

토양 표면에서의 레이더 산란 계수와 표면 거칠기 측정 길이의 관계에 대한 이론 모델과 측정 데이터의 비교

Relation between Radar Backscattering Coefficients and Surface Profile Length for Bare Soil Surfaces Using Theoretical Predictions and Measurement Data

오 이 석 · 홍 진 영

Yisok Oh · Jin-Young Hong

요 약

본 논문에서는 토양 표면의 레이더 후방 산란 계수와 표면 거칠기의 관계를 계산해 보고, 측정 길이에 따른 표면 거칠기 변화를 알아본 후에, 측정 길이에 따른 표면 거칠기와 레이더 후방 산란 계수의 관계를 보여준다. 이 연구 결과에 따르면, 측정 길이가 짧아져서 표면 거칠기 값의 변화가 심하다하더라도 계산된 레이더 후방 산란 계수에는 적은 영향밖에 주지 않는다는 것을 보여준다.

Abstract

The radar backscattering coefficients of soil surfaces with various roughness conditions are computed at first in this paper. The roughness parameters for various surface-profile lengths are also obtained. Then, the relationship between the radar backscattering coefficients and the profile length is studied. It was shown that the effect of the profile length is negligible on the backscattering coefficient, even though the roughness parameters vary a lot with the length of the surface profile.

Key words : Backscattering Coefficient, Soil Surface, Roughness Parameters, Profile Length

I. 서 론

Synthetic aperture radar(SAR)로 지표면의 후방 산란을 측정하여 지표면 상태를 원격으로 탐지하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 지표면의 후방 산란을 정확하게 예측하기 위해서는 우선 일정한 표면 거칠기와 수분 함유량을 갖는 토양에서의 레이더 산란 특성을 정확하게 계산할 수 있어야 한다. 토양에 대한 레이더 산란 모델에는 레이더 변수인 주파수, 입사각, 편파와 토양의 수분 함유량과 표면 거칠기가 입력변수가 되고, 표면 거칠기 변수로는 유효 높이

(RMS height), 표면 상관 길이(correlation length)와 상관 함수(correlation function)가 있다^{[1],[2]}. 불규칙적으로 거친 토양의 일정 길이에 해당하는 표면 높이를 측정하여 표면 높이를 랜덤 변수로 가정할 때에 그 표면 높이 분포의 표준 편차인 유효 높이 s 는 다음처럼 계산한다.

$$s = \sqrt{\langle z^2 \rangle - \langle z \rangle^2} \tag{1}$$

여기서 $z=z(x, y)$ 는 표면 높이 함수이고, $\langle \dots \rangle$ 는 평균 값이다. 상관 함수는 표면 높이로부터 다음처럼 계산하고,

홍익대학교 전파통신공학과(Department of Radio Science and Communication Engineering, Hongik University)

· 논문 번호 : 20060914-111

· 수정완료일자 : 2006년 11월 15일

$$\rho(r) = \frac{\sum_{i=1}^{N-1-j} z_i z_{j+i-1}}{\sum_{i=1}^N z_i^2} \quad (2)$$

상관 길이 l 은 상관 함수의 크기가 $1/e$ 되는 변위 r 의 길이를 말한다. 여러 토양에서의 측정된 표면 거칠기 함수를 살펴보면, 표면 높이의 PDF는 가우시안(Gaussian) 형태이고, 상관 함수는 지수 함수와 가우시안 함수의 중간 형태이지만, 지수 함수에 가까운 형태를 갖는다^[3].

표면 높이를 측정하는 방식에도 주로 3가지 방식들 중 하나를 이용하는데, 첫 번째 방식은 레이저를 이용하여 표면 높이를 측정하는 방법이다. 레이저 측정기를 콘베어 벨트에 장착하여 모터제어기로 모터를 동작시켜, 측정기를 이동시키며 표면 높이를 측정하게 된다. 이 방식의 단점은 레이저가 마른 풀잎 등에서도 반사하기 때문에 토양의 표면 측정에 오차를 준다는 것이다. 이런 경우에는 상관 길이가 짧아지게 된다^[3]. 두 번째 방식은 모눈종이를 붙인 얇은 금속판을 토양에 박고, 스프레이 페인트로 칠한 후에 그 칠해진 부분을 읽어서 표면 높이를 얻거나, 토양에 박힌 모눈종이를 디지털 카메라로 촬영하여 읽는 방식인데, 금속판을 토양에 박을 때에 표면이 변하게 되므로 오차를 준다. 이 경우에는 상관 길이가 길어지게 된다. 세 번째 방식은 슬라이딩 핀들을 이용하여 표면 높이를 측정하는 방식으로서, 비교적 토양의 표면을 손상시키지 않고 측정할 수 있으며, 작은 마른 잎들은 피해질 수 있으므로, 오차가 가장 적은 측정 방식이라 하겠다^[4].

토양 표면에서 표면 거칠기 변수들인 유효 높이와 상관 길이를 정확하게 측정하려면 매우 긴 길이의 표면에 대해 측정해야 한다^[5]. 5 % 정도의 오차 이내의 유효 높이 값을 얻으려면 상관 길이의 50배 이상의 길이를 이용해야 하고, 5 % 오차 이내의 상관 길이 값을 얻으려면 상관 길이의 200배 이상의 길이를 이용해야 한다^[6]. 표면 높이를 측정하는 표면 길이가 짧을 때에는 유효 길이와 상관 길이가 줄어들고, 측정하는 길이가 아주 짧을 때에는 표면 거칠기 오차가 매우 큰 것을 알 수 있고, 그에 따른 후방 산란 계수 예측 값도 큰 오차를 줄 것으로 예상된다^[7].

본 논문에서는 표면 높이 측정용 표면 길이에 따라서 발생하는 유효 높이와 상관 길이의 오차에 의한 레이더 후방 산란 계수의 오차를 알아내는 연구

를 수행한 결과를 보여준다. 우선, 토양 산란 모델 중 하나인 IEM(Integral Equation Method)를 이용하여 레이더 후방 산란 계수를 계산하였다^{[2],[8]}. 다음에는 현장에서 측정된 토양 표면 높이를 이용하여 각 길이에 해당하는 유효 높이와 상관 길이를 계산한 후에, 이들 값에 해당하는 후방 산란 계수를 계산하였다. 표면 높이는 pin-board profiler를 이용하여 측정하였다^[9]. 상관함수의 Fourier 변환으로 얻는 표면 높이 스펙트럼(roughness spectrum)은 수치 해석 적분으로 얻었다. 수치적으로 얻은 불규칙적으로 거친 표면에 대해서도 계산하여 측정 데이터에서 얻은 결과를 입증하였다.

II. 레이더 후방 산란 계수 계산

표면 유효 높이가 크지 않은($ks < 2$: k 는 전파상수이고, s 는 유효 높이) 유전체 표면에 대해서는 다음과 같은 IEM 산란 모델을 이용할 수 있다^{[2],[8]}.

$$\sigma_{qp}^o = \frac{k^2}{2} \exp[-2(k_z s)^2] \sum_{n=1}^{\infty} |I_{qp}^n|^2 \frac{W^{(n)}(-2k_x, 0)}{n!} \quad (3)$$

여기서 $k_z = k \cos \theta$, $k_x = k \sin \theta$ 이고, p, q 는 v, h 편파를 의미하며, $k = 2\pi / \lambda$ 는 파수(wave number)이고, θ 는 전파의 입사각도이다.

$$I_{qp}^n = (2k_z s)^n f_{qp} \exp[-(k_z s)^2] + \frac{(k_z s)^n}{2} [F_{qp}(-k_x, 0) + F_{qp}(k_x, 0)] \quad (4)$$

위 식에서 $f_{vv} = 2R_{//} / \cos \theta$, $f_{hh} = -2R_{\perp} / \cos \theta$, $f_{vh} = f_{hv} = 0$ 이다. $R_{//}$, R_{\perp} 는 평행 편파와 직각 편파에 해당하는 Fresnel 반사계수이다. F_{qp} 는 참고문헌 [2]에 주어졌으며 다음과 같다.

$$F_{vv}(-k_x, 0) + F_{vv}(k_x, 0) = \frac{2 \sin^2 \Theta (1 + R_{//})^2}{\cos \Theta} \cdot \left[\left(1 - \frac{1}{\epsilon_r}\right) + \frac{\mu_r \epsilon_r - \sin^2 \Theta - \epsilon_r \cos^2 \Theta}{\epsilon_r^2 \cos^2 \Theta} \right] \quad (5)$$

$$F_{hh}(-k_x, 0) + F_{hh}(k_x, 0) = \frac{2 \sin^2 \Theta (1 + R_{\perp})^2}{\cos \Theta} \cdot \left[\left(1 - \frac{1}{\mu_r}\right) + \frac{\mu_r \epsilon_r - \sin^2 \Theta - \mu_r \cos^2 \Theta}{\mu_r^2 \cos^2 \Theta} \right] \quad (6)$$

거칠기 스펙트럼(roughness spectrum) $W^{(n)}(-2k_x, 0)$ 는

다음처럼 자기 상관 함수의 n 제곱에 대한 Fourier 변환으로 표현된다^[2].

$$W^{(n)}(-2k_x, 0) = \int_0^{\infty} \rho^n(r) J_0(2kr \sin \theta) r dr \quad (7)$$

여기서 $J_0(\dots)$ 는 첫 번째 종류인 0차 Bessel 함수이고, 참고문헌 [10]에 주어진 근사함수를 이용하여 수치적으로 적분할 수 있다. F_{gp} 계산에 필요한 유전율은 현장에서 측정한 수분함유량과 참고문헌 [11]의 실험식을 이용하여 계산하였다.

III. 측정 길이에 따른 표면 거칠기 변수 변화

토양 표면 높이 변수들을 얻기 위해, 우선 수평을 잘 맞춘 핀 형태의 표면 높이 측정기로 1 m씩 다섯 번씩 측정하여 5 m의 길이에 대한 표면 높이들을 측정하였다. 1 m 길이의 표면에 대해 높이 분포를 정확하게 측정할 수 있도록 제작된 pin-type profiler를 이용하여 5 m 길이에 대해 표면 높이를 측정하였고^[9], 그림 1은 측정 결과 하나를 보이고 있다.

이 측정된 표면 높이 분포의 높이를 랜덤 변수로 하여 PDF(확률밀도함수)를 구하면 그림 2(a)와 같은 Gaussian 형태의 함수가 된다. 이 PDF의 표준편차를 유효 높이(RMS height)라고 하고, 이 경우의 유효 높이는 2.35 cm이다. 또한 표면 높이 분포의 자기 상관 함수(autocorrelation function)를 구하고, 변위(displacement)에 대해 표준화(normalization)를 취하면 그림 2(b)와 같은 결과를 얻는다. 그림 2(b)는 측정된 자기 상관 함수와 함께 가우시안과 지수 상관함수를 함께 보여주고 있으며, 자기 상관 함수의 첫 부분(변위가 상관 길이보다 작을 경우)이 지수 함수와 일치하고 있으며, 그 후부터(변위가 상관 길이보다 클 경우)는

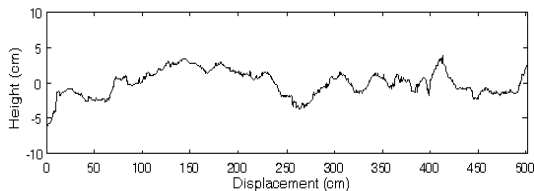
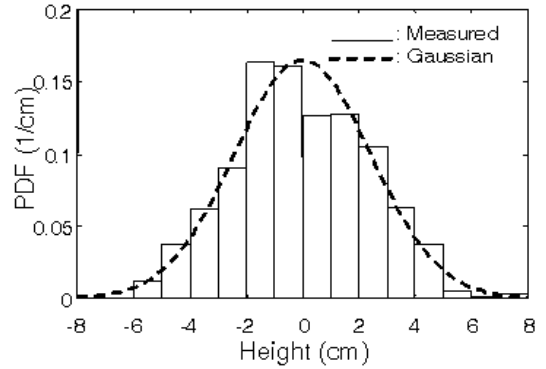
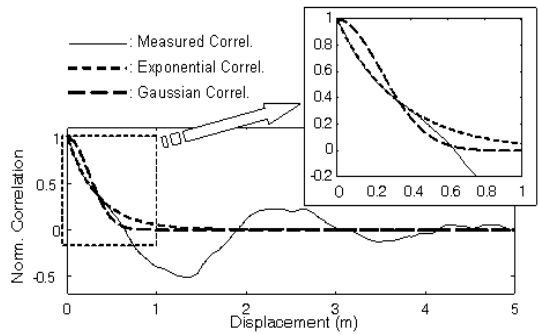


그림 1. 토양 표면 높이 측정 결과의 한 예
Fig. 1. A typical example of measured surface profiles.



(a) 확률 분포 함수
(a) PDF



(b) 자기 상관 함수
(b) Autocorrelation function

그림 2. 표면 높이 확률 분포
Fig. 2. Surface height statistics.

크게 오르내리는 것을 보여주고 있다.

그림 3은 측정된 자기 상관 함수를 식 (7)처럼 수치 적분하여 거칠기 스펙트럼을 얻고, 이것을 식 (3)에 대입하여 레이더 후방 산란 계수를 계산한 결과를 보여주고 있다. 측정 데이터는 polarimetric scatterometer를 이용하여 1.85 GHz에서 풀 없는 토양 표면에 대한 후방 산란 계수를 측정하여 얻은 것이다. 이 결과는 이론적 함수인 지수 함수를 적분하여 closed-form으로 다음의 거칠기 스펙트럼을 얻고,

$$W_e^{(n)}(-2k \sin \theta, 0) = \frac{l^2}{n^2} \left[1 + \left(\frac{2kl \sin \theta}{n} \right)^2 \right]^{-1.5} \quad (8)$$

이 결과를 식 (3)에 대입하여 얻은 레이더 후방 산란 계수와 잘 일치하고 있다. 즉, 각도에 따른 후방 산란 계수 계산에서 자기 상관 함수의 첫 부분이 중

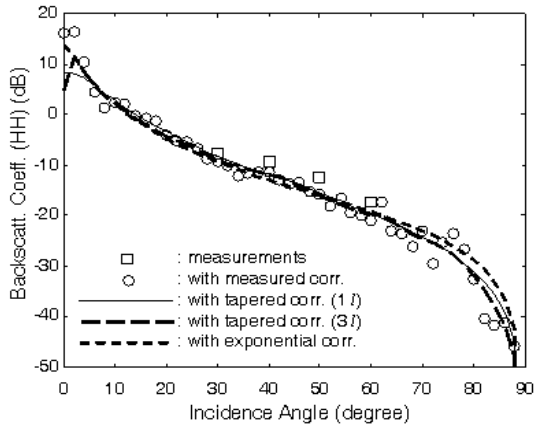
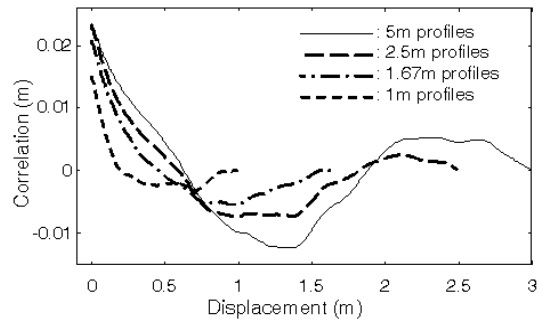


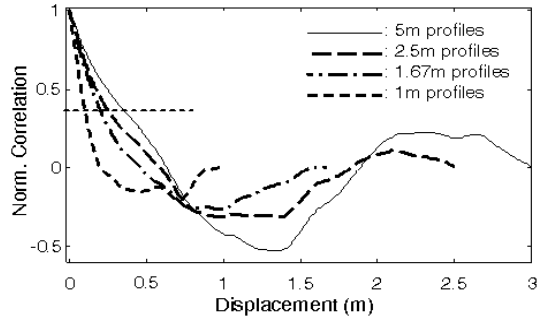
그림 3. 레이더 후방 산란 계수의 비교(1.85 GHz)
Fig. 3. Comparison of radar backscattering coefficients for hh-polarization.

요한 역할을 하며, 변위(displacement)가 큰 뒷부분은 단지 낮은 각도(5도 이하)의 값에만 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 자기 상관 함수의 뒷부분의 영향으로 각도의 변화에 대해서 데이터가 흩어진 결과를 준다는 것도 알 수 있다. 따라서 가우시안 형태의 tapering 함수를 곱해줘서 자기 상관 함수의 고리 부분 영향을 없애주면 그림 3처럼 각도에 따른 변화가 매끄럽게 된다. Tapering 상수를 1 l(여기서 l은 상관 길이)로 했을 경우와 3 l로 했을 경우에 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 또한 scatterometer로 측정한 레이더 후방 산란 계수와 IEM을 이용하여 계산한 레이더 산란 계수가 대체적으로 일치하는 것도 볼 수 있다.

측정한 표면 높이 분포는 5 m 길이의 측정에서 얻은 것이지만 2.5 m, 1.67 m, 1 m로 각각 분할해서 자기 상관 함수를 구하여 5 m의 경우와 비교하면 그림 4(a)처럼 상당한 차이가 있는 자기 상관 함수를 보인다. 그림 4(a)에서 변위(displacement)가 0일 때의 자기 상관 함수의 크기가 그 표면의 유효 높이가 되고, 이 유효 높이는 표면 길이(profile length)가 작아질수록 작은 값을 갖는다는 것을 볼 수 있다. 이 유효 높이들로 각 데이터를 나눠주면 그림 4(b)와 같이 표준화된(normalized) 자기 상관 함수들을 얻게 되고, 이 자기 상관 함수의 값이 $1/e=0.368$ 되는 곳까지의 변위를 상관 길이(correlation length)라고 하고, 이 상관 길이도 측정 표면 길이가 짧아짐에 따라 줄어든다는 것을 알 수 있다.



(a) 비표준화
(a) Without normalization



(b) 표준화
(b) With normalization

그림 4. 자기 상관 함수
Fig. 4. Autocorrelation functions.

그림 5는 표면 길이를 5 m에서부터 2.5 m, 1.67 m, 2.5 m, 1 m, 0.67 m, 0.5 m로 각각 줄이면서 추출해낸 유효 높이와 상관 길이를 보여주고 있다.

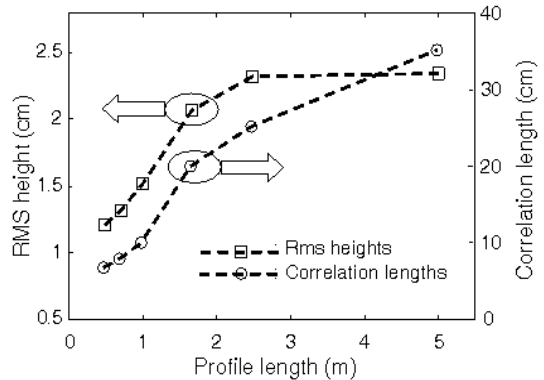


그림 5. 측정 길이에 따른 유효 높이와 상관 길이의 변화
Fig. 5. RMS heights and correlation lengths for various surface profile lengths.

측정 길이가 작은 값으로 줄어들면 유효 높이와 상관 길이의 급격하게 줄어든다는 것을 알 수 있고, 어느 정도 측정 길이가 커지게 되면 일정 값으로 수렴하게 됨을 볼 수 있다. 유효 길이에 대해서는 2.5 m에서 수렴하게 되고, 상관 길이에 대해서는 5 m보다 긴 측정 길이에서 수렴하게 될 것이다. 측정 길이에 따른 변화율은 상관 길이가 유효 높이보다 더 크다는 것도 알 수 있다.

측정 길이에 따라 유효 높이와 상관 길이가 큰 폭으로 변화하는데, 이 변화가 레이더 산란 계수에도 큰 변화를 주는지 알아보기 위해, 각 측정 길이별로 얻은 자기 상관 함수를 IEM 모델에 입력하여 각각의 레이더 산란 계수를 계산하였다. 그림 6은 HH-편파(H는 horizontal을 의미함)에서 측정 길이별로 후방 산란 계수를 계산하여 비교한 결과를 보인다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 20도 미만의 낮은 각도에서는 측정 길이가 작아짐에 따라 산란 계수 값이 낮아지나, 20도 이상의 각도에서는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 다시 말하면, 비록 측정 길이에 따라 유효 높이와 상관 길이가 큰 변화를 준다고 할지라도 레이더 산란 계수의 값에는 큰 영향을 미치지 않으며, 입사각도가 15도 이상이라면, 모델 입력 값으로 1 m 길이의 표면에 대해 측정된 상관 함수에서 추출한 유효 높이와 상관 길이를 사용해도 무방하다는 것이다.

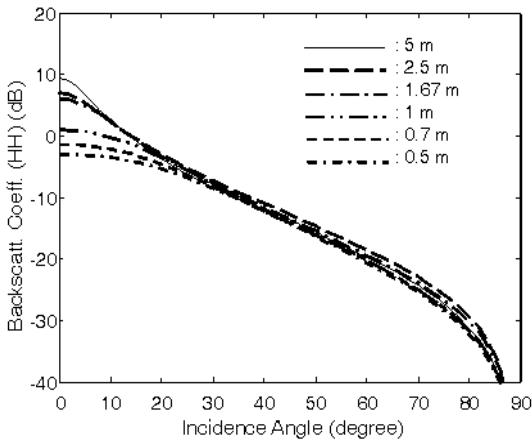


그림 6. 측정 길이에 따른 레이더 후방 산란 계수의 변화(1.85 GHz)

Fig. 6. Radar backscattering coefficients for various profile lengths at 1.85 GHz.

그 이유는 유효 높이가 작아지면 산란 계수가 낮아지게 되고, 상관 길이가 작아지면 산란 계수가 높아지게 된다. 그 영향력은 유효 높이가 더 크지만, 상관 길이의 변화가 더 심하므로 서로 상쇄되어 산란 계수는 측정 길이에 큰 영향을 받지 않는 것처럼 보이게 된다.

IV. 수치해석에 의한 검증

측정된 표면 높이 분포를 이용하여 얻은 결과를 검증하기 위하여 불규칙적으로 거친 유전체 표면을 수치 해석적으로 생성하였다. 이 표면의 유효 높이는 0.1 unit, 상관 길이는 1 unit, 샘플링 간격 dx는 0.05 unit, 전체 길이는 4,000 unit이었고, 랜덤 숫자를 이용하여 가우시안 확률 분포와 지수함수의 자기 상관 함수를 갖는 불규칙적인 랜덤 높이 분포를 설계하였다¹²⁾. 이 표면 높이 $Z(k)$ 는 다음 식으로 계산할 수 있으며,

$$Z(k) = \sum_{j=-M}^M W(j)X(j+k) \quad (9)$$

여기서 $X(i)$ 는 가우시안 난수(Gaussian random deviate) $N(0,1)$ 이고, $W(j)$ 는 다음과 같은 weighting 함수이다.

$$W(j) = F^{-1}[\sqrt{FC(j)}] \quad (10)$$

위 식에서 $C(j)$ 는 자기 상관 함수이고, $F(\dots)$ 는 푸리에 변환(Fourier Transform)을 나타낸다. 여기서 자기 상관 함수는 지수 함수를 이용하였으며, 이 경우에 weighting 함수는 다음과 같다.

$$W_e(j) = \left(\frac{\sqrt{2\Delta r}}{\pi\sqrt{l}} \right) sK_0 \left[\frac{j\Delta r}{l} \right] \quad (11)$$

여기서 $K_0[\dots]$ 은 두 번째 종류의 수정된 Bessel 함수이고, 참고문헌 [10]의 식을 이용하여 계산할 수 있다. 생성된 표면은 4000 l (l =상관 길이)이 되고, 20번씩의 평균을 취하면서 최대 200 l의 길이까지 계산할 수 있다. 여러 표면 길이에 대한 자기 상관 함수를 구하여 그림 7에 비교하였다. 이 자기 함수들은 수직 축에 대해 유효 높이로 표준화시켰을 뿐만 아니라, 수평축으로도 상관 길이로 표준화시킨 결과이다. 또한 이 자기함수들은 이론적인 지수함수와도 비교되었는데, 이 표면을 생성할 때에 지수 상관 함수

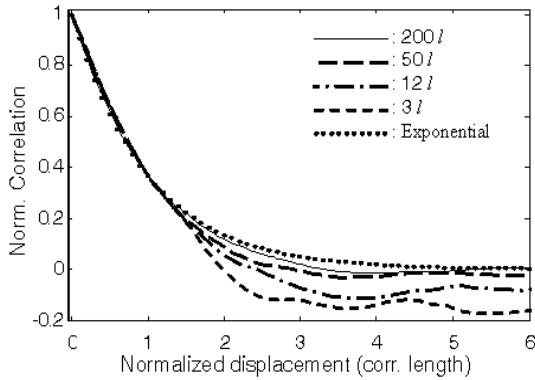


그림 7. 생성된 표면의 표면 길이별 자기 상관 함수들
Fig. 7. Autocorrelation functions of the generated surface for various profile lengths.

수를 이용했으므로, 표면 길이가 충분히 클 경우에는 생성된 표면의 자기 상관 함수가 지수 함수로 접근한다는 것을 볼 수 있다.

그림 8은 생성된 표면의 길이를 줄여가면서 20개 섹션의 평균을 취하는 방식으로 얻은 유효 높이 s 와 상관 길이 l 을 도시한 것이다. 표면 길이가 200 unit (또는 $l=1$ unit이므로 200 l)일 때에 얻은 유효 높이와 상관 길이는 각각 0.1과 1.0 unit으로 표면을 생성하기 위해 입력했던 값들과 같다. 그러나 표면 길이가 100 l , 50 l , 25 l , 12 l , 6 l , 3 l , 1.5 l 로 줄어들면서 유효 높이와 상관 길이가 꽤 큰 폭으로 줄어드는 것을 볼 수 있다. 상관 길이의 줄어드는 비율이 유효 높이의 줄어드는 비율보다 훨씬 높은 것을 알 수 있다.

생성된 표면의 확률 분포에서 얻은 측정된 자기 상관 함수를 수치적으로 적분하여 거칠기 스펙트럼을 얻고, IEM 산란 모델을 이용하여 후방 산란 계수를 계산하였다. 이 계산에서 $k_s=1.0$, $kl=10.0$ 인 경우의 표면 거칠기를 가정하였다. 즉 $k=2\pi/\lambda=10(\text{unit}^{-1})$ 이 된다. 이번에는 같은 상관 길이를 갖는 지수 함수 형태의 자기 상관 함수를 이론적으로 적분하여 얻은 식 (8)의 거칠기 스펙트럼을 이용하여 후방 산란 계수를 얻고, 측정된 자기 상관 함수를 이용하여 얻은 결과와 비교하여 그림 9에 보였다. 이 계산에는 표면 길이가 200 unit인 경우의 자기 상관 함수를 이용했기 때문에 그림 9에서 볼 수 있듯이 VV-편파와 HH-편파 모두에서 수치적 계산 결과와 이론적 계산 결과가 잘 일치하고 있다.

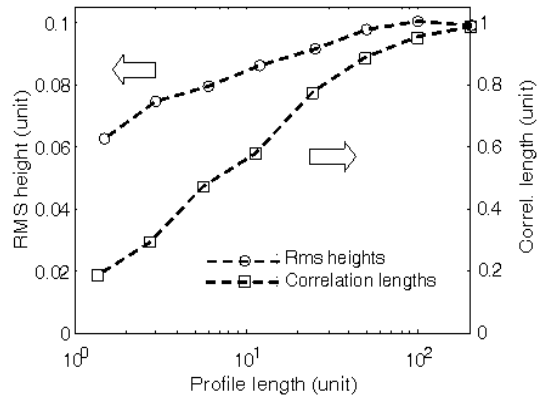


그림 8. 생성된 표면의 길이에 따른 유효 높이와 상관 길이
Fig. 8. RMS heights and autocorrelation lengths of the generated surface for various profile lengths.

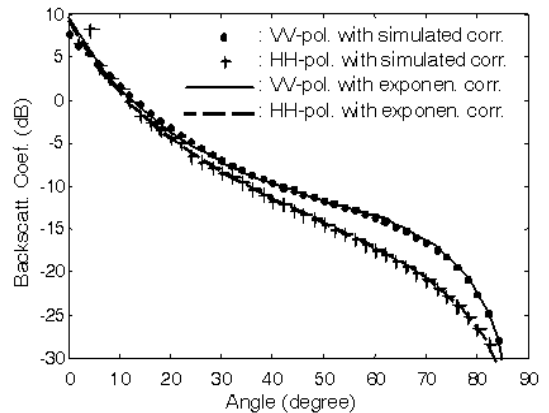


그림 9. 이론적, 수치 해석적 후방 산란 계수들의 비교($k_s=1, kl=10$)
Fig. 9. Comparison between analytical and numerical backscattering coefficients.

이번에는 각 표면 길이에 따른 자기 상관 함수를 이용하여 후방 산란 계수를 계산하고, 서로 비교하였다. 그림 10은 HH-편파에 대해, 표면 길이가 200 l , 50 l , 12 l , 3 l 로 1/4씩 줄어들 때에 후방 산란 계수의 변화를 보여주고 있다. 입사각이 20도보다 작을 때에는 표면 길이가 줄어들면서 후방 산란 계수도 함께 줄어들지만, 20도보다 큰 각도에서는 1 dB 이내에서 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 이 결과는 자연적 토양 표면에서 측정된 표면 높이 분포를 이용한 연구에서 얻은 결과와 일치한다.

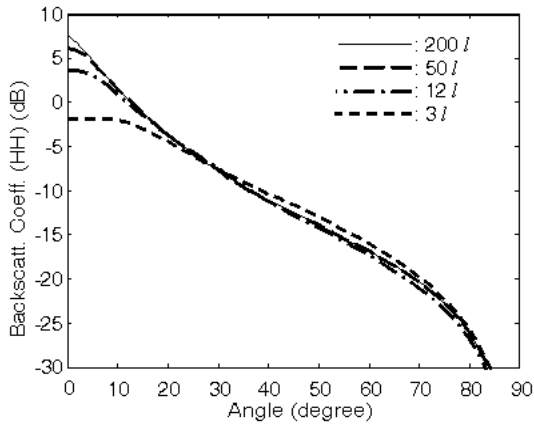


그림 10. 표면 길이에 따른 HH-편파의 후방 산란 계수 비교($ks=1, kl=10$)

Fig. 10. Backscattering coefficients at HH-polarization for various profile lengths($ks=1, kl=10$).

그림 11은 표면 길이가 줄어드는 것에 따른 후방 산란 계수의 변화를 VV-편파에서 보여주고 있다. 낮은 입사각(20도 이하)에서는 VV-편파에서도 HH-편파와 마찬가지로 표면 길이가 줄어들면 후방 산란 계수의 값이 줄어들지만, 높은 각도에서는 오히려 어느 정도 증가한다는 것을 볼 수 있다. 표면 길이가 3 l일 때를 제외하면 그 차이는 1~2 dB 밖에 되지 않는다.

표면 길이가 6 l일 경우의 후방 산란 계수를 계산하여 길이가 200 l일 경우와 비교해 보면, 입사각이

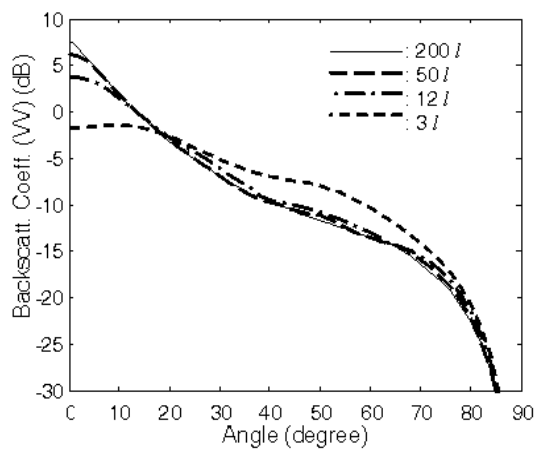


그림 11. 표면 길이에 따른 VV-편파의 후방 산란 계수 비교($ks=1, kl=10$)

Fig. 11. Backscattering coefficients at VV-polarization for various profile lengths($ks=1, kl=10$).

15도보다 클 경우에 한해 계산한 RMS 오차가 VV-편파에서는 1.5 dB 이내, HH-편파에서는 0.5 dB 이내인 것을 알 수 있었다. 측정된 표면 높이 분포와 생성된 표면 높이 분포를 이용하여 얻은 결과들을 종합해 보면, 표면 길이에 따라 유효 높이와 상관 길이의 변화가 매우 크다고 할지라도 최종적으로 계산된 후방 산란 계수는 큰 변화를 보이지 않는다. 그 이유는 표면 길이의 감소에 따라 유효 높이와 상관 길이가 함께 줄어드는데 반해, 이들 두 변수가 후방 산란 계수에 미치는 영향은 서로 상반되기 때문이다. 따라서 정확한 유효 높이와 상관 길이를 구하기 위해 꼭 아주 긴 길이(예를 들면, 200 l 길이)의 표면에 대해 표면 높이를 측정할 필요는 없으며, 짧은 길이에 대한 높이 측정만으로도 정확도가 높은 후방 산란 계수를 예측할 수 있다.

V. 결 론

자연적으로 조성된 토양 표면 높이를 5 m 길이만큼 측정하여, 이 측정된 표면 높이 분포에서 얻은 자기 상관 함수를 수치적으로 적분하여 IEM으로 후방 산란 계수를 계산하였다. 여러 종류의 표면 길이에 대해서 얻은 유효 높이와 상관 길이들을 얻었고, 표면 길이가 감소하면 이들 변수들이 큰 폭으로 감소한다는 것을 보였다. 그러나 레이더 후방 산란 계수는 15도보다 높은 입사 각도에서 표면 길이의 변화에 민감하지 않고, 1 m의 표면 길이를 이용해도 후방 산란 계수를 정확하게(1 dB 이내의 오차) 예측할 수 있다는 것도 보였다. 이 결과를 검증하기 위해 4,000 l (여기서 l은 표면 상관 길이)의 불규칙하게 거친 표면을 수치적으로 생성하였으며, 이 생성된 표면에서도 측정된 표면과 마찬가지로의 결과를 얻었다. 즉, 표면 길이가 6 l 정도만 되어도, 입사각이 15도 이상일 경우에는 HH-편파에서 0.5 dB, VV-편파에서 1.5 dB의 오차를 보일 뿐이었다. 이 연구 결과는 토양 표면에서의 산란 모델 개발 및 활용에 중요한 역할을 하게 될 것이며, 향후에 SAR 영상을 이용한 지표면 원격 탐사의 기반 기술로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

저자들은 본 연구의 측정 데이터 수집에 도움을

준 홍익대학교 전파응용연구실의 현종철, 최재원, 김령모, 김상근에 감사한다. 본 연구는 국방과학연구소 지원을 받는 KAIST 전파탐지연구센터의 도움으로 수행되었다.

참 고 문 헌

[1] F. T. Ulaby, M. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing, Active and Passive*, vol. 2, Artech House, Norwood, MA, U.S.A., 1982.

[2] A. K. Fung, *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*, Artech House, Boston, MA, 1994.

[3] 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, no. 2, pp. 370-381, Mar. 1992.

[4] F. Mattia, M. W. J. Davidson, T. Le Toan, C. M. F. D'Haese, N. E. C. Verhoest, A. M. Gatti, and M. Borgeaud, "A comparison between soil roughness statistics used in surface scattering models derived from mechanical and laser profiler", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 41, no. 7, pp. 1659-1671, Jul. 2003.

[5] M. W. J. Davidson, T. Le Toan, F. Mattia, G. Satalino, T. Manninen, and M. Borgeaud, "On the characterization of agricultural soil roughness for radar remote sensing studies", *IEEE Trans. Geosci. Re-*

mote Sensing, vol. 38, no. 2, pp. 630-640, Mar. 2000.

[6] Y. Oh, Y. C. Kay, "Condition for precise measurement of soil surface roughness", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 36, pp. 691-695, Mar. 1998.

[7] W. Dierking, "Quantitative roughness characterization of geological surface and implications for radar signature analysis", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 37, no. 5, pp. 2397-2412, Sep. 1999.

[8] A. K. Fung, Z. Li, and K.S. Chen, "Backscattering from a randomly rough dielectric surface", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 30, no. 2, pp. 356-369, Mar. 1992.

[9] 홍진영, 오이석, "식물층에서의 편파별 후방 산란 측정과 산란 모델의 비교", 한국전자과학회논문지, 2006년 9월.

[10] M. Abramowitz, I. A. Stegan, *Handbook of Mathematical Functions*, Dover Publication, Inc., New York, 1972.

[11] T. Hallikainen, F. T. Ulaby, M. C. Dobson, M. A. El-Rayes, and L. Wu, "Microwave dielectric behavior of wet soil. Part-I: Empirical models and experimental observation", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 23, pp. 25-34, Jan. 1985.

[12] A. K. Fung, M. F. Chen, "Numerical simulation of scattering from simple and composite random surfaces", *J. Opt. Soc. Amer. A.*, vol. 2, pp. 2274-2284, Dec. 1985.

오 이 석



1982년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)
 1988년 12월: University of Missouri-Rolla, 전기/컴퓨터공학과 (공학석사)
 1993년 12월: University of Michigan, Ann Arbor, 전기공학/컴퓨터과학 (공학박사)

1994년 3월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수
 [주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, 안테나

홍 진 영



2000년 2월: 홍익대학교 전파공학과 (공학사)
 2002년 2월: 홍익대학교 전파통신공학과 (공학석사)
 2002년 2월~2004년 8월: 삼성전기 중앙연구소 RF Lab.
 2003년 3월~현재: 홍익대학교 전파통신공학과 박사과정

[주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, 안테나