

# 풀밭 지역 편파별 후방 산란 특성 분석용 알고리즘 개발

김재형, 이진원, 오이석  
홍익대학교 전자공학과

## 요 약

본 논문에서는 풀밭으로 덮힌 지역의 초고주파 대역 편파별 후방 산란을 분석하는데 있어서 Radiative Transfer 이론의 첫 번째 해를 이용하였다. 풀밭지역에서의 잎은 사각형 형태의 resistive sheet으로 모델화 시키고, 잎의 크기와 방향성은 불규칙적으로 흩어져 있다고 가정하였다. 땅에서의 흙의 수분 함유량과 표면 거칠기도 고려하였다. 이러한 지역에서의 후방 산란 계수는 풀밭 지역과 레이더 요소들에 따라 각각 다른 계산 결과를 나타낸다. 측정은 15 GHz 대역의 레이더 시스템을 사용하여 풀 층에서의 산란 계수를 측정하고 풀 층에서의 산란 모델을 이용하여 계산 결과와 측정값을 비교하였고 이 모델을 이용하여 Visual-Basic을 이용한 사용자 프로그램인 TSM(Total Scattering Model)을 제작하였다.

## I. 서 론

논, 밭, 숲 등에서의 레이더 산란을 계산하는 대표적인 기술로는 Radiative Transfer Method(RTM)[1,2]이 사용되어 왔다. 산란 개체들을 일일이 고려하지 않고 유전율이 연속적으로 불규칙하게 분포한다고 가정하여 계산 할 수도 있으나 ground truth와 연계하여 비교하기가 어려운 단점이 있으므로 산란 개체들의 산란 행렬을 이용하는 방법이 널리 이용되고 있다[1,2]. 풀밭의 산란 계수 계산을 위한 RTM기술에는 우선적으로 나뭇잎의 산란 행렬이 필요하며 풀잎, 나뭇잎의 산란 행렬을 구하는 가장 대표적인 방법으로는 resistive sheet 기술이 있다[3]. 또한 나뭇잎의 유전율을 얻기 위해서는 수분 함유량을 측정하여 실험식을 이용해 유전율을 얻는 기술을 사용할 수 있다[4].

본 논문에서는 우선 풀 층의 후방 산란 계수를 계산하기 위해 풀 층 밑의 흙 표면 거칠기를 고려한 Radiative Transfer 이론을 이용하였다. 풀잎은 사각형 형태의 resistive sheet으로 모델링 하였고, 잎의 크기(폭, 넓이)와 방향(수평각, 수직각)은 불규칙하게 흩어진 형태로 고려하였다. 풀밭지역의 요소들(잎의 크기, 잎의 방향, 풀 층의 두께, 잎과 흙의 수분 함유량, 흙 표면의 rms 높이, 흙 표면의 correlation 길이)과 레이더 요소들(입사각, 주파수, 편파)들을 고려한 풀밭의 산란 계수를 계산하였고 Ku-band에서 잔디와 배추밭의 산란 계수를 측정하여 RTM 계산 결과와 비교하였다. 또한 이 모델을 이용하여 Visual 프로그램인 이용한 TSM(Total Scattering Model)을 제작하였다.

## II. Radiative Transfer 모델

Radiative Transfer 이론은 산란 입자들을 포함하고 있는 매질을 통과하는 에너지의 전달을 다루고 있다. 이 벡터 Radiative Transfer 방정식은 아래 식과 같이 특정 세기  $\bar{I}$  (specific intensity)의 변화량으로 쓸 수 있다[5].

$$\frac{d\bar{I}(\bar{r}, \hat{s})}{ds} = -\bar{k}_e \bar{I}(\bar{r}, \hat{s}) + \int_{4\pi} \bar{P}(\hat{s}, \hat{s}') \bar{I}(\bar{r}, \hat{s}') d\Omega' \quad (1)$$

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.

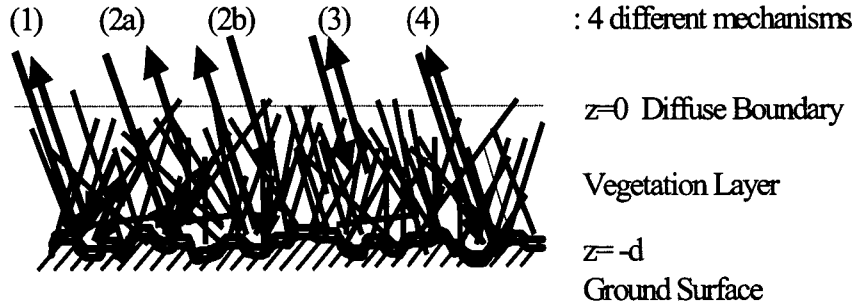


그림 1. 식물 층으로부터의 후방 산란 메카니즘

그림 1과 같은 후방 산란 세기에 대한 식은 다음과 같다.

$$\bar{I}_i(\theta_0, \phi_0) = [\bar{T}_c(\theta_0, \phi_0) + \bar{T}_g(\theta_0, \phi_0)] \bar{I}_0(\pi - \theta_0, \phi_0) = \bar{T}_i(\theta_0, \phi_0) \bar{I}_0(\pi - \theta_0, \phi_0) \quad (2)$$

투과 행렬  $\bar{T}_c$ 는 토양 위의 식물 층에 의한 산란이고, 투과 행렬  $\bar{T}_g$ 는 토양에 의한 산란이다. 이러한 투과 행렬을 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{T}_c(\theta_0, \phi_0) &= \frac{1}{\mu_0} e^{-\bar{k}_e d / \mu_0} \bar{R}(\theta_0) \bar{E}(\pi - \theta_0, \phi_0 + \pi) \\ &\cdot \frac{1 - \exp\{-[\beta_i(-\mu_0, \phi_0 + \pi) / \mu_0 + \beta_j(\mu_0, \phi_0) / \mu_0]d\}}{\beta_i(-\mu_0, \phi_0 + \pi) / \mu_0 + \beta_j(\mu_0, \phi_0) / \mu_0} \\ &\cdot [E^{-1}(-\mu_0, \phi_0 + \pi) P(-\mu_0, \phi_0 + \pi; \mu_0, \phi_0) E(\mu_0, \phi_0)]_{ij} \\ &\cdot \bar{E}^{-1}(\theta_0, \phi_0) \bar{R}(\theta_0) e^{-\bar{k}_e d / \mu_0} \\ &+ \frac{1}{\mu_0} \bar{E}(\theta_0, \phi_0 + \pi) \\ &\cdot \frac{\exp[-\beta_j(\mu_0, \phi_0)d / \mu_0] - \exp[-\beta_i(\mu_0, \phi_0 + \pi)d / \mu_0]}{\beta_i(\mu_0, \phi_0 + \pi) / \mu_0 - \beta_j(\mu_0, \phi_0) / \mu_0} \\ &\cdot [E^{-1}(\mu_0, \phi_0 + \pi) P(\mu_0, \phi_0 + \pi; \mu_0, \phi_0) E(\mu_0, \phi_0)]_{ij} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \cdot \overline{\overline{E^{-1}}}(\theta_0, \phi_0) \overline{\overline{R}}(\theta_0) e^{-\overline{\overline{k_z}} d / \mu_0} \\
& + \frac{1}{\mu_0} e^{-\overline{\overline{k_z}} d / \mu_0} \overline{\overline{R}}(\theta_0) \overline{\overline{E}}(\pi - \theta_0, \phi_0 + \pi) \\
& \cdot \frac{\exp[-\beta_i(-\mu_o, \phi_o + \pi)d / \mu_o] - \exp[-\beta_j(-\mu_o, \phi_o)d / \mu_o]}{-\beta_i(-\mu_o, \phi_o + \pi) / \mu_o + \beta_j(-\mu_o, \phi_o) / \mu_o} \\
& \cdot [E^{-1}(-\mu_o, \phi_o + \pi)P(-\mu_o, \phi_o + \pi; -\mu_o, \phi_o)E(-\mu_o, \phi_o)]_{ij} \\
& \cdot \overline{\overline{E^{-1}}}(\theta_0, \phi_0) \\
& + \frac{1}{\mu_0} \overline{\overline{E}}(\theta_0, \phi_0 + \pi) \\
& \cdot \frac{1 - \exp\{-[\beta_i(\mu_o, \phi_o + \pi) / \mu_o + \beta_j(-\mu_o, \phi_o) / \mu_o]d\}}{\beta_i(\mu_o, \phi_o + \pi) / \mu_o + \beta_j(-\mu_o, \phi_o) / \mu_o} \\
& \cdot [E^{-1}(\mu_o, \phi_o + \pi)P(\mu_o, \phi_o + \pi; -\mu_o, \phi_o)E(-\mu_o, \phi_o)]_{ij} \\
& \cdot \overline{\overline{E^{-1}}}(\pi - \theta_0, \phi_0) \tag{3}
\end{aligned}$$

식 (3)에서  $i=j$ 인 경우에는 분모가 0이 되므로 Le'Hospital 정리를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\overline{\overline{T_g}}(\theta_0, \phi_0) = e^{-\overline{\overline{k_z}} d / \mu_0} \overline{\overline{G_4}}(\theta_0) e^{-\overline{\overline{k_z}} d / \mu_0} \tag{4}$$

여기서  $\mu_0 = \cos \theta_0$ ,  $\overline{\overline{R}}$ 은 반사 행렬이다. 이 모든 산란 투과 행렬로부터 편파 후방 산란 계수는 다음과 같이 얻어진다.

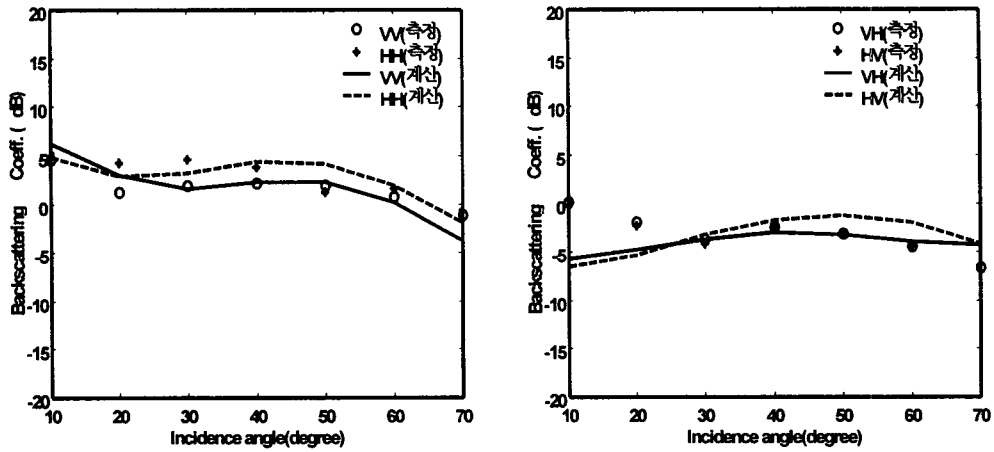
$$\sigma_{pq}^0 = 4\pi \cos \theta_0 [\overline{\overline{T_g}}(\theta_0, \phi_0)]_{mn} \tag{5}$$

여기서  $p, q=v, h$ 이고  $m, n=1, 2$ 이다.

### III. 측정결과와 RTM 계산 결과 비교

잘 보정된 scatterometer를 이용하여 15 GHz에서 잔디와 배추밭에서의 후방 산란 계수를  $10^\circ$ 부터  $70^\circ$ 까지  $10^\circ$  간격으로 측정하였다. 한 각도에서 각각 VV, HH, VH, HV 편파의 산란 계수를 측정하였으며, 각 편파, 각도 별로 50개의 통계적으로 독립적인 잔디와 배추밭을 측정하였다. 각 각도별 측정이 끝날 때마다 같은 거리의 도체구와 trihedral을 측정하였으며, 레이더 측정이 끝나자마자 ground truth 데이터를 취득하였다.

먼저 잔디의 경우를 보면, 실제 측정된 ground truth 데이터를 입력하였을 때에는 측정결과 보다 훨씬 작은 계산 값을 보이는데 앞에서의 다중 산란을 포함하지 않기 때문일 것으로 생각되어 RTM 계산에서는 밀도를 2배정도 올리고 ( $N=200000$ ) 계산하였다. 잔디에서의 측정결과와 RTM의 계산결과를 비교하여 그림 2에 보였다



(a) (b)  
 그림 2. 잔디의 RTM 계산 결과와 측정 결과 비교;  
 (a) VV와 HH 편파, (b) VH와 HV 편파

그림 2(a)는 VV와 HH 편파 비교를 위하여 평탄면에서의 PO모델을 이용한 RTM계산과 측정결과 값을 나타내었다. VV와 HH 편파는 측정값과 수치가 잘 일치하고 있다. 그림 2(b)는 VH와 HV 편파 비교를 위하여 평탄면에서의 PO모델을 이용한 RTM계산과 측정 결과 값을 나타내었다. PO모델의 이론적인 VH와 HV 편파 값은 존재하지 않으므로 측정값과는 오차를 나타내고 있다.

배추밭의 경우에는 배추모종의 크기와 방향성에 대한 통계적 수치를 얻기 위해 48(갓수/ $m^2$ )개의 샘플을 선택하였다. 이 경우에도 측정 데이터를 RTM에 입력하였을 때 측정 데이터보다 훨씬 낮은 결과가 나와 밀도를 850 개/ $m^3$ 로 높여서 그림 3처럼 비교하였다.

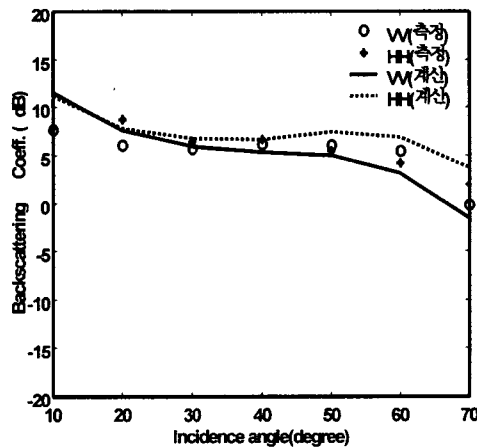
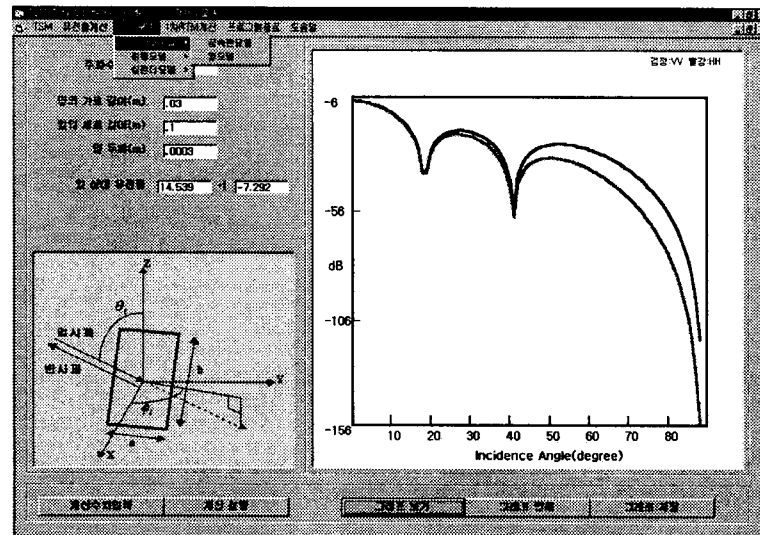
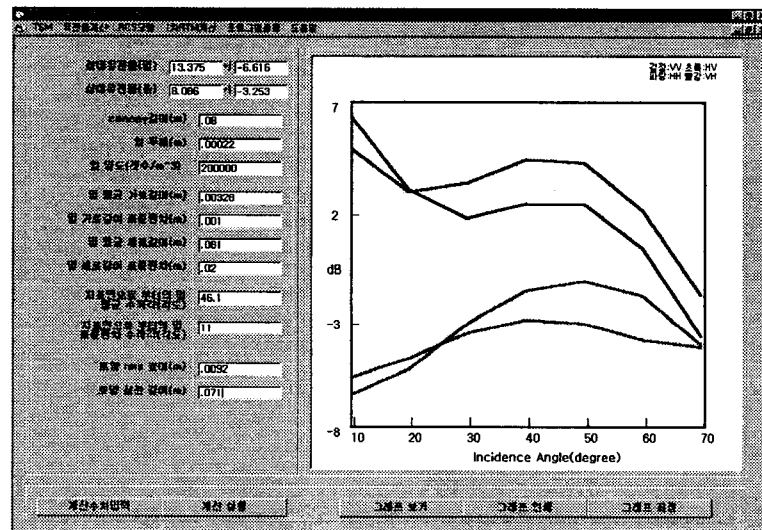


그림 3. 배추의 VV/HH 편파에서 RTM 계산 결과와 측정 결과 비교;

이러한 RTM 모델을 이용하여 사용자 프로그램인 TSM을 그림 4처럼 제작하였다. TSM은 나뭇잎, 줄기, 풀층 산란을 간편하게 계산할 수 있도록 직접 입력값을 넣고 계산한 후 그래프로 바로 확인 할 수 있는 사용자 편의 프로그램이다. TSM 구성은 유전을 계산 부분, 단일 개체 RCS 계산 부분, 1차 RTM을 이용한 풀층 산란 계산 부분으로 구성되어있다. 각각의 계산을 수행한 후 계산된 수치는 텍스트 파일로 해당 디렉토리에 파일로 존재하기 때문에 바로 수치를 확인할 수 있으며 동일 화면에서 그래프로도 확인할 수 있다.



(a)



(b)

그림 4. TSM 구성 화면; (a) 나뭇잎 계산, (b)풀층 계산

#### IV. 결 론

본 논문에서는 풀층으로 구성된 지역에서의 마이크로파 편파별 후방 산란 계수를 계산하는데 있어서 Radiative Transfer 이론의 1차 근사식을 이용하였다. Radiative Transfer 모델(RTM)의 결과와 측정 결과를 비교함으로써 RTM의 정확성을 검토하였고, 이러한 지역에서의 후방 산란 계수는 풀밭 지역과 레이더 변수들에 따라 각각 다른 계산 결과를 나타냄을 보여 주었다. 그러나 VV와 HH 편파는 비교적 잘 일치하는데 반해 VH와 HV 편파는 계산과 측정값의 차이를 나타낸다. 이러한 오차는 1차 근사 RTM의 이론적인 한계와 땅에서의 산란 모델인 PO모델의 이론적인 한계로써 HV와 VH 편파를 정확히 계산 할 수 없었다. 1차 근사 RTM을 이용할 때에는 ground truth로 얻은 밀도보다 높은 밀도값을 이용하면 대체적으로 측정값과 비교할 수 있는 계산 결과를 얻을 수 있었다. 1차 근사 RTM의 정확성을 향상시키려면 2차 이상의 RTM을 계산해야 하지만 계산이 매우 복잡하여 이용이 사실상 불가능하다. 또 다른 방법으로는 MOM이나 FDTD등의 수치 해석적 방법으로 좁은 범위에서 다중 산란을 정확하게 계산하여 보완하는 것을 고려해 볼 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- [1] Tsang, L., J. A. Kong, and R. T. Shin, *Theory of Microwave Remote Sensing*, Wiley-Interscience, New York, 1985
- [2] F. T. Ulaby, R.K. Moore, and A.K. Fung, *Microwave Remote Sensing, Active and Passive*, Vol. I, II, III, Artech House, Norwood, MA, 1982, 1986.
- [3] F. T. Ulaby, K. Sarabandi, K. McDonald, M. Whitt, and M.C. Dobson, *Michigan microwave canopy scattering model*, Int. J. Remote Sensing, vol. 11, no. 7, pp.1223-1253, 1990.
- [4] F. T. Ulaby, M. A. El-rayes, "Microwave Dielectric Spectrum of Vegetation-Part II: Dual-Dispersion Model", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. GE-25, pp.550-557, 1987.
- [5] F. T. Ulaby. and C. Elachi (ed), *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*, Artech House, Norwood, MA, 1990.