

지표면 매개변수 추정을 위한 경험상의 모델 활용 Application of Empirical Models for Estimation of Surface Parameters

양민실^{1*}, 문우일^{1,2}

Min-Sil Yang^{1*}, and Wooil M. Moon^{1,2}

1. 서울대학교 지구환경과학부 인공위성 지구물리 연구실

1. ESI³ Laboratory, School of Earth and Environmental Sciences (SEES),
Seoul National University (msyang@eos1.snu.ac.kr, wmoon@eos1.snu.ac.kr)

2. Geophysics, The University of Manitoba (wmoon@cc.umanitoba.ca)

요 약

이 논문은 나대지에서 획득한 polarimetric SAR 자료의 후방 산란 계수(backscattering coefficient) 분석을 위한 surface parameters 추출 및 forward mapping에 대하여 서술하였다.

Surface parameter는 토양의 거칠기(ks), 수분 함량(m_v), 유전 상수(ϵ_m) 등이 포함되어 있고, 유전 상수의 추정을 위하여 0.3-1.3GHz 구간의 자료를 기반으로 제안된 N. R. Peplinski의 경험상의 모델(Empirical Model) 알고리즘을 사용하였다. 추정된 surface parameter는 polarimetric SAR 자료의 산란 현상을 특징짓기 위한 forward mapping의 입력 값으로 이용되었으며, scattering model로 Oh의 경험상의 모델을 사용하였다. 각각의 surface parameter ks , θ , m_v 는 Oh 모델을 이용한 시뮬레이션을 통하여 레이더 후방 산란 계수에 미치는 영향에 대하여 조사되었다.

I. 서론

마이크로파를 이용한 원격탐사에서 지표면의 산란계수를 결정하는 요소에는 입사각 θ , 파장 λ , 안테나의 편광상태 등의 Wave Parameter와 복소 유전 상수 (complex dielectric constant) ϵ_m , 토양의 수분 함량 (volumetric soil moisture content) m_v , 토양의 거칠기 (surface roughness) s 등과 같은 매질의 물리적/전기적 특성을 나타내는 Surface Parameter가 있다. 송수신의 위치가 동일한 monostatic한 경우의 imaging radar system에서는 마이크로파의 지표상의 산란 현상을 이해하기 위하여 레이더 후방 산란 계수(backscattering coefficient)가 이용되고 있으며 후방 산란 계수와 레이

더 파라미터와의 관계를 규명하기 위한 산란 모델 (Scattering Model)에 관한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 그 예로는 Small Perturbation Model (SPM), Geometric Optics Model (GO), Physical Optics Model (PO) 등과 같이 파동 방정식으로부터 출발하여 ks ($k=2\pi/\lambda$, k : wave number and s : RMS height), correlation length /과 후방 산란 계수와 의 관계를 이론적으로 규명한 이론상의 모델 (Theoretical Model)과, Oh [1992], Dubois [1995] 등이 scatterometer 와 imaging radar 등의 관측 자료 분석을 바탕으로 제시한 경험상의 모델(Empirical Model)이 있다. 하지만 이론상의 모델은 까다로운 제약 조건으로 인하여 매우 제한된 범위의 자료에 적용된다는 단점을 가지고 있으며, 현

장 관측 자료 (ground truth data)를 이용하여 surface parameter와 backscattering coefficient와의 상관관계를 규명한 경험상의 모델은 관측 자료의 지역적 특수성 및 실험의 제약성으로 인하여 그 모델을 일반화시키기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 따라서 나대지(bare soil surface)에서 마이크로파의 산란 현상의 규명하는 연구가 현재까지 활발하게 진행되고 있는 상황이다.

이번 연구에서는 식물의 간섭현상이 일어나지 않는 나대지에서의 마이크로파 산란 현상을 이해하기 위하여 경험상의 산란 모델 (empirical scattering model)을 이용한 후방 산란 계수 추정이 수행되었다. Surface parameter가 후방 산란 계수 값의 변화에 미치는 영향에 대하여 조사하기 위한 사전 작업으로 2000년 9월 30일에 실시한 PACRIM-II Korea Campaign의 일환으로 획득된 ground truth 자료를 사용하여 ks , kl , m_v , $\rho(\xi)$ 등의 surface parameter를 도출하였다. N. R. Peplinski et al. [1995]가 M. C. Dobson et al. [1985]의 연구를 기반으로 개발한 비선형 알고리즘을 사용하여 유전 상수 ϵ'_m 와 ϵ''_m 를 도출하였다. 산란 모델 (scattering model)의 forward mapping을 위하여 Michigan 대학의 Oh가 1992년 발표한 경험상의 모델을 사용하였으며 Oh's empirical scattering model을 이용하여 Surface parameter ks , kl , m_v 가 마이크로파 산란 현상에 미치는 영향을 각각의 surface parameter 별로 시뮬레이션 하였다.

II. 연구의 이론적 배경

1. Surface Parameter Estimation

나대지의 통계적인 변수에는 토양 표면의 수평 거칠기를 나타내는 RMS height s , Correlation function $\rho(\xi)$, correlation length l , 토양의 수분 함량

m_v 등이 있다.

$$s = (\overline{z^2} - \bar{z}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\rho(x) = \frac{\int z(x)z(x+\xi)dx}{\int z^2(x)dx} \quad (2)$$

복소 유전 상수 (complex dielectric constant)는 토양의 유전적 성질을 나타내며 수분 함량과 밀접한 관계를 가지고 있다. 본 연구의 유전 상수 추정에 사용된 N. R. Peplinski의 알고리즘은 실험 자료를 바탕으로 개발한 경험상의 모델 (Empirical Model)로써, 이 모델은 1985년 M. C. Dobson et al. [4]이 1.4-18GHz 구간의 유전 상수 값을 규명한 알고리즘에서 확장되어 0.3-1.3 GHz 구간의 마이크로파 영상 자료에 적합한 경험상의 모델이다. D. Yang et al. [2000]의 모델이 유전상수 추정을 위하여 토양의 수분 함량 만을 고려해주는 반면, Peplinski의 모델은 토양의 sand/clay 함유율 및 수분 함량, 관측 온도, 공극률 등까지 고려하기 때문에 유전 상수에 영향을 미치는 미세한 변이요소까지 제어해 줄 수 있다는 장점을 가지고 있다. 복소 유전 상수(3)는 permittivity (ϵ'_m)과 토양의 loss tangent (ϵ''_m)로 구성되어 있으며 그 표현은 식 (4), (5)와 같다. ϵ'_m 와 ϵ''_m 의 추정을 위한 입력 변수가 표 1.에 정리되어 있다.

$$\epsilon_m = \epsilon'_m - j\epsilon''_m \quad (3)$$

$$\epsilon'_m = \left[1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\epsilon_s^\alpha) + m_v^{\beta'} \epsilon_{fv}^{\alpha'} - m_v \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (4)$$

$$\epsilon''_m = \left[m_v^{\beta''} \epsilon_{fv}^{\alpha''} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (5)$$

2. Oh's Empirical Scattering Model

Oh의 경험상의 모델은 Michigan 대학의 LCX POLARSCAT을 이용하여 획득한 ks 와 m_v 등의 surface parameter와 레이다 후방 산란 계수와의 관계를

truck-mounted L-, C-, X-band scatterometer 자료를 이용하여 정의하였다. Oh 모델은 레이더 후방 산란 계수의 편광 비(polarization ratio) p (7)와 q (8)를 기반으로 토양의 ks , kl , m_v 값과 산란 계수와의 관계를 도출하였으며 데이터 제약 조건은 다음과 같다:

$$0.1 < ks < 6.0$$

$$2.6 < kl < 19.7$$

$$0.09 < m_v < 0.3.$$

ks 와 ϵ_m ((6)을 통하여 적용)을 바탕으로 도출된 co-polarized ratio p 와 cross-polarized ratio q 는 함수 g (9)와 함께 hh -, vv -, hv - 편광의 후방 산란 계수 σ_{HH}^0 , σ_{VV}^0 , σ_{HV}^0 추정식의 입력 값이 된다.

$$\Gamma_0 = \left| \frac{1 - \sqrt{\epsilon_m}}{1 + \sqrt{\epsilon_m}} \right|^2 \quad (6)$$

$$\sqrt{p} = \sqrt{\frac{\sigma_{hh}^0}{\sigma_{vv}^0}} = 1 - \left(\frac{2\theta}{\pi}\right)^{1/3} \Gamma_0^{1/3} e^{(-ks)} \quad (7)$$

$$q = \frac{\sigma_{hv}^0}{\sigma_{vv}^0} = 0.23 \sqrt{\Gamma_0} (1 - e^{(-ks)}) \quad (8)$$

$$g = 0.7(1 - \exp(-0.65(ks)^{1.8})) \quad (9)$$

다음의 식 (10), (11), (12)은 Oh가 발표한 θ , ϵ_m , ks 에 따른 σ_{HH}^0 , σ_{VV}^0 , σ_{HV}^0 의 값이다.

$$\sigma_{vv}^0(\theta, \epsilon_m, ks) = \frac{g \cos^3 \theta}{\sqrt{p}} (\Gamma_v(\theta) + \Gamma_h(\theta)) \quad (10)$$

$$\sigma_{hh}^0(\theta, \epsilon_m, ks) = g \sqrt{p} \cos^3 \theta (\Gamma_v(\theta) + \Gamma_h(\theta)) \quad (11)$$

$$\sigma_{hv}^0(\theta, \epsilon_m, ks) = q \sigma_{vv}^0(\theta, \epsilon_m, ks) \quad (12)$$

III. 사례 연구

NASA/JPL AirSAR PACRIM-II Korea Campaign의 일환으로 획득한 multi-frequency polarimetric SAR (Synthetic Aperture Radar) L-band (frequency: 1.26GHz, wavelength: 23cm), P-band (frequency: 0.45GHz, wavelength:

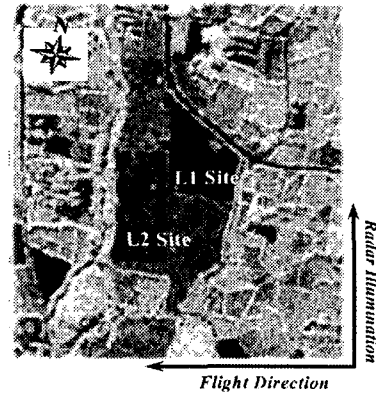


그림 1. 연구 지역의 Polarimetric SAR 영상

67cm) 영상과 제주농업시험장에서 획득한 ground truth 자료를 이용하여 RMS height s , correlation length l , autocorrelation function $\rho(\xi)$, rms slope m 등의 surface parameter가 계산되었고 그 결과는 표 2.와 같다. 네 개의 관측 값 중 L1 site NS 방향($s=1.33457$)이 가장 평탄하고, L2 site EW 방향($s=0.49615$)이 가장 거친 것으로 나타났다. 실험으로 얻어진 ks , kl , m_v 값의 범위는 다음과 같다: $0.047 < ks < 0.359$, $0.202 < kl < 2.619$, $0.204 < m_v < 0.452$.

N. R. Peplinski의 original empirical algorithm이 유전 상수 추정을 위하여 사용되었고, 실험에 사용된 ground truth 자료의 특성이 표 3.에 정리되었다. 연구 지역의 수분 함량 별 유전 상수 추정 값 및 추정된 유전 상수를 이용하여 계산된 수분 함량 별 Fresnel Reflectivity의 Decibel 값을 그림 2.에 나타냈다. 실험 당일 비가 내렸기 때문에 토양의 전반적인 수분 함유율 및 유전 상수 값이 높게 나타났다. 획득한 s , l , $\rho(\xi)$, ϵ_m 등의 surface parameter 값과 후방 산란 계수

표 3. Ground truth data characteristics

Sand=15.9 (%)
Clay=28.2 (%)
Specific density of the solid soil particles = 2.66 (g/cm ³)
Volumetric (bulk) density = 1.09 (g/cm ³)
Density of soil particle = 2.47 (g/cm ³)
Temperature = 23 °C

와의 관계를 실험하기 위하여 forward mapping 과정을 실행하였고, Oh's empirical model을 이용하였다.

우선 지표면의 거칠기가 후방 산란 계수 값에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 알아보기 위해 그림 3.과 같은 실험을 하였다. 그림 3.은 k_s 값에 따른 vv - 편광의 후방 산란 계수 (σ_{ir}^0)의 입사각 별 변화도를 Oh의 산란 모델을 이용하여 시뮬레이션 해 본 것이다. k_s 값이 클수록 L-band와 P-band 영상에서 모두 σ_{ir}^0 값이 강하게 관측되고 있음을 확인할 수 있다. 그림 4.는 입사각이 변화함에 따라 hh -, vv -, hv - 편광의 후방 산란 계수 σ_{hh}^0 , σ_{ir}^0 , σ_{hv}^0 의 변화를 구현해 본 결과이며 그림 5.는 토양의 수분 함량의 변화에 따른 후방 산란 계수의 변화를 나타낸 것이다. 그림 3., 4. 5.에서 보는 것처럼 surface parameter는 토양이 거칠수록, 입사각이 작을수록, 수분함량이 높을수록 산란이 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Oh의 Scattering Model로 추정된 후방 산란 계수 값은 polarimetric SAR 영상에서 획득한 후방 산란 계수 값과 비교하여 under-estimation하는 것으로 나타났다. 표 4.에 polarimetric SAR 자료로부터 추출한 파장 별 후방 산란 계수 값의 통계가 나타나있다.

IV. 토의 및 결론

이 연구에서는 나대지에서 마이크로파의 산란 현상을 이해하기 위하여 surface

parameter 추출 및 forward mapping을 실시하였다. Forward mapping의 입력 자료로써 ground truth 자료를 이용하여 surface parameter가 추출되었고, 0.3-1.3GHz 구간에 사용되는 경험상의 모델 알고리즘을 이용하여 유전 상수가 추정되었다. Oh의 empirical scattering model이 forward mapping시에 사용되었으며, 실험 결과 Oh 모델은 마이크로파 레이더 영상에서 관측된 후방 산란 계수 값을 under-estimation하는 것으로 나타났다지만, surface parameter의 변화에 따른 후방 산란 계수 값의 변화를 효율적으로 나타내고 있는 것으로 확인되었다. 향후 과제으로써 polarimetric SAR 자료에 적합한 산란 모델의 비교, 검증이 요구된다.

사사

본 연구의 일부는 서울대학교 지구환경과학부 BK21 프로그램과 캐나다 NSERC operating grant (A-7400)의 학제 간 연구비 후원으로 시행 되었다.

참고문헌

- [1] E. T. Engman, N. Chauhan, "Status of Microwave Soil Moisture Measurements with Remote Sensing", *Remote Sensing of Environment*, vol. 51, pp. 189-198, 1995
- [2] F. T. Ulaby, R. K. Moore, A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing: Active and Passive* vol. I-II, Addison-Wesley, Reading, MA, 1982
- [3] F. T. Ulaby, C. Elachi, *Radar Polarimetry for Geoscience Application*, Norwood, MA, Artech House, 1991
- [4] M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, "Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part II: Dielectric Mixing Models", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. GE-23, pp. 35-46, 1985
- [5] M. C. Dobson, F. T. Ulaby, *Mapping Soil Moisture Distribution With Imaging Radar*, R. A. Reyrson ed., The Manual of

Remote Sensing, 3rd ed., ASPRS Publishing, Bethesda, MD, 1997

[6] N. R. Peplinski, F. T. Ulaby, M. C. Dobson, "Dielectric Properties of Soils in the 0.3-1.3 GHz Range", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 33, 1995

[7] P. C. Dubois, J. J. van Zyl, T. Engman, "Measuring Soil Moisture with Imaging Radars", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 33, pp. 915-926, 1995

[8] Y. Du, F. T. Ulaby, M. C. Dobson, "Sensitivity to Soil Moisture By Active and Passive Microwave Sensors", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 38, pp. 105-114, 2000

[9] Y. Oh, K. Sarabandi, and F. T. Ulaby, "An Empirical Model and an Inversion Technique for Radar Scattering from Bare Soil Surfaces", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 30, pp. 370-381, 1992

표 1. ϵ'_m 와 ϵ''_m 의 추정을 위한 입력 변수

- m_v : volumetric soil moisture content	- relative dielectric constant of free water
- $\beta' = 1.2748 - 0.519S - 0.152C$ (S: sand, C: clay)	$\epsilon'_{fw} = \epsilon_{w0} + \frac{\epsilon_{w0} - \epsilon_{w\infty}}{1 + (2\pi f\tau_w)^2}$
- $\beta'' = 1.33797 - 0.603S - 0.166C$	- ϵ_{w0} = static dielectric constant for water
- ρ_b : bulk density in grams per cubic centimeter	- $\epsilon_{w0} = 80.1$ (at $20^\circ C$)
- ρ_s : specific density of the solid soil particles	- $\epsilon_{w\infty} = 4.9$ (high-frequency limit of ϵ'_{fw})
- α : empirically determined constant	- $\epsilon_s = (1.01 + 0.44\rho_s)^2 - 0.062$
- ϵ_0 = permittivity of free space	- $\sigma_{eff} = -1.645 + 1.939\rho_b - 2.25622S + 1.594C$
- τ_w = relaxation time for water	- $2\pi\tau_w = 0.58 \times 10^{-10} s$

표 2. Ground truth 자료를 이용하여 추정된 Surface Parameters

Surface ID		s (cm)	l (cm)	v	m	ks (L)	ks (P)	kl (L)	kl(P)
L1	EW	1.00788	4.2	0.238	0.2399	0.273	0.095	1.134	0.395
	NS	0.49615	2.15	0.465	0.2308	0.135	0.047	0.581	0.202
L2	EW	1.33457	9.7	0.103	0.1376	0.359	0.125	2.619	0.912
	NS	0.93828	4.7	0.213	0.1996	0.254	0.088	1.269	0.442

s= surface RMS height
l= correlation length
m= RMS slope (s/l for exponential function)
v= vertical roughness (l/l)
k= wave number. L-band: 0.027, P-band: 0.0094

표 4. polarimetric SAR 자료로부터 관측된 후방 산란 계수의 통계치

	σ_{HH}^0 (L)	σ_{VV}^0 (L)	σ_{HV}^0 (L)	σ_{HH}^0 (P)	σ_{VV}^0 (P)	σ_{HV}^0 (P)
mean	-21.6697	-17.0318	-29.8116	-25.3142	-21.8024	-34.7908
max	-13.9679	-11.1304	-24.2272	-17.9943	-13.0498	-29.8117
min	-25.8002	-23.5639	-36.8173	-34.2464	-30.3129	-40.7178
STD	2.67	3.19	3.34	3.66	3.66	2.93

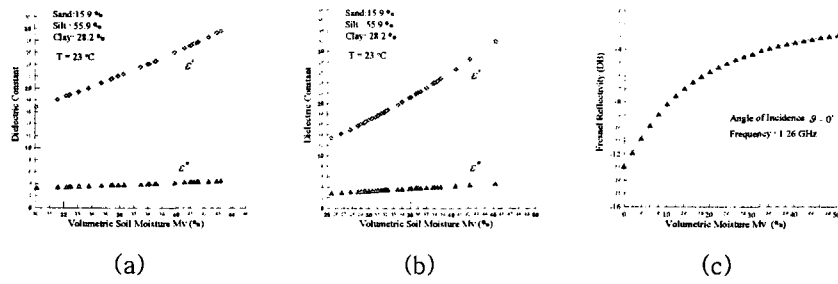


그림 2. 연구 지역의 수분 함량 별 유전 상수 추정 값 및 수분 함량 별 Fresnel Reflectivity
 (a) L1 Site의 유전 상수 (b) L2 Site의 유전 상수 (c) L2 Site의 Fresnel Reflectivity

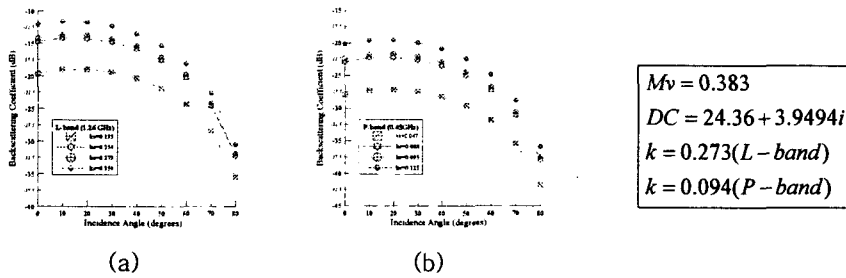


그림 3. Oh model 시뮬레이션 결과- ks 값에 따른 σ_{it}^0 값의 변화
 (a) L-band (1.26GHz) (b) P-band (0.45GHz)

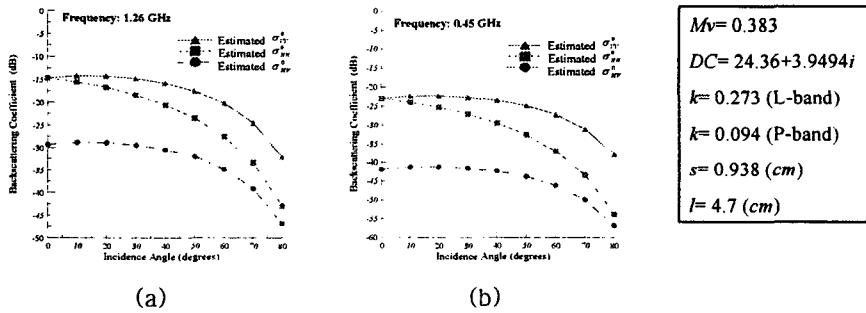


그림 4. Oh model 시뮬레이션 결과- 입사각 θ 에 따른 후방 산란 계수의 변화
 (a) L-band (1.26GHz) (b) P-band (0.45GHz)

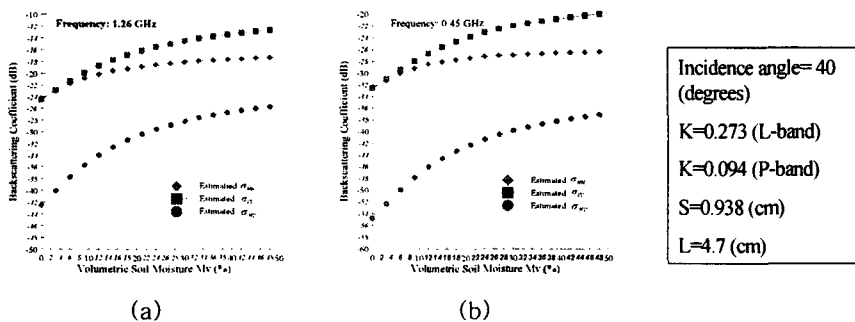


그림 5. Oh model 시뮬레이션 결과- 수분함량 m_v 에 따른 후방 산란 계수의 변화
 (a) L-band (1.26GHz) (b) P-band (0.45GHz)