

지표면 산란모델 개발과 JPL AirSAR 측정데이터와 비교

Development of a Scattering Model for Earth Surface and Comparison with JPL AIRSAR Data

이성화, 정구준, 오이석

Sung-Hwa Lee, Goo-Jun Jung, Yisok Oh

홍익대학교 전파통신공학과

Department of Radio Science and Communication Engineering, Hong_ik University

요 약

본 논문에서는 지표면 산란에 대한 모델을 개발하였고 이를 JPL AirSAR 측정데이터와 비교하였다. 식물이 없는 토양에서의 레이더 산란에 대해 새로 개발된 polarimetric empirical model(PEM)을 바탕으로, radiative transfer 이론을 이용하여 숲, 논, 밭 등 식물이 있는 토양에서의 레이더 산란 모델을 개발하였다. 지표면에서의 산란에 대해 개발된 이 모델을 AirSAR PACRIM-2 실험에서 얻은 측정 데이터와 비교하였다. 논, 채소밭, 풀 없는 토양, 소나무 숲 등에 대해 그 지역에서 얻은 지표면 변수를 이용한 산란모델 계산 결과를 측정 데이터와의 비교함으로써 이 산란모델의 사용가능 범위에 대한 논의가 이루어졌다.

1. 서 론

지표면 특성을 위성 레이더로 원격탐사하기 위한 연구와 함께 레이더 산란계수를 계산하는 산란 모델 개발에 대한 연구는 오래 전부터 이루어져왔다. 식물이 없는 토양에 대한 산란모델로는 small perturbation method(SPM), physical optics(PO) 모델, geometrical optics(GO) 모델 등이 오래 전부터 사용되어져 왔고, 최근에는 integral equation method(IEM) (Fung *et al.*, 1992) 등의 이론적 모델과 polarimetric empirical model(PEM) (Oh *et al.*, 2002) 등의 실험적 모델이 발표된바 있다. 숲, 논, 밭 등과 같은 식물이 있는 토양에서의 레이더 산란 계수 계산에는 Michigan microwave canopy scattering (MIMICS) 모델(Ulaby *et al.*, 1990) 등과 같이 radiative transfer 이론을 이용하여 왔다.

본 논문에서는 식물이 없는 토양에서의 레이더 산란에 대해 새로 개발된 polarimetric empirical model (Oh *et al.*, 2002)을 바탕으로, radiative transfer 이론을 이용하여 숲, 논, 밭 등 식물이 있는 토양에서의 레이더 산란 모델을 개발하였다. 이 산란모델은 MIMICS 모델보다 더 개선된 형태이며, 이 산란 모델을 기존 모델과 측정 데이터 값들과 비교함으로써 이 모델의 정확성을 검토하였다.

2000년에 수행되었던 PACRIM2 실험에서 논산-익산 지역에서 얻은 NASA/JPL AirSAR의 polarimetric 데이터를 이용하여 본 모델의 적용 범위를 알아보았다. 식물이 없는 토양에 관해서는 5개의 지역(2개의 고르게 민 흙과 3개의 학교 운동장)을 선정하고 토양의 수분 함유량과 표면 거칠기를 측정하여 Ground truth 데이터를 얻은 후 본 모델의 예측 결과 뿐만 아니라 기존의 산란 모델인 IEM과도 비교 하

였다.

또한, 식물이 있는 토양에 대해서는 10개의 논과 2개의 소나무 숲, 2개의 채소밭을 선정하여 Ground truth 데이터를 얻은 후 본 모델의 예측 결과와 비교하였다.

2. 산란모델의 개발

2-1. 식물이 없는 토양에서의 산란

AIRSAR 측정데이터는 상업용 툴인 ENVI3.5를 사용하여 추출하였다. SAR 측정 당일 Ground truth 데이터를 얻지 못하여 3일 후에 측정한 것을 기준으로 하여 기존 모델에 포함 시켰다. 본 모델에서 식물이 없는 토양일 때에는 PEM 모델(Oh *et al.*, 2002)을 단독 수행하는 것과 같고, 이 PEM 수식은 다음과 같다.

$$\sigma_{vh}^0 = 0.11m_v^{0.7} (\cos\theta)^{2.2} [1 - \exp(-0.32(ks)^{1.8})] \quad (1)$$

$$\sigma_w^0 = \frac{\sigma_{vh}^0}{q}, \quad (2)$$

여기서

$$q = 0.1 \left(\frac{s}{l} + \sin(1.3\theta) \right)^{1.2} \{1 - \exp[-0.9(ks)^{0.8}]\}$$

$$\sigma_{hh}^0 = p\sigma_w^0 = \frac{p}{q}\sigma_{vh}^0, \quad (3)$$

$$여기서 \quad p = 1 - \left(\frac{\theta}{90^\circ} \right)^{0.35m_v^{0.65}} \cdot e^{-0.4(ks)^4}$$

비교를 위해 사용된 IEM 수식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_{qp}^0 &= \frac{k^2}{2} \exp(-2k_z^2\sigma^2) \\ &\quad \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \sigma^{2n} |I_{qp}^n|^2 \frac{W^n(-2k_x, 0)}{n!} \\ &+ \frac{k^2}{4\pi} \exp(-3k_z^2\sigma^2) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(2k_z^2\sigma^2)^{n+m}}{n!m!} \cdot a \\ &\quad \cdot \frac{k^2}{16\pi} \exp(-2k_z^2\sigma^2) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(k_z^2\sigma^2)^{n+m}}{n!m!} \cdot b \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

$$a = \int \text{Re}[f_{qp}^* F_{qp}(u, v)] \cdot W^n(u - k_x, v) \cdot W^m(k_x + u, v) dudv \quad (5)$$

$$b = \int \left[|F_{qp}(u, v)|^2 + F_{qp}(u, v) F_{qp}^*(-u, -v) \right] \cdot W^m(u - k_x, v) \cdot W^n(k_x + u, v) dudv \quad (6)$$

$$I_{qp}^n = (2k_z)^n f_{qp} \exp(-\sigma^2 k_z^2) + \frac{k_z^n [F_{qp}(-k_x, 0) + F_{qp}(k_x, 0)]}{2} \quad (7)$$

$$여기서, \quad f_{hv} = f_{vh} = 0, \quad f_{hh} = -2R_\perp / \cos\theta, \\ f_{vw} = 2R_p / \cos\theta$$

$$k_x = k \sin\theta, \quad k_z = k \cos\theta.$$

2-2. 식물이 있는 토양에서의 산란

Radiative Transfer 이론은 산란 입자들을 포함하고 있는 매질을 통과하는 에너지의 전달을 다루고 있다. 식물이 있는 토양에서의 산란은 식 (1)-(3)의 지표면 산란 모델을 바탕으로 식물층을 포함한 모델을 이용하였다. 이 벡터 Radiative Transfer 방정식은 아래 식과 같이 특정 세기 \bar{I} (specific intensity)의 변화량으로 쓸 수 있다[3].

$$\frac{d\bar{I}(\bar{r}, \hat{s})}{ds} = -\bar{k}_e \bar{I}(\bar{r}, \hat{s}) + \int_{4\pi} \bar{P}(\hat{s}, \hat{s}') \bar{I}(\bar{r}, \hat{s}') d\Omega' \quad (8)$$

여기서 특정 세기 \bar{I} 는 4x1의 열 행렬, \bar{k}_e 는 4x4의 extinction 행렬이고 \bar{P} 는 phase 행렬, \bar{r} 은 위치 벡터이다. 그리고 \hat{s} 는 전파 방향을 나타낸다.

그림 1과 같은 후방 산란 세기에 대한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{I}_i^-(\theta_0, \phi_0) &= [\bar{T}_r^-(\theta_0, \phi_0) + \bar{T}_s^-(\theta_0, \phi_0)] \bar{I}_0^-(\pi - \theta_0, \phi_0) \\ &= \bar{T}_r^-(\theta_0, \phi_0) \bar{I}_0^-(\pi - \theta_0, \phi_0) \end{aligned} \quad (9)$$

투과 행렬 \bar{T}_r^- 는 토양 위의 식물 층과 나무기둥 층에 의한 산란이고 투과 행렬 \bar{T}_s^- 는 토양에 의한 산란이다.

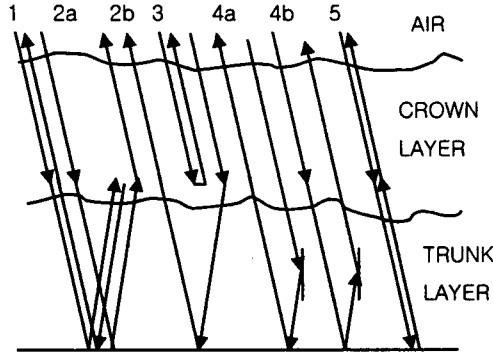


그림 1. 숲의 후방 산란 메커니즘

투과 행렬을 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 T_c(\theta_0, \phi_0) = & \frac{1}{\mu_0} e^{-k_c^* d / \mu_0} R'(\mu_0, \phi_0 + \pi) \\
 & \cdot \varepsilon_c(-\mu_0, \phi_0 + \pi) A_1 \varepsilon_c^{-1}(\mu_0, \phi_0) \\
 & \cdot R'(\mu_0, \phi_0) e^{-k_c^* d / \mu_0} \\
 & + \frac{1}{\mu_0} e^{-k_c^* d / \mu_0} R'(\mu_0, \phi_0 + \pi) \\
 & \cdot \varepsilon_c(-\mu_0, \phi_0 + \pi) A_2 \varepsilon_c^{-1}(-\mu_0, \phi_0) \\
 & + \frac{1}{\mu_0} \varepsilon_c(\mu_0, \phi_0 + \pi) A_3 \varepsilon_c^{-1}(\mu_0, \phi_0) \\
 & \cdot R'(\mu_0, \phi_0) e^{-k_c^* d / \mu_0} \\
 & + \frac{1}{\mu_0} \varepsilon_c(\mu_0, \phi_0 + \pi) A_4 \varepsilon_c^{-1}(-\mu_0, \phi_0) \\
 & + \frac{1}{\mu_0} e^{-k_c^* d / \mu_0} e^{-k_t^* H_t / \mu_0} R(\mu_0) \\
 & \cdot \varepsilon_t(-\mu_0, \phi_0 + \pi) A_5 \varepsilon_t^{-1}(-\mu_0, \phi_0) e^{-k_c^* d / \mu_0} \\
 & + \frac{1}{\mu_0} e^{-k_c^* d / \mu_0} \varepsilon_t(\mu_0, \phi_0 + \pi) A_6 \varepsilon_t^{-1}(\mu_0, \phi_0) \\
 & \cdot R(\mu_0) e^{-k_t^* H_t / \mu_0} e^{-k_c^* d / \mu_0} \quad (10)
 \end{aligned}$$

식 (10)에서 ε_t 와 ε_c 는 나무기둥과 식물 층의 4x4 고유행렬 이고 $A_1 \sim A_6$ 는 그림 1에서 나타내는 4x4 행렬의 후방 산란 메커니즘 이다.

$$\begin{aligned}
 T_g(\mu_0, \phi_0) = & e^{-k_c^* d / \mu_0} e^{-k_t^* H_t / \mu_0} G(\mu_0) \\
 & \cdot e^{-k_t^* H_t / \mu_0} e^{-k_c^* d / \mu_0} \quad (11)
 \end{aligned}$$

여기서 $\mu = \cos \theta$, R 은 반사 행렬이다.

이 모든 산란 투과 행렬로부터 편파 후방 산란 계수는 다음과 같이 얻어진다.

$$\sigma_{pq}^0 = 4\pi [\bar{T}_i(\theta_0, \phi_0)]_{mm} \cos \theta_0 \quad (12)$$

여기서 $p, q = v, h$ 이고 $m, n = 1, 2$ 이다.

3. PACRIM-2 실험 데이터와 산란 모델 예측결과 비교

각 실험 영역은 크게 식물이 없는 토양과 식물이 있는 토양 영역으로 나눌 수 있고 식물이 없는 토양 영역으로는 고르게 민 밭과 학교 운동장으로 식물이 있는 토양 영역에서는 소나무 숲, 채소밭, 논으로 구분 할 수 있다. SAR 데이터는 C-밴드 (5.3GHz), L-밴드 (1.26GHz)의 두 밴드의 값을 사용 하였다.

비교적 표면 거칠기가 균일한 식물이 없는 토양으로는 학교 운동장을 들 수 있고, 대표적인 운동장의 픽셀이미지는 다음과 같다.

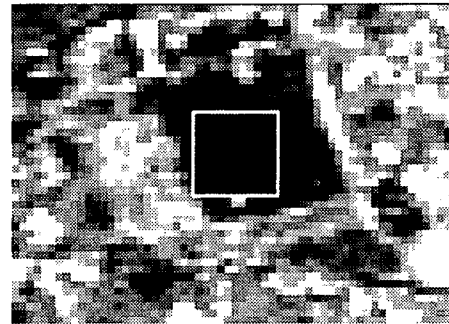


그림 2. 운동장의 pixel image.

그림 3은 그림 2에 보인 운동장을 포함한 3개의 운동장들에 대한 실험 데이터와 본 연구의 산란 모델 결과를 비교하여 보여준다. 이 계산에는 5.3 GHz에서 $ks=0.8$ $kl=10.9$, $mv=0.045$ 가 이용되었으며, 3개의 운동장 데이터가 이용되었다. 여기서 k 는 wavenumber이고, s 는 rms height, l 은 correlation length, mv 는 volumetric soil moisture 이다.

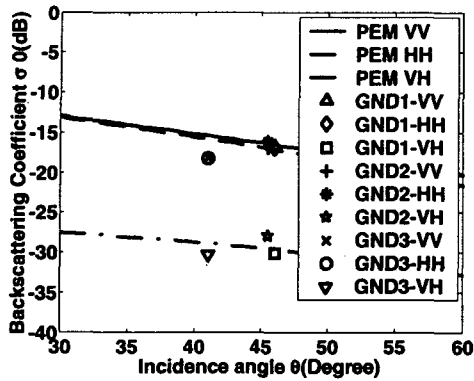
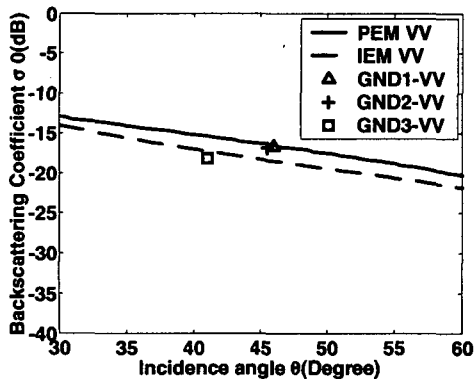
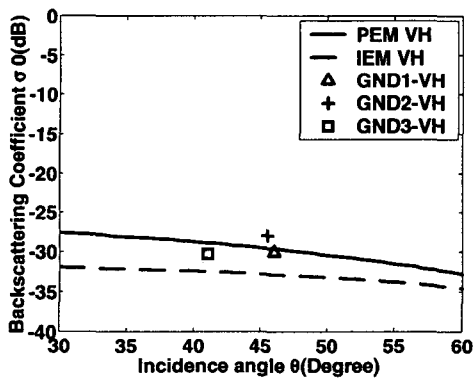


그림 3. 운동장에서 PEM과 SAR 데이터 비교



(a)



(b)

그림 4. 운동장에서 PEM, IEM과 측정 데이터 비교 (5.3 GHz); (a) VV-편파와 (b) VH-편파.

그림 4 (a)는 VV-편파에서 그림 3에 보인 운동장에 대한 실험 데이터와 본 연구

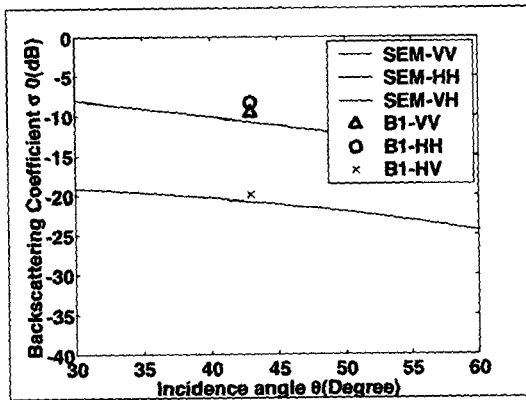
의 산란 모델 결과 그리고 IEM 모델을 비교하여 보여준다. 그림 4 (b)에서는 VH-편파에 대한 비교를 보여준다. 이 계산에는 5.3 GHz에서 $k_s=0.8$, $k_l=10.9$, $m_v=0.045$ 가 이용되었다.

그림 5는 측정된 지표면 변수의 정확도가 데이터의 결과에 어떤 영향을 주는지를 보여 주는 예로써 (a)에서는 측정된 지표면 변수를 (b)에서는 데이터 fitting을 위해 변경된 지표면 변수를 사용해서 본 연구의 산란 모델과 IEM 모델을 비교하여 보여준다. 이 계산에는 5.3 GHz에서 (a)는 $k_s=5.561$, $k_l=28.581$, $m_v=0.0672$ 일 때 이고 (b)는 $k_s=2.381$, $k_l=28.581$, $m_v=0.1372$ 일 때의 값이다.

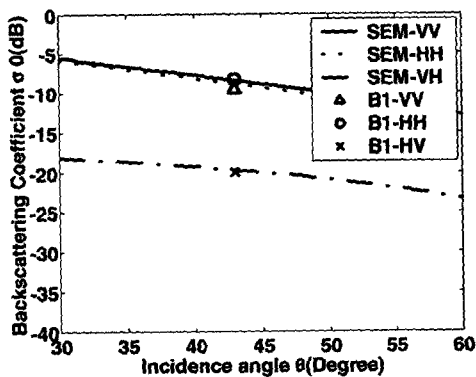
각 그림에서 보여지듯이 운동장과 식물이 없는 토양에서는 연구된 모델과 SAR 측정 데이터가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이 그림들은 C-band에서의 결과들이며, L-band의 결과는 여기서 보이지 않았지만, C-밴드보다는 덜 정확하였다. 일치하지 않는 원인들 중에는 Ground truth 데이터의 부정확 함에서 오는 오류도 있을 수 있으며 (그림 5 참조), 본 연구의 모델의 정확도를 검토하기 위해서는 수치 해석적 연구의 결과 [4] 등과도 비교 검토할 필요가 있다.

또한, 논 지역과 채소밭 지역 그리고 소나무 숲 지역에서 NASA(JPL) AIRSAR로 얻은 측정데이터와 본 모델에 Ground truth 데이터를 넣어 얻은 계산결과를 비교하였다.

그림 6에서 사용한 논 Ground truth 데이터는 벼 잎의 유효율 $18.1+i7.1$, 잎 길이 40.7cm, 잎 폭 11.2cm, 두께 0.36mm, 잎 밀도 2430 (개수/ m^2)이고, 벼 줄기의 유효율 $24+i10$, 줄기 지름 5.4mm, 줄기 길이 80cm, 줄기 밀도 21(개수/ m^2)이고, 지표면 변수는 $k_s=0.5$, $k_l=10$, $m_v=0.40$ 으로 계산 하였다.

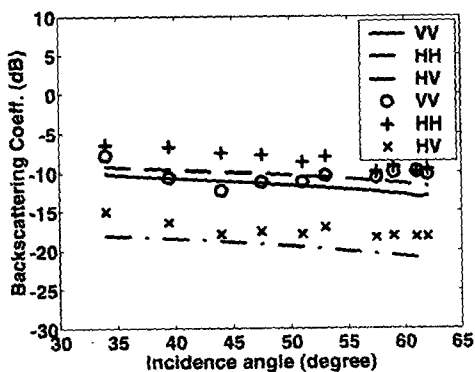


(a)

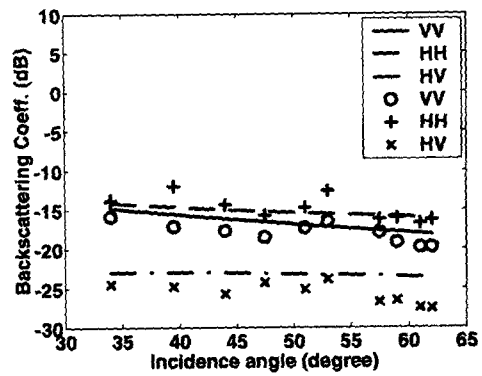


(b)

그림 5. 풀 없는 토양에서의 PEM과 SAR 데이터 비교 (C-band): (a) 측정된 지표면 변수 사용의 경우와 (b) 변경된 지표면 변수 사용의 경우.



(a)



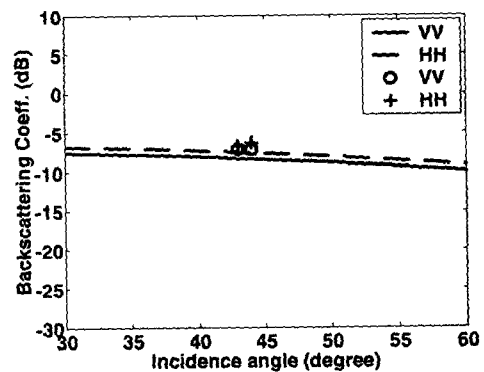
(b)

그림 6. 논외의 계산 결과와 측정 결과 비교;

(a) C-band와 (b) L-band

그림 7에서는 동일편파 (VV-, HH-편파)에 대해 C-밴드와 L-밴드에서 각각 생강 밭을 측정한 결과와 계산 결과를 비교하였다. 측정값과 계산 결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이 그림에서 보이지 않았지만 HV 편파에서는 계산값이 측정값 보다 약 10dB 정도 낮았다.

그림 8에서는 소나무 숲을 나무기둥, 잎, 가지, 토양으로 나누어 Ground truth 데이터를 얻고, 이를 이용하여 얻은 모델의 계산 결과를 측정값과 비교하였다.



(a)

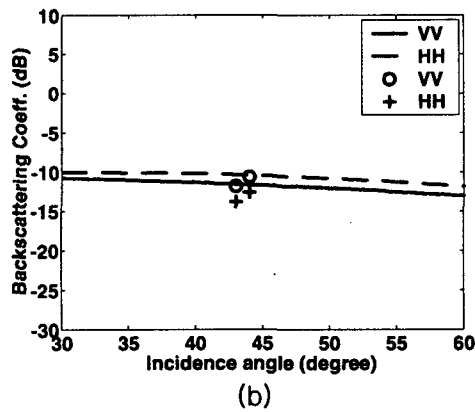


그림 7. 채소밭의 계산 결과와 측정 결과 비교 : (a) C-band와 (b) L-band

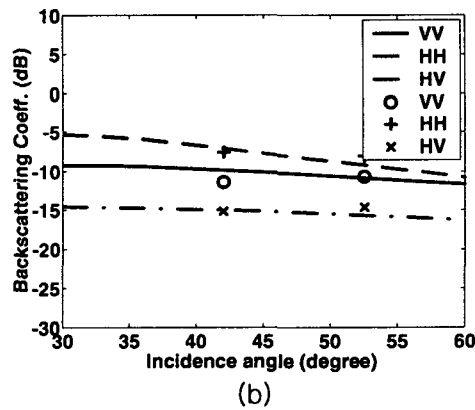
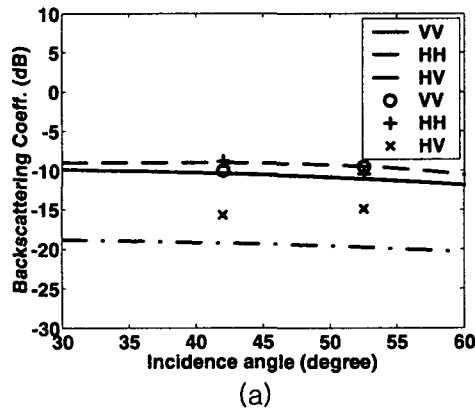


그림 8. 소나무 숲의 계산 결과와 측정 결과 비교 : (a) C-band와 (b) L-band

각 그림에서 보여지듯이 VV, HH편파는 큰 오차가 없이 일치함을 볼 수가 있다. 하지만 HV편파는 오차가 생김을 볼 수 있다. 이는 1차 RTM의 이론적인 한계와 PO

모델의 이론적인 한계로써 HV 편파 값은 측정값과 오차를 나타내고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 식물이 없는 토양을 포함하여 숲, 논, 밭 등 일반적인 지표면의 레이더 산란 계수를 계산해 낼 수 있는 지표면 산란모델을 개발하였다. 우선, NASA/JPL AIRSAR로부터 식물 층이 없는 토양에서 얻어진 데이터들과 본 모델의 계산 결과를 비교하였다. 또한, 논, 숲, 밭의 측정된 레이더 산란 계수와도 비교하였으며, 비교적 잘 맞는 것을 보여주었다.

5. 참고문헌

- [1] Fung, A.K., Z. Li, and K. S. Chen, 1992, "Backscattering from a randomly rough dielectric surface", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 30(2): 356-369.
- [2] Oh, Y., K. Sarabandi, F.T. Ulaby, 2002, "Semi-empirical Model of the Ensemble-averaged Differential Mueller Matrix for Microwave Backscattering from Bare Soil Surfaces", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 40(6): 1348-1355.
- [3] Ulaby, F.T., K. Sarabandi, K. McDonald, M. Whitt and M.C. Dobson, 1990, "Michigan Microwave canopy scattering model," *Int. J. Remote Sensing*, 11(7): 1223-1253.
- [4] Oh, Y., Y.M. Jang, K. Sarabandi, 2002, "Full-wave Analysis of Microwave Scattering from Randomly Oriented Inhomogeneous Dielectric Structures above an Impedance Surface," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 40(11): 2522-2526.