

지표면에서의 Forward 산란 계산

홍진영, 오이석

홍익대학교 전파통신공학과

전화/팩스 : (02)-333-5443

Microwave Forward Scattering From Earth Surfaces

Jin-Young Hong, Yisok Oh

School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University

E-mail : nir26@hanmail.net

요약

본 논문은 지표면에 대한 forward 및 coherent 산란 계산으로 1차 radiative transfer 이론을 적용하여 맨땅 및 수풀 층에서의 전자파 산란을 계산하였다. 원격 탐사에서 전자파 후방산란계산은 많은 연구가 진행되고 있는 반면 forward 산란계산에 대한 연구는 거의 진행되어 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 지표면에 대한 전자파의 forward 및 coherent 산란을 계산함으로써 다양한 전자파산란 모델을 제시하고자 한다. 또한, 본 논문에서의 계산결과 후방산란보다 forward 및 coherent 산란 계산에서 지표면의 수분함유량, 수풀 및 나무의 길이, 밀도, 크기 등과 같은 지표 환경의 변화에 산란계수가 더 민감하게 변화함을 알 수 있었다.

I. 서론

전자파 산란 계산에 있어 지표면은 많은 관심과 연구가 진행되고 있는 분야이다. 지표면은 일반적으로 수풀지형, 맨땅, 숲 등과 같은 다양한 환경으로 이루어져 있으며 이로 인한 전자파의 복잡한 상호작용을 계산하여 산란 모델을 만드는 데

많은 연구가 진행되고 있다. 본 논문의 목적은 지금까지의 연구가 주로 지표면의 후방산란을 계산하여 지표면 산란 모델을 만드는 것에 반해 지표면의 forward 산란 모델을 만들고자 한다.

Forward 산란 모델은 1차 radiative transfer 이론을 적용하였으며, 지표면을 땅과 수풀 층으로 구분하여 모델링하였다. 이는 후방산란계산에 사용한 simple 모델과 동일하며^[1] 땅에 대한 산란모델은 forward 산란 모델의 경우 실험식이 없기 때문에 이론적인 physical optics(PO), geometrical optics(GO), small perturbation method(SPM)을 적용하고 각 이론식의 유효영역을 나누어 적용하였으며, 수풀 층은 나뭇가지, 나뭇잎, 나무기둥들이 랜덤하게 분포되어 있는 것을 가정하여 모델을 만들었다. 모델의 입력 변수는 우선 땅에 대한 수분함유량(m_v), 지표 높낮이에 대한 표준편차(s), 상판 길이(l)가 있으며, 수풀층에서는 나뭇잎, 나뭇가지, 기둥에 대한 길이 및 밀도이며, 입력 변수에 따른 모델의 변화를 계산하였다.

지표면의 forward 산란 모델은 지표면의 수분함유량, 수풀 및 나무의 길이, 밀도, 크기 등과 같은 biomass의 변화에 대

해 후방산란 모델보다 더 많은 변화를 나타낼 수 있었다. 이는 지표면의 변화를 예측하는 다양한 분야에 적용될 수 있을 것이다.

II Radiative transfer 이론

Radiative transfer 이론은 지표면 위의 풀, 나무 층에 의한 체적 산란을 계산할 때 보편적으로 사용하는 방법으로써 비교적 정확한 산란값을 제공한다고 알려져 있다. 지표면을 구성하는 식물층에서부터 산란되는 전파의 세기를 계산하기 위해 전파 적분방정식을 이용하여 전자계를 계산하지 않고 여러 요소들로 이루어진 하나의 매체(식물 층)를 통해 전달되는 전파의 세기를 이용하여 산란계수를 계산하는 방법이다.^[2]

그림 1에서 I_0 는 식물 층에 입사하는 전파의 세기이고, I_s^i 는 산란하는 전파의 세기이며 땅과 식물 두 개의 층으로 구성된 산란 모델 그림이다. 산란 메카니즘은 (1)맨땅-식물-맨땅, (2a)맨땅-식물, (2b)식물-맨땅, (3)식물, (4a)맨땅-나무기둥, (4b)나무기둥-맨땅, (5)맨땅에서의 전파 산란으로 그림 1에 나타냈다. 여기서 θ 는 입사각을 나타내고 d 는 식물 층의 두께이다.

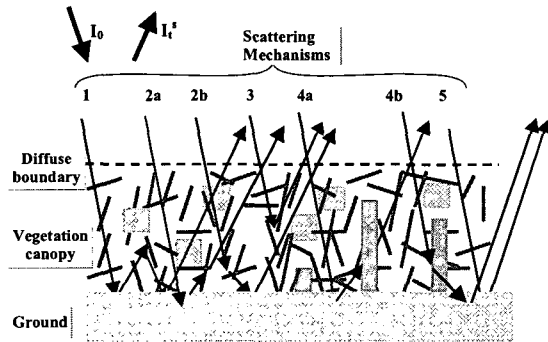


그림 1. Forward 전파 산란 모델
식물 층을 포함하는 지표면 위에서의 전파 산란의 세기는 다음과 같이 나타낼 수 있다^[3].

$$\begin{aligned} \bar{I}_s^i(\mu_0, \phi_0) &= \bar{T}_i(\mu_0, \phi_0) \bar{I}_0(-\mu_0, \phi_0) \\ &= [\bar{T}_c(\mu_0, \phi_0) + \bar{T}_g(\mu_0, \phi_0)] \bar{I}_0(-\mu_0, \phi_0) \quad (1) \end{aligned}$$

전체 투과행렬인 \bar{T}_i 는 식물 층에 의한

산란 행렬 \bar{T}_c 와 땅에 의한 산란 행렬인 \bar{T}_g 로 이루어져 있으며 $\mu_0 = \cos\theta_0$, θ_0 와 ϕ_0 는 입사각의 수직과 수평성분이다. 후방산란의 경우 입사각과 산란각이 θ 와 ϕ 모두 180° 의 차이를 보이지만 coherent 산란의 경우 입사각과 산란각이 ϕ 는 같고 θ 만 180° 의 차이를 보인다.

땅에서의 산란 세기를 계산해주는 투과행렬은 다음과 같다.

$$\bar{T}_g(\mu_0, \phi_0) = \exp(-\bar{k}_c^+ d / \mu_0) \bar{G}(\mu_0) \cdot \exp(-\bar{k}_c^- d / \mu_0) \quad (2)$$

여기서 \bar{k}_c^+ , \bar{k}_c^- 는 각각 식물 층으로 입사하는 전파와 식물 층으로부터 산란하는 전파를 나타내는 4×4 의 extinction 행렬을 나타낸다. 또한 $\bar{G}(\mu_0)$ 는 지면의 산란행렬로서 다음과 같다.

$$\bar{G}(\mu_0) = \frac{1}{\cos\theta_0} \bar{M}_m \quad (3)$$

여기서 \bar{M}_m 은 modified stokes scattering operator로서 지면으로부터의 산란을 나타내는 것이다. 식물 층에 대한 산란 행렬 $\bar{T}_c(\mu_0, \phi_0)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다^{[3][4]}.

$$\begin{aligned} T_c &= \frac{1}{\mu_0} \exp(-K_c^+ d / \mu_0) R'(\mu_0, \phi_0 + \pi) \varepsilon_c(-\mu_0, \phi_0 + \pi) \\ &\cdot A_1 \varepsilon_c^{-1}(\mu_0, \phi_0) R'(\mu_0, \phi_0) \exp(-K_c^- d / \mu_0) \\ &+ \frac{1}{\mu_0} \exp(-K_c^+ d / \mu_0) R'(\mu_0, \phi_0 + \pi) \varepsilon_c(-\mu_0, \phi_0 + \pi) \\ &\cdot A_2 \varepsilon_c^{-1}(\mu_0, \phi_0) \\ &+ \frac{1}{\mu_0} \varepsilon_c(\mu_0, \phi_0 + \pi) A_3 \varepsilon_c^{-1}(\mu_0, \phi_0) R'(\mu_0, \phi_0) \\ &\cdot \exp(-K_c^- d / \mu_0) \\ &+ \frac{1}{\mu_0} \varepsilon_c(\mu_0, \phi_0 + \pi) A_4 \varepsilon_c^{-1}(-\mu_0, \phi_0) \\ &+ \frac{1}{\mu_0} \exp(-K_c^+ d / \mu_0) \exp(-K_i^+ H_i / \mu_0) R(\mu_0) \\ &\cdot \varepsilon_i(-\mu_0, \phi_0 + \pi) A_5 \varepsilon_i^{-1}(\mu_0, \phi_0) \exp(-K_c^- d / \mu_0) \\ &+ \frac{1}{\mu_0} \exp(-K_c^+ d / \mu_0) \varepsilon_i(\mu_0, \phi_0 + \pi) A_6 \varepsilon_i^{-1}(\mu_0, \phi_0) \\ &\cdot R(\mu_0) \exp(-K_i^- H_i / \mu_0) \exp(-K_c^- d / \mu_0) \quad (4) \end{aligned}$$

여기서 A_n 은 각 산란 메커니즘(1, 2a, 2b, 3, 4a, 4b, 5)을 나타내는 4×4 matrix 이고 $R(\mu_0)$ 는 반사하는 지표면의 reflectivity matrix이다

$T_c(\mu_0, \phi_0)$ 와 $\bar{T}_g(\mu_0, \phi_0)$ 를 구하면 이에 의해 전체 $\bar{T}_r(\mu_0, \phi_0)$ 를 구할 수 있게 된다. 이로부터 전파의 산란 계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{vv}^0 &= 4\pi \cos\theta_0 [T_r(\mu_0, \phi_0)]_{11} \\ \sigma_{hh}^0 &= 4\pi \cos\theta_0 [T_r(\mu_0, \phi_0)]_{22} \\ \sigma_{hv}^0 &= 4\pi \cos\theta_0 [T_r(\mu_0, \phi_0)]_{21} \\ \sigma_{vh}^0 &= 4\pi \cos\theta_0 [T_r(\mu_0, \phi_0)]_{12} \end{aligned} \quad (5)$$

III 산란 모델 계산

Radiative transfer 이론을 적용한 후방 산란의 경우 그 정확도에 대한 검증이 수많은 측정결과 및 연구에 의해 이루어졌다. 하지만 forward 산란의 경우 비교할 만한 측정값이 없기 때문에 이론적으로 접근하고자 한다.

Physical optics 모델에서의 거칠기를 갖는 지표면에 대한 coherent field reflection은 다음과 같다^[5].

$$\Gamma_q(\theta) = \Gamma_{q0} e^{-2k^2 s^2 \cos^2 \theta} \delta_{pq} \quad (6)$$

식(6)에서 k 는 wavenumber이고, δ_{pq} 는 Kronecker delta 함수이다. Γ_{h0} , Γ_{v0} 는 각각 수평편파와 수직편파에 대한 Fresnel reflection coefficient이다. 그림 2는 거칠기가 서로 다른 지표면의 coherent 수직편파 반사계수를 계산한 것이다. 상대 유전율이 3.0인 지표면에 $ks=0.515$, $kl=5.4$ 인 비교적 낮은 거칠기의 표면과 $ks=1.39$, $kl=10.6$ 인 거친 표면, $ks=1.94$, $kl=11.8$ 인 아주 거친 표면에서의 coherent 반사계수는 수평 및 수직 편파 반사계수의 경우 거칠기가 증가함에 따라 급격히 감소함을 알 수 있다. 또한 수직 편파의 경우 거칠기와 상관없

이 동일한 각도에서 Brewster angle이 생김을 알 수 있다. 이는 coherent 반사계수에 대한 기존 논문과 동일한 결과이다.

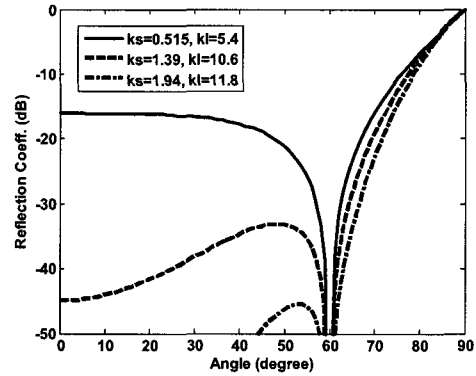
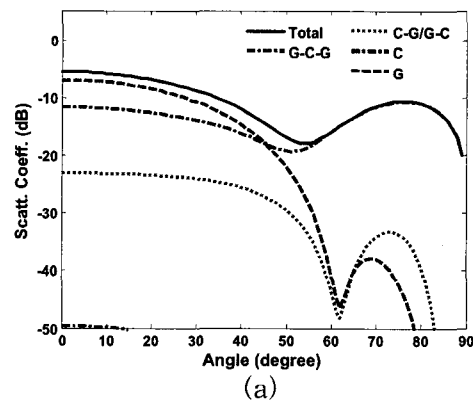


그림 2. 거칠기에 따른 수직편파 반사계수 계산

다음은 $ks=0.58$, $kl=3.9$ 인 거칠기와 수분 함유량 0.04인 땅위에 식물층이 형성된 것을 가정하고 모의실험을 하였다. 식물층은 $72\text{cm} \times 1.5\text{cm}$ 의 길이를 갖는 매우 긴 수풀로 가정하였으며, 그림 3. (a)는 수풀의 밀도가 $800(\text{m}^2)$ 그림 3. (b)는 $2000(\text{m}^2)$ 이며 각각 수직편파 산란계수를 모의 실험한 결과이다. 입사각도가 50도 이하에서 수풀의 밀도가 커짐에 따라 직접 땅에서의 산란계수는 줄어들고 수풀에서의 산란계수는 증가함을 알 수 있다. 그리고, 각각의 메커니즘에 의한 산란계수를 보면 지표면 거칠기 성분을 포함한 성분에서 Brewster angle에 의한 특성이 그림 3(a)에 60도



(a)

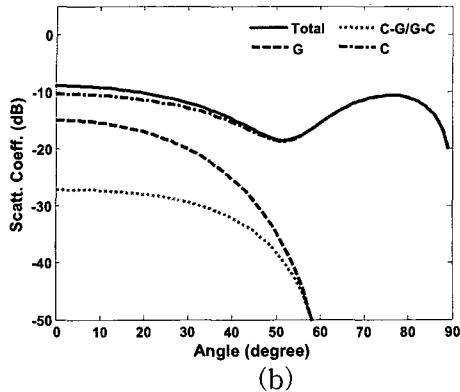


그림 3. 수풀층의 밀도 변화에 따른 수직편파 coherent 산란계수 결과

근처에서 나타남을 볼 수 있다.

그림 4는 동일한 조건에서 수풀의 밀도가 $800(m^2)$ 일 때, 지표면의 수분함유량이 변화함에 따라 수직, 수평, 직교 편파의 coherent 산란 계수를 모의실험을 해보았다. 예상할 수 있듯이 수분함유량이 증가함에 따라 산란 계수도 증가함을 볼 수 있다. 수직편파의 경우 Brewster angle에 의한 그래프의 기울기를 볼 수 있다. 식물층을 포함한 지표면 산란특성은 수평편파가 수직편파보다 모든 각도에서 크다는 것을 확인할 수 있다.

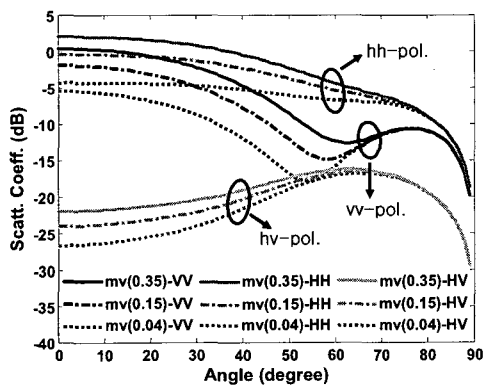


그림 4. 지표면의 수분함유량에 따른 수직, 수평, 직교편파의 coherent 산란계수 결과

IV. 결론

지표면에 대한 forward 및 coherent 산란 계산으로 1차 radiative transfer 이론을 적용하여 맨땅 및 수풀 층에서의 전자파 산란을 계산하였다. 수풀 층은 나뭇가지, 나뭇잎, 나무기둥들이 랜덤하게 분포되어 있는 것을 가정하여 모델을 만들었다. 모델의 입력 변수는 우선 땅에 대한 수분함유량(m_v), 지표 높낮이에 대한 표준편차(s), 상관 길이(ℓ)가 있으며, 수풀층에서는 나뭇잎, 나뭇가지, 기둥에 대한 길이 및 밀도이며, 입력 변수에 따른 모델의 변화를 계산하였다.

지표면의 forward 산란 모델은 지표면의 수분함유량, 수풀 및 나무의 길이, 밀도, 크기 등과 같은 biomass의 변화에 대해 후방산란 모델보다 더 많은 변화를 나타냄을 알 수 있었다. 이는 지표면의 변화를 예측하는 다양한 분야에 적용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Yisok Oh, Jin-Young Hong, Sung-Hwa Lee, "A Simple Microwave Backscattering Model for Vegetation Canopies", *KJEES*, vol. 5, no. 4, pp. 183-188, Dec. 2005
- [2] M. A. Karam, A. K. Fung, R. H. Lang, and N. S. Chauhan, "A microwave scattering model for layered vegetation", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 30, no. 4, pp. 767-784, Jul. 1992
- [3] F. T. Ulaby, C. Elachi, *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*, Artech House, 1990.
- [4] L. Tsang, J. A. Kong, and R. T. Shin, *Theory of Microwave Remote Sensing*, John Wiley & Sons, 1985
- [5] Roger D. De Roo, F. T. Ulaby, "Bistatic Specular Scattering from Rough Dielectric Surfaces", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 42, no. 2, pp. 220-231, Feb. 1994