 부분의 수평으로 (---) 표시한 부분은 전파의 침투 깊이가 e^{-1} (i.e., 약 0.368)을 나타내며, 수직축은 지표면 깊이이고, 수직축은 전파의 감쇠 정도(T_n/T_0)이다. 여기서 T_0 는 공기에서 지표면으로 총 투과되는 전파의 양을 나타내며, T_n 은 100개의 층 중 n 번

표 2. 측정된 지표면의 수분 함유량
Table 2. Measured soil moisture.

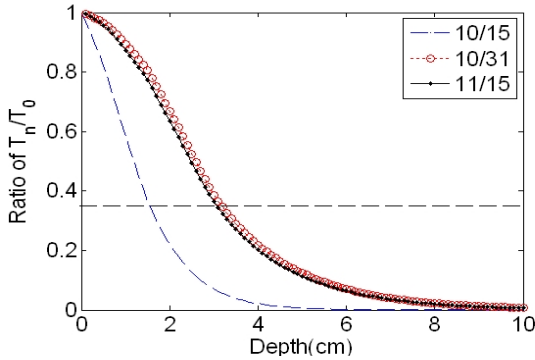
날짜	밭	지표면 수분 함유량(cm^3/cm^3)						평균
10/15	A1	0.269	0.249	0.199	...	0.235	0.222	0.235
	A2	0.198	0.246	0.160	...	0.143	0.188	0.187
	A3	0.151	0.168	0.278	...	0.170	0.144	0.182
10/31	A1	0.082	0.078	0.100	...	0.038	0.042	0.081
	A2	0.062	0.045	0.093	...	0.035	0.021	0.040
	A3	0.026	0.036	0.042	...	0.076	0.092	0.044
11/15	A1	0.004	0.049	0.079	...	0.106	0.092	0.080
	A2	0.064	0.044	0.038	...	0.026	0.051	0.043
	A3	0.048	0.037	0.085	...	0.096	0.054	0.051



(a) 맨 땅 A1
(a) Bare soil A1



(b) 맨 땅 A2
(b) Bare soil A2



(c) 맨 땅 A3
(c) Bare soil A3

그림 3. 맨 땅 구역 별 계산한 침투 깊이
Fig. 3. Calculated penetration depth for bare soil surface

째 층을 투과하는 전파의 양을 나타낸다.

10월 31일을 기준으로 하여 각 침투 깊이를 비교하였다. 지표면의 수분함유량을 이용하여 계산한 침투 깊이와 위성 SAR 영상으로부터 얻은 변위 데이

표 3. 수분함유량을 이용하여 계산한 침투 깊이
Table 3. Calculated penetration depth by using measured soil moisture.

날짜	밭	침투 깊이(m)	기준 날짜와의 차이(m)
10/15	A1	0.009	+0.019
	A2	0.016	+0.018
	A3	0.016	+0.016
10/31	A1	0.028	-
	A2	0.034	-
	A3	0.032	-
11/15	A1	0.029	-0.001
	A2	0.032	+0.002
	A3	0.031	+0.001

터를 비교해 보면, 10월 31일과 10월 15일의 경우, 맨 땅 A1에서 침투 깊이 차는 +0.019 m, 변위 데이터는 +0.0181 m, A2에서 각각 +0.018 m, +0.0173 m, A3에서 +0.016 m, +0.0171 m의 값을 갖는다. 10월 31일과 11월 15일의 경우, 맨 땅 A1에서 침투 깊이 차와 변위 데이터는 각각 -0.001 m와 -0.0097 m이며, A2에서는 +0.002m, -0.0045 m, A3에서는 +0.001 m, -0.005 m의 값을 갖는다. 측정된 수분함유량을 이용하여 계산한 전파의 침투 깊이와 SAR 영상을 이용하여 추출해낸 지표면의 변위 정보의 변화는 유사성을 보이며, 이를 통해 지표면의 수분함유량 변화를 탐지할 수 있음을 보여준다.

맨 땅 A1에서 10월 31일과 10월 15일의 경우보다 오차의 범위가 큰 것을 확인할 수 있다. 이 오차는 지표면에서 자라는 목표 지역의 비균질성(작물에 의한 영향)으로 볼 수 있다. 10월 15일은 A1, A2, A3 모두 작물이 없는 순수한 맨 땅이었으며, 10월 31일과 11월 15일은 밀 싹이 일부 자라고 있었다. 그러나 10월 31일의 경우, 맨 땅 전체 면적에 비해 밀이 자라는 부분은 무시할 수 있을 정도였으며, 11월 15일의 경우, 밀의 면적, 샘플 당 앞의 개수 등이 10월 31일에 비해 증가했으며, 맨 땅 전체 면적에 비해 밀이 자라는 부분이 넓어진 것을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 지표면의 수분함유량 변화를 탐지하기 위해 차분 간섭 기법을 수행하였으며, 차분 간

섭 기법을 통해 얻은 지표면의 변위 데이터와 측정을 통해 획득한 수분함유량을 이용하여 계산한 침투 깊이를 비교하여 정확도 검증을 수행하였다. 맨 땅의 경우, 변위 데이터와 침투 깊이가 차는 오차 범위 10 % 이내로 비교적 정확한 결과를 얻었으며, 이를 통해 차분 간섭 기법을 통해 지표면의 수분함유량 변화를 탐지할 수 있다는 사실을 확인할 수 있었다. 그리고 이 방법으로 지표면 수분함유량의 변화 탐지는 가능하나, 정확한 수분함유량 탐지는 어려우므로, 아래에 제시된 방법으로 기준 수분함유량을 이용하여 수분함유량을 추출할 수 있다.

(1) 기준 정보 즉 어느 한 날의 수분함유량을 측정을 통해 수집해야 한다.

(2) SAR 영상에서 후방 산란 계수를 추출하여 지표면의 수분함유량을 추출해내는 inversion 알고리즘을 이용하여 어느 한 날의 수분함유량을 기준으로 잡을 수 있다.

차분 간섭 기법을 이용하는 경우, 두 날의 수분함유량 변화를 탐지할 수 있으므로 이후에 계속적인 연구를 통해 정확한 수분함유량 탐지에 대한 방법을 개선해야 할 것이다.

감사의 글

저자들은 지표면 변수 데이터 획득에 도움을 준 홍익대학교의 권순구, 주정명에게 감사한다.

참 고 문 헌

- [1] C. W. Lee, S. W. Kim, and J. S. Won, "Land surface soil moisture effect on DInSAR", 대한원격탐사학회 2004년도 Proceedings of ISRS 2004.
- [2] Y. Oh, K. Sarabandi, and F. T. Ulaby, "Semi-empirical model of the ensemble-averaged differential mueller matrix for microwave backscattering from bare soil surfaces", *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.*, vol. 40, no. 6, pp. 1348-1355, Jun. 2002.
- [3] N. Madsen, H. A. Zebker, and J. Martin, "Topography mapping using radar interferometry: processing techniques", *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.*, vol. 31, no. 1, pp. 246-256, Jan. 1993.
- [4] D. Massonnet, M. Rossi, E. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl, and T. Rabaute, "The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry", *Nature* 364, pp. 138-142, Jul. 1993.
- [5] H. A. Zebker, P. Rosen, and R. Goldstein, "On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake", *J. Geophys. Res.*, vol. 99, pp. 19617-19634, 1994.
- [6] F. T. Ulaby, P. P. Batlivala, and M. C. Dobson, "Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture", *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.*, vol. GE-16, pp. 286-295, Oct. 1978.
- [7] E. G. Njoku, D. Entekhabi, "Passive microwave remote sensing of soil moisture", *J. Hydrol.*, pp. 101-129, 1996.
- [8] M. T. Hallikainen, F. T. Ulaby, M. C. Dobson, M. A. El-Rayes, and L. -K. Wu, "Microwave dielectric behavior of wet soil-part I: Empirical models and experimental observations", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. GE-23, no. 1, pp. 25-34, Jan. 1985.
- [9] J. A. Kong, *Electromagnetic Wave Theory*, John Wiley & Sons, 1990.
- [10] M. Nolan, D. R. Fatland, "Penetration depth as a DInSAR observable and proxy for soil moisture", *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.*, vol. 41, no. 3, pp. 532-537, Mar. 2003.

박 신 명



2011년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2013년 3월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
[주 관심분야] 마이크로파 원격 탐사, SAR 영상 분석

오 이 석



1982년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)
1988년 12월: University of Missouri-Rolla, 전기 및 컴퓨터공학과 (공학석사)
1993년 12월: University of Michigan, Ann Arbor, 전기공학 및 컴퓨터공학과 (공학박사)
1997년~2001년: 대한원격탐사학회 상임이사
2001년~2008년: 한국전자과학회 상임이사
2006년~2008년: Chair, IEEE GRS Korea Chapter
2009년~2010년: Stanford University 방문교수
1994년~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수
2009년~현재: IEEE Fellow
[주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, 레이더, 안테나