

풀밭에서의 마이크로파 편파별 산란 계수 계산용 Radiative Transfer 모델의 정확성 검토

Examination of the Radiative Transfer Model for Computing Microwave Polarimetric Scattering Coefficients of Vegetation Canopies

김재형 · 이진원 · 오이석

Jae-Hyung Kim · Jin-Won Lee · Yi-Sok Oh

요 약

본 논문에서는 잔디, 채소 등으로 덮힌 풀밭의 마이크로파 편파별 산란 특성을 분석하는데 이용되는 Radiative Transfer Model(RTM)의 정확성을 검토하였다. 풀밭지역에서의 잎은 사각형 형태의 resistive sheet으로 간주하였고, 잎의 크기와 방향은 불규칙적으로 분포한다고 가정하였다. 지표면의 수분 함유량과 표면 거칠기도 고려하였으며, 이러한 지역에서의 후방 산란 계수의 값들을 계산하였다. 풀밭 변수들과 레이더 변수들에 따른 15 GHz 대역의 polarimetric scatterometer 시스템을 사용하여 풀 층에서의 후방 산란 계수를 측정하고 이 RTM의 계산 결과와 측정값을 비교하여 RTM 모델의 정확성을 검토하였다.

Abstract

The Radiative Transfer Model(RTM) for computation of microwave polarimetric backscattering coefficients of a various types of vegetation canopies has been examined in this paper. Leaves in the vegetation canopy are modeled by rectangular resistive sheets, which sizes and orientations are randomly distributed. Surface roughness and soil moisture of soil surface are considered in this computation. The backscattering coefficients of grasslands are computed for various values of radar parameters and canopy parameters. A polarimetric scatterometer radar system at 15 GHz has been used for measurement of the scattering coefficient from a grass canopy and a cabbage canopy. The computation results obtained by the RTM for the canopies are compared with the measurements for examination of the RTM.

I. 서 론

원격 탐사 기술을 이용하여 육지 상태를 정량적으로 감시하고 탐지하려면 풀 층이나 나무의 레이더 산란 모델이 필요하다. 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 계산할 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 행

「본 연구는 국방과학연구소 전자파 특화연구센터의 지원으로 수행된 과제의 일부임」
홍익대학교 전자통신공학과(Department of Radio Communication Engineering, Hongik University)
· 논문 번호 : 20000228-023
· 수정완료일자 : 2000년 3월 27일

를 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]. 풀밭지역의 하층부에 해당하는 땅에서의 레이더 산란 특성도 매우 중요한 요소이다. 토양에서의 산란 계수에 가장 큰 영향을 주는 것은 수분 함유량이 아니고 표면 거칠기이므로 레이더 산란 계수 계산을 위해서는 수분 함유량 뿐만 아니라 토양의 표면 거칠기 데이터도 정확해야 한다^{[5],[6]}. 이러한 요소들을 이용하여 먼저 단일 잎에서의 정확한 RCS를 계산하고^{[7],[8]}, 단일 잎들이 구성된 풀 층에서의 산란은 RTM을 적용하여 계산할 수 있다^[9]. 이러한 RTM의 정확성에 의문이 제기되고 있으며^[10], 이 모델이 풀 층에서의 레이더 산란에 적용될 수 있는지 검토할 필요가 있다.

본 논문에서는 우선 풀 층의 후방 산란 계수를 계산하기 위해 풀 층 밑의 흙 표면 거칠기를 고려한 Radiative Transfer 모델을 연구하였다. 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 계산하여 분석하였다. 계산값과의 비교를 위해서 실내에서 풀밭의 후방 산란 계수를 측정할 수 있는 Ku-band용 scatterometer를 구성한 후, 잔디와 배추밭의 산란 계수를 각각 편파별, 각도별로 측정하여 RTM 계산 결과와 비교하였다.

II. Resistive sheet 방법을 이용한 단일 잎 산란 행렬 계산

풀밭 층의 산란을 계산하기 위해서는 먼저 단일 잎의 산란 계산이 먼저 이루어져야 한다. 수평 편파와 수직 편파로 구성된 전계는 아래 식과 같이 표현된다^[3].

$$E^i = (E_v^i \hat{v}_i + E_h^i \hat{h}_i) e^{ik_s \hat{k}_i \cdot \vec{r}} \quad (1)$$

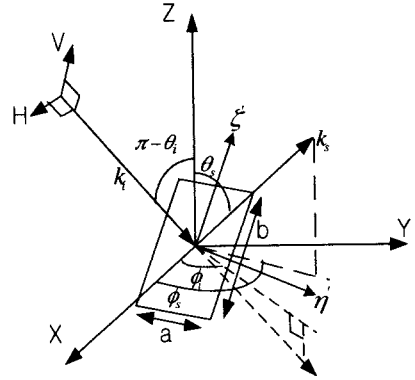


그림 1. 나뭇잎에서의 산란 계산에 사용된 좌표계

위 식을 이용하여 산란 전계를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} E_v^s \\ E_h^s \end{bmatrix} = \frac{\exp(ik_s r)}{r} [S] \begin{bmatrix} E_v^i \\ E_h^i \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 [S]는 산란 행렬이며 잎의 특성과 레이더 변수의 함수이다.

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{vv} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{hh} \end{bmatrix} \quad (3)$$

그림 1은 단일 잎에서의 산란 계산에 사용된 좌표계를 나타낸다.

그림 1에서처럼 직사각형 모양의 잎 하나에 레이더 전계가 입사할 때 잎에 유기된 표면 전류 J_0 를 이용하면 산란 행렬을 다음처럼 얻을 수 있다.

$$S_{pq} = \frac{iZ_0 ab}{4\pi} k_0 \frac{\sin U}{U} \frac{\sin V}{V} \cdot [(J_0)_{pq} - (\hat{k}_s \cdot (J_0)_{pq}) \hat{k}_s] \quad p, q = v, h \quad (4)$$

여기서 U, V 는 각각 $U = \frac{ka}{2} (\hat{k}_i - \hat{k}_s) \cdot \hat{\eta}$, $V = \frac{kb}{2} (\hat{k}_i - \hat{k}_s) \cdot \hat{\zeta}$ 가 되며 a, b 는 각각 잎의 가로와 세로 길이이다. $J_0 = \Gamma J_{pc}^0$ 이고 J_{pc}^0 는 완전 도체의 physical optics 근사 전류 값이다. Γ 는 입사파의 편파에 따라 다음처럼 얻는다^[8].

$$\Gamma_E = \frac{1}{1 + \frac{2R \cos \theta}{Z_0}}, \quad \Gamma_H = \frac{1}{1 + \frac{2R}{Z_0 \cos \theta}} \quad (5)$$

여기서 R 은 resistive sheet의 resistivity이며 다음처럼

럼 계산된다^[8].

$$R = \frac{iZ_0}{k_0\tau(\epsilon - 1)} \quad (6)$$

식 (6)에서의 τ 는 잎의 두께이고, ϵ 은 유전율을 말한다. 이 유전율은 잎의 수분 함유량을 이용하여 계산할 수 있다^[4]. 식 (4)를 이용하여 각각의 수평, 수직 편파의 산란 행렬을 구할 수 있다.

그림 2는 나뭇잎의 크기가 가로 2λ , 세로 4λ 이고 나뭇잎의 유전율은 $\epsilon = 14.539 - j7.292$, 두께는 0.015λ 이며, $y=0$ 인 평면에 가로길이 a 가 x 축에 평행하도록 나뭇잎이 놓여 있을 때 입사각의 수직각을 110° 로 놓고 ϕ 방향으로 입사각을 변화한 경우의 후방 산란의 RCS ($\sigma_{\rho\rho} = 4\pi |S_{\rho\rho}|^2$)를 계산한 결과이다. VV편파가 HH편파보다 입사각의 ϕ 가 증가함에 따라서 높고 VH와 HV편파는 동일한 값을 나타내고 있다. 여기서 H편파는 전계의 방향이 도체판과 평행(horizontal)일 경우이며 V편파는 자계의 방향이 도체판과 평행할 때이고, VV편파는 V편파로 송신하고 V편파로 수신할 경우의 편파 조합을 의미한다.

그림 3에서는 단일 잎의 RCS계산 알고리즘을 검토하기 위하여 평판 도체를 이용한 RCS를 resistive sheet 모델로 계산하고 측정결과와 비교하였다^[7]. 그림 1에서 $z=0$ 인 평면에 가로길이 a 가 x 축에 평행하도록 가로, 세로 각각 20 cm인 평판 알루미늄 도체가 놓여 있고 주파수는 10 GHz일 때 VV와 HH편파에서 각각 입사각이 0° 에서 90° 까지 변화할 경우를 측정

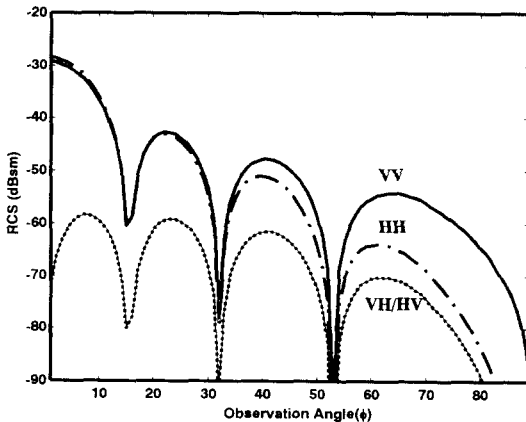
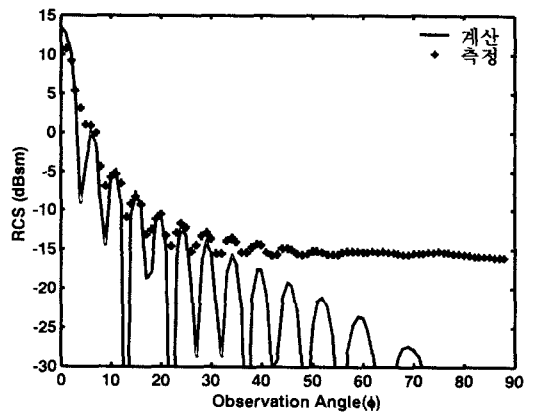
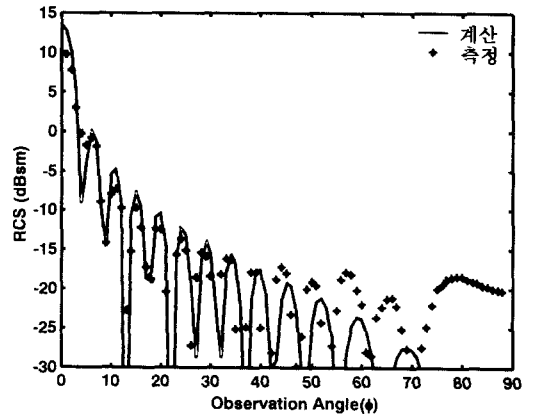


그림 2. 나뭇잎의 후방 산란 RCS 계산

하였다. 그림 3에서 보듯이 높은 각도($\theta > 50^\circ$)에서는 계산된 RCS가 측정 결과와 잘 맞지 않는다는 것을 알 수 있고, 특히 금속판이 지면에 수직으로 세워져 있을 때의 VV편파에서(만일 누워져 있다면 HH편파에서) 금속판에 유기되는 침투 전류 영향으로 매우 큰 오차가 발생함을 알 수 있다. 나뭇잎의 경우에는 나뭇잎의 구조 때문에 정확한 측정이 어려워 측정결과와 비교하진 못했지만, 이 resistive sheet 모델링은 대략적인 계산만을 포함한다는 것을 미루어 알 수 있다. 이런 영향은 나무줄기와 가지들을 RTM에 포함시킬 때에도 마찬가지이며 정확한 계산 결과를 포함시키는 것은 계산의 복잡성 때문에 불가능하므로 이런 오차는 RTM에서 감수해야 한다.



(a)



(b)

그림 3. 금속판의 계산된 RCS와 측정값의 비교; (a) VV편파, (b) HH편파

III. Radiative Transfer 모델

Radiative Transfer 이론은 산란 입자들을 포함하고 있는 매질을 통과하는 에너지의 전달을 다루고 있다. 이 벡터 Radiative Transfer 방정식은 특정 세기 \bar{T} (specific intensity)의 변화량으로 쓸 수 있다 [9].

실제 식물 층에서의 산란은 그림 4에서처럼 단순하지 않다. 위에 의해 수 차례 산란되고 땅에서 여러 번 반사되어 후방 산란이 이루어지는 다중 산란이 식물 층에서의 산란 메카니즘이 된다. 다중 산란을 정확히 해석할 수 있다면 가장 이상적인 산란 해석 방법이 되겠지만 수식의 복잡성과 계산 과정의 어려움 때문에 이를 구현하지 못하고 여기서는 그림 4에서 보인 것처럼 5가지 경우의 산란 메카니즘을 다루었다. 메카니즘 1, 2a, 2b, 3은 입사파가 산란개체를 1번 산란되는 경우를 나타낸 1차 RTM의 해를 의미하며 메카니즘 4는 입사파가 불규칙적으로 거친 토양에 의해서 산란되는 경우를 나타낸 것이다. 다중 산란을 포함하는 고차 RTM은 복잡성 때문에 컴퓨터의 능력상 계산이 불가능하므로 여기서 발생하는 오차는 1차 RTM에서 감수해야 한다. 이러한 후방 산란 세기에 대한 식은 다음과 같다.

$$\bar{T}_i^-(\theta_0, \phi_0) = [\bar{T}_c^-(\theta_0, \phi_0) + \bar{T}_g^-(\theta_0, \phi_0)]$$

$$\bar{T}_0^-(\pi - \theta_0, \phi_0) = \bar{T}_i^-(\theta_0, \phi_0) \bar{I}_0^-(\pi - \theta_0, \phi_0) \quad (7)$$

투과 행렬 \bar{T}_c^- 는 토양 위의 식물 층에 의한 산란이고, 투과 행렬 \bar{T}_g^- 는 토양에 의한 산란이다.

이러한 일련의 과정을 거쳐 유도된 투과 행렬은

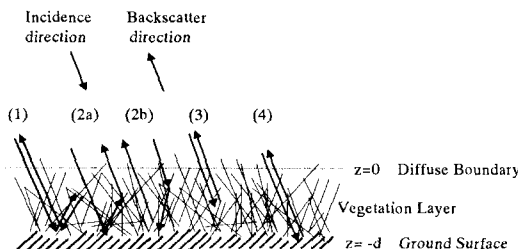


그림 4. 식물층으로부터의 후방 산란 메카니즘

다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{T}_c^-(\theta_0, \phi_0) = & \frac{1}{\mu_0} e^{-\bar{k}_z d / \mu_0} \bar{R}^-(\theta_0) \\ & \cdot \bar{E}^-(\pi - \theta_0, \phi_0 + \pi) \\ & \cdot \frac{1 - \exp\{-[\beta_i(-\mu_0, \phi_0 + \pi) / \mu_0 \\ & + \beta_j(\mu_0, \phi_0) / \mu_0] d\}}{\beta_i(-\mu_0, \phi_0 + \pi) / \mu_0 \\ & + \beta_j(\mu_0, \phi_0) / \mu_0} \\ & \cdot [\bar{E}^{-1}(-\mu_0, \phi_0 + \pi) \\ & \cdot \bar{P}^-(\mu_0, \phi_0 + \pi; \mu_0, \phi_0) \bar{E}^-(\mu_0, \phi_0)]_{ii} \\ & \cdot \bar{E}^{-1}(\theta_0, \phi_0) \bar{R}^-(\theta_0) e^{-\bar{k}_z d / \mu_0} \\ & + \frac{1}{\mu_0} \bar{E}^-(\theta_0, \phi_0 + \pi) \\ & \cdot \frac{\exp[-\beta_i(\mu_0, \phi_0) d / \mu_0]}{\beta_i(\mu_0, \phi_0 + \pi) / \mu_0} \\ & \cdot \frac{-\exp[-\beta_i(\mu_0, \phi_0 + \pi) d / \mu_0]}{-\beta_i(\mu_0, \phi_0) / \mu_0} \\ & \cdot [\bar{E}^{-1}(\mu_0, \phi_0 + \pi) \\ & \cdot \bar{P}^-(\mu_0, \phi_0 + \pi; \mu_0, \phi_0) \bar{E}^-(\mu_0, \phi_0)]_{ii} \\ & \cdot \bar{E}^{-1}(\theta_0, \phi_0) \bar{R}^-(\theta_0) e^{-\bar{k}_z d / \mu_0} \\ & + \frac{1}{\mu_0} e^{-\bar{k}_z d / \mu_0} \bar{R}^-(\theta_0) \bar{E}^-(\pi - \theta_0, \phi_0 + \pi) \\ & \cdot \frac{\exp[-\beta_i(-\mu_0, \phi_0 + \pi) d / \mu_0]}{-\beta_i(-\mu_0, \phi_0 + \pi) / \mu_0} \\ & \cdot \frac{-\exp[-\beta_j(-\mu_0, \phi_0) d / \mu_0]}{+\beta_j(-\mu_0, \phi_0) / \mu_0} \\ & \cdot [\bar{E}^{-1}(-\mu_0, \phi_0 + \pi) \\ & \cdot \bar{P}^-(\mu_0, \phi_0 + \pi; -\mu_0, \phi_0) \bar{E}^-(\mu_0, \phi_0)]_{ii} \\ & \cdot \bar{E}^{-1}(\theta_0, \phi_0) \\ & + \frac{1}{\mu_0} \bar{E}^-(\theta_0, \phi_0 + \pi) \\ & \cdot \frac{1 - \exp\{-[\beta_i(\mu_0, \phi_0 + \pi) / \mu_0 \\ & + \beta_j(-\mu_0, \phi_0) / \mu_0] d\}}{\beta_i(\mu_0, \phi_0 + \pi) / \mu_0 \\ & + \beta_j(-\mu_0, \phi_0) / \mu_0} \\ & \cdot [\bar{E}^{-1}(\mu_0, \phi_0 + \pi) \\ & \cdot \bar{P}^-(\mu_0, \phi_0 + \pi; -\mu_0, \phi_0) \\ & \cdot \bar{E}^-(\mu_0, \phi_0)]_{ii} \cdot \bar{E}^{-1}(\pi - \theta_0, \phi_0) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\overline{T}_g(\theta_0, \phi_0) = e^{-\overline{k}_s d / \mu_0} \overline{G}_4(\theta_0) e^{-\overline{k}_r d / \mu_0} \quad (9)$$

여기서 $\mu_0 = \cos \theta_0$, \overline{R} 은 반사 행렬이다.

$$R(\mu) = \begin{bmatrix} |R_v|^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & |R_h|^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{Re}(R_v R_h^*) & -\text{Im}(R_v R_h^*) \\ 0 & 0 & \text{Im}(R_v R_h^*) & \text{Re}(R_v R_h^*) \end{bmatrix} \quad (10)$$

R_v , R_h 는 각각 수직, 수평 편파의 Fresnel 반사 계수로써 이러한 식을 그대로 적용하기 위해서는 거칠기가 없는 평판 모양의 땅의 구조에 적용될 수 있다. 하지만 실제 땅의 구조는 거칠기가 존재하므로 땅의 거친 표면에 적합한 다음과 같은 반사 행렬 \overline{R}^* 을 적용해야 한다^[2].

$$\overline{R}^* = \overline{R} e^{-(2k_s \cos \theta)^2} \quad (11)$$

여기서 k 는 전파 상수, s 는 땅의 rms 높이이다.

\overline{E} 는 eigen 행렬로써 다음과 같은 과정을 거쳐서 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} M_{mn} &= \frac{i2\pi N}{k_o} \langle S_{mn}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \theta_j, \phi_j) \rangle \\ & \quad m, n = v, h \\ &= \frac{i2\pi N}{k_o} \iiint \int p_k(a, b, \theta_p, \phi_p) \\ & \quad \cdot S_{mn}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \theta_j, \phi_j) da db d\theta_p d\phi_p \quad (12) \end{aligned}$$

$\langle \rangle$ 표시는 산란 계수 S 를 평균화 한 것이고, N 은 앞의 밀도, k_o 는 전파 상수, p_k 는 joint probability density를 나타낸다. 이 \overline{M} 행렬로부터 \overline{E} 행렬을 구할 수 있다^[3]. 식 (8)의 각 항은 차례로 각각 그림 4에서 1, 2a, 2b, 3의 산란 메카니즘을 나타낸다. 이것은 phase 행렬 \overline{P} 로부터 계산될 수 있다. 폴층에서의 phase 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P(\theta_s, \phi_s; \theta_i, \phi_i) &= \sum_{k=1}^K N_k \\ & \cdot \iiint \int p_k(a, b, \theta_p, \phi_p) \\ & \cdot \overline{L}_k(\theta_s, \phi_s; \theta_i, \phi_i; \theta_p, \phi_p) da db d\theta_p d\phi_p \quad (13) \end{aligned}$$

여기서 k 는 입자의 형태(잎, 줄기, 곡물 등등),

p_k 는 joint probability density이며 $\overline{L}_k(\theta_s, \phi_s; \theta_i, \phi_i; \theta_p, \phi_p)$ 은 Mueller 행렬로써 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L = & \begin{bmatrix} |S_{vv}|^2 & |S_{vh}|^2 \\ |S_{hv}|^2 & |S_{hh}|^2 \\ 2\text{Re}(S_{vv}S_{hv}^*) & 2\text{Re}(S_{vh}S_{hh}^*) \\ 2\text{Im}(S_{vv}S_{hv}^*) & 2\text{Im}(S_{vh}S_{hh}^*) \end{bmatrix} \\ & \left. \begin{array}{ll} \text{Re}(S_{vh}^*S_{vv}) & -\text{Im}(S_{vh}^*S_{vv}) \\ \text{Re}(S_{hh}^*S_{hv}) & -\text{Im}(S_{hh}^*S_{hv}) \\ \text{Re}(S_{vv}S_{hh}^* + S_{vh}S_{hv}^*) & -\text{Im}(S_{vv}S_{hh}^* - S_{vh}S_{hv}^*) \\ \text{Im}(S_{vv}S_{hh}^* + S_{vh}S_{hv}^*) & \text{Re}(S_{vv}S_{hh}^* - S_{vh}S_{hv}^*) \end{array} \right\} \quad (14) \end{aligned}$$

Muller 행렬의 모든 요소는 앞 절에서 언급한 산란 행렬 \overline{S} 로부터 얻어진다.

땅의 산란 행렬 \overline{G} 는 표면 산란의 이론식들에 의해 계산할 수 있다. 이론식들로는 SPM(Small Perturbation Method), PO(Physical Optics), GO (Geometrical Optics), SEM(Semi-Empirical Model) 등이 있다. 이 모든 산란 투과 행렬로부터 편파 후방 산란 계수는 다음과 같이 얻어진다.

$$\sigma_{ba}^0 = 4\pi \cos \theta_0 [\overline{T}_t(\theta_0, \phi_0)]_{mm} \quad (15)$$

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

RTM을 계산하기 위해서 가장 계산 시간이 많이 소요되는 부분이 \overline{P} (phase 행렬)와 \overline{M} 행렬을 계산할 때의 4중 적분 부분이며 계산의 정확성과 시간 소요에 매우 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 Gaussian-Quadrature(GQ) 적분방법을 사용하였으며 적분 시간과 정확성은 가우시안 적분 가중치의 스텝이 결정한다. 적분 가중치의 스텝에 따른 정확성을 알아보기 위하여 다음에 보여질 잔디의 입력 요소를 이용하여 적분 가중치의 스텝에 따른 후방 산란 계수의 정확성을 계산해 보았다. 적분점이 60이상이면 각 경우에 0.5% 미만의 오차만을 주기 때문에 본 계산에서는 60-points GQ 적분법을 이용하였다.

위의 과정을 통해서 얻어진 Radiative Transfer 모델을 이용하여 다음과 같이 임의의 폴 층에서의 산란계수를 계산하였다. 앞의 가로길이 평균 $a = 4$ mm, 세로길이 평균 $b = 10$ cm이고 단위 부피당 잎의 개수 $N = 50000\text{m}^{-3}$, 폴층의 두께 $d = 10$ cm, 잎의

수분 함유량 $m_{gv}=0.5 \text{ g/cm}^3$, 흙의 수분 함유량 $m_w=0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 평균 수직각 $\langle \theta \rangle = 40^\circ$ 이다. 앞의 가로, 세로길이와 수직각은 가우시안 분포를 사용하고 수평각은 균일한 분포로 놓았다. 폴층 아래 흙의 표면은 rms 높이가 0.5 cm인 exponential correlation 함수를 사용하였고 correlation 길이는 5 cm로 놓았다. 거친 표면으로 구성된 땅의 모델은 PO모델을 이용하였다. 그림 5는 위의 조건을 이용하여서 15 GHz 에서 계산된 입사각에 따른 편파별 후방 산란 계수 이다.

그림 5에서 보는 것처럼 이 경우에 HH 편파가 VV 편파 보다 높은 산란 계수를 나타내고 있다. VH 와 HV 편파는 VV와 HH 편파 보다 낮은 산란 계수를 보이고 있으며 VH와 HV는 거의 동일한 산란 계수를 나타내고 있다. 입사각이 증가함에 따라 VH와 HV 편파가 증가하는 모습을 보이고 있는데 이는 거친 땅에서의 산란을 PO모델을 적용하였기 때문에 나타나는 현상으로 이론적인 PO모델에서 토양에서의 VH와 HV 편파 산란은 계산되지 않지만 실제로는 낮은 각도에서 높은 교차편파 산란 특성을 갖는다. 또한, 입사각이 낮을 경우에는 땅에서의 산란의 영향이 크고 입사각이 증가할수록 앞에서의 산란의 영향이 커짐을 알 수 있었다. 이 경우에 메카니즘 1의 영향이 가장 낮고 메카니즘 3의 영향이 높은 모습을 보여주는데 이는 직접 앞만을 맞고 오는 메카니즘 3의 영향이 앞과 땅을 맞고 오는 메카니즘 1과 메카니즘 2보다 더 많은 영향을 나타냄을 알 수 있게 한다. 이 결과들은 앞의 밀도나 토양의 거칠기

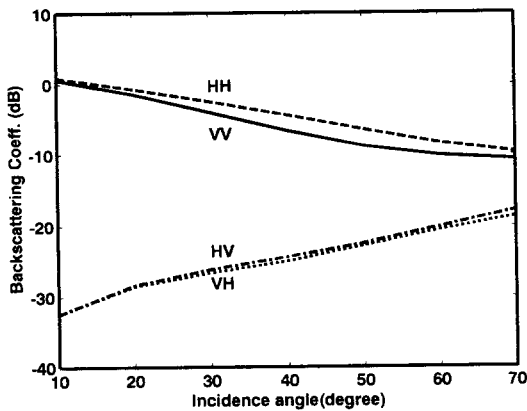


그림 5. 입사각에 따른 편파별 후방 산란 계수 계산

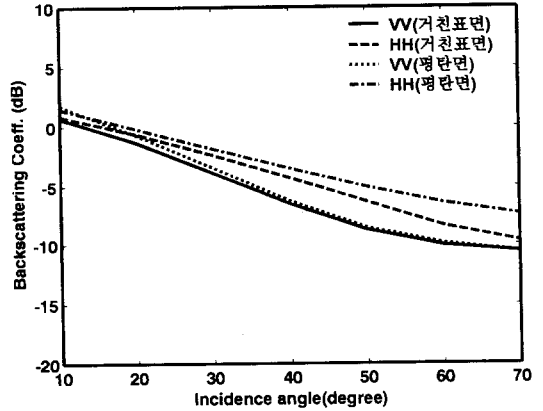


그림 6. 토양 표면의 거칠기를 포함한 경우의 계산 결과

등의 영향을 받아 다른 모습을 보일 수 있다.

식 (11)에서 언급한 것처럼 실제 땅은 거칠기가 존재하고 이는 평탄면과는 차이가 있다. 이에 그림 6은 그림 5에서 계산한 동일한 입력 값을 가지고 땅의 반사 행렬을 식 (11)의 \overline{R} (거친표면)와 \overline{R} (평탄면)을 사용했을 경우로 나누어서 계산하였다.

그림 6에서 볼 수 있듯이 토양의 거칠기를 고려해 주면 토양에서의 반사 계수 크기가 줄어, 전체적인 산란 계수 크기가 줄어들게 된다.

IV. Scatterometer 측정결과와 RTM 계산 결과의 비교

측정에 사용된 Ku-밴드 실내용 polarimetric scatterometer 시스템은 그림 7과 같이 크게 안테나 부분과 회전판 부분, 그리고 컴퓨터를 포함한 Network Analyzer 부분으로 나누어져 있다.

사용된 두 개의 안테나는 Ku-밴드 (12~18 GHz)의 혼 안테나이며, 서로 직각이 되도록 배치하여 수직과 수평 편파 조합의 산란을 측정할 수 있도록 하였다. 다음으로 회전판과 회전판 조정기는 불규칙한 구조의 target들에서 통계적으로 독립적인 target들을 얻기 위해 한 입사각에서 일정 각도씩 움직이도록 하였다. Network Analyzer는 HP 8510C를 사용하였으며 이 장비의 측정 주파수 대역은 45 MHz에서 20 GHz 까지 가능하다. 이 Network Analyzer의 중요한 기능 중의 하나인 time-gating을 수행함으로써 실내

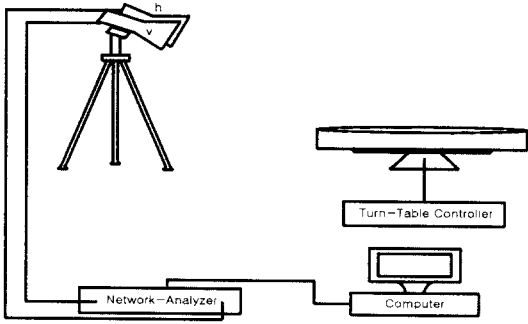


그림 7. Ku-밴드 실내용 편파 레이더 시스템

에서도 마치 무반사체에서와 같이 불요잡음이 없는 순수한 데이터를 얻을 수 있었다. Point target의 RCS를 측정할 때에는 달리 distributed target의 산란 계수를 측정할 때에는 각 산란 지점마다의 거리와 각도에 따른 안테나 이득이 다르므로 Illumination integral

을 계산해야 한다. 실험에 사용된 Ku-밴드 혼 안테나의 principal plane에서의 VV, HH, VH, HV 방사 패턴을 이용하여 삽입 보정 과정을 거쳐 3차원 방사패턴을 구한 후, 3차원 방사패턴은 Illumination Integral에 이용되어 산란계수 σ° 를 구하는데 사용된다. 이 scatterometer를 보정(calibrate) 하기 위해 Single Target Calibration Technique (STCT)^[11]을 이용하였으며 보정용 target으로는 지름이 10 cm인 도체 구를 이용하였고, trihedral을 보조로 사용하였다.

잘 보정된 scatterometer를 이용하여 15 GHz에서 잔디와 배추밭에서의 후방 산란 계수를 10°부터 70°까지 10° 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 측정하였으

표 1. Ground truth 측정값

측정변수		잔디밭	배추밭
풀층 높이(cm)		8	20
앞 넓이	평균(cm)	3.28	넓은 곳 : 7.5 cm 좁은 곳 : 1 cm
	표준편차(cm)	0.89	
앞 길이	평균(cm)	8.10	넓은 곳 : 10.4 cm 좁은 곳 : 8.4 cm
	표준편차(cm)	1.73	
앞 수직 각도	평균(degree)	46.1	47.6
	표준편차(degree)	23.8	
앞 수평 각도	평균(degree)	134.2	
	표준편차(degree)	95.9	
앞 두께	평균(mm)	0.22	0.79
	표준편차(mm)	0.056	
앞 밀도(개/m ³)		83000	370
앞 수분 함유량 mg(g/m ³)		0.56	0.59
토양 수분 함유량 mv(cm ³ /cm ³)		0.20	0.19
토양 거칠기	rms 높이(cm)	0.92	0.61
	상관 길이(cm)	7.1	5.0
측정 일자		1998년 8월	1999년 10월

며, 레이더 측정이 끝나자마자 ground truth 데이터를 취득하였다. 잔디와 배추밭에서 측정된 ground truth 데이터는 표 1과 같다.

표 1의 ground truth 데이터를 입력하였을 때에는 측정결과보다 훨씬 작은 계산 값을 보이는데 앞에서의 다중 산란을 포함하지 않기 때문일 것으로 생각되어 RTM 계산에서는 밀도를 2배 정도 올리고 (N=200000) 계산하였다. 그림 8은 잔디의 VV 편파 후방 산란 계수 계산에서 밀도가 주는 영향을 보여 주고 있다.

측정값인 N=83000일 때는 측정보다 5.5 dB 낮으며 N=166000 일 때는 측정보다 0.9 dB 낮은 값을 보여준다. Ground truth에서 잔디 앞만 세었지만, 잔디 뿌리, 줄기들도 무시하지 못할 정도의 산란 값을 주었을 것이므로 밀도를 높여야 되었을 것이다.

잔디에서의 scatterometer 측정 결과와 RTM의 계산 결과를 비교하여 그림 9에 보였다

그림 9(a)는 VV와 HH 편파 비교를 위하여 평탄면에서의 PO모델을 이용한 RTM계산과 측정결과 값을 나타내었다. VV 편파는 측정값과 수치가 잘 일치하고 있으나 HH 편파는 측정값과 약간의 오차를 나타내고 있다. 그림 9(b)는 VH와 HV 편파 비교를 위하여 평탄면에서의 PO모델을 이용한 RTM계산과 측정결과 값을 나타내었다. PO모델의 이론적인 VH와 HV 편파 값은 존재하지 않으므로 측정값과는 오차를 나타내고 있다.

이번에는 배추밭에서의 후방 산란 계수를 측정하여 RTM계산과 비교하였다. 역시 측정 시스템 구성

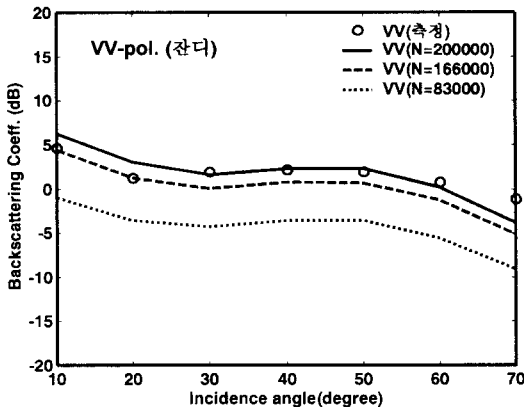
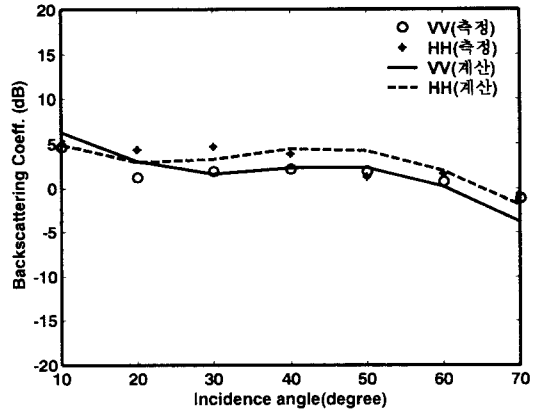
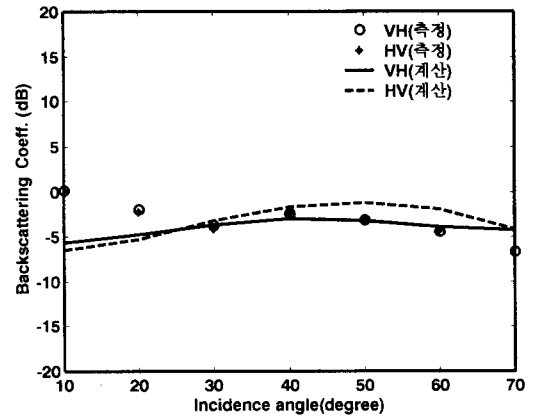


그림 8. 잔디 밀도에 따른 후방 산란 계수 계산 결과



(a)

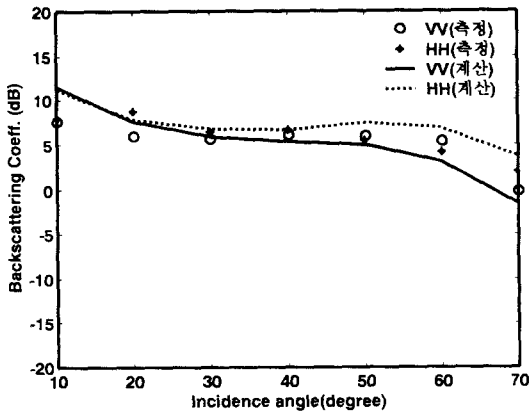


(b)

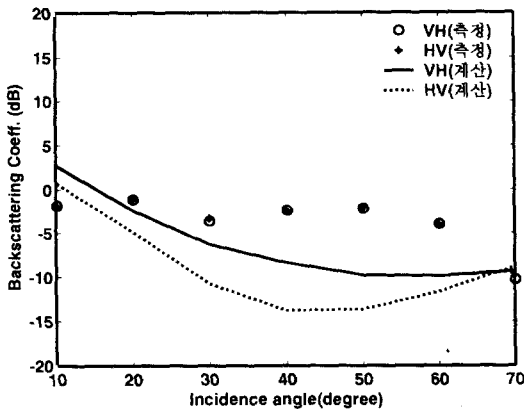
그림 9. 잔디의 RTM 계산 결과와 측정 결과 비교; (a) VV와 HH편파, (b) VH와 HV 편파

은 잔디에서의 산란 측정과 동일하다. 먼저 배추모종의 크기와 방향성에 대한 통계적 수치를 얻기 위해 단위 면적당 48(갯수/m²)개의 샘플을 선택하였다. 앞의 폭, 길이, 두께, 수직각의 각각의 평균과 토양 표면 거칠기는 표 1과 같다. 배추의 경우에도 표 1의 측정 데이터를 RTM에 입력하였을 때 측정 데이터보다 훨씬 낮은 결과를 초래하여 밀도를 850개/m³로 높이고 표준편차는 11°로 놓고 그림 10처럼 비교하였다.

그림 10(a)는 VV와 HH 편파 비교를 위하여 평탄면에서의 PO모델을 이용한 RTM계산과 측정결과 값을 나타내었다. VV와 HH 편파는 산란 계수의 형태와 수치가 잘 일치한다. 그림 10(b)는 VH와 HV



(a)



(b)

그림 10. 배추의 RTM 계산 결과와 측정 결과 비교; (a) VV와 HH 편파, (b) VH와 HV 편파

편파 비교를 위하여 평탄면에서의 PO모델을 이용한 RTM계산과 측정결과 값을 나타내었다. PO모델의 이론적인 VH와 HV 편파 값은 존재하지 않으므로 측정값과는 오차를 나타내고 있다.

잔디와 배추밭의 측정 결과와 계산 결과의 비교에서 밀도를 높이면 VV와 HH 편파는 잘 일치하였다. 그러나 VH와 HV 편파는 계산과 측정결과가 일치하지 않았다. 이는 이론적인 PO모델에서는 VH와 HV 편파는 존재하지 않는 단점이 있다. 따라서 땅에서의 산란 모델을 정확히 계산할 수 있다면 VH와 HV 편파의 정확성을 향상시킬 수 있을 것이다. 또한 Ground truth데이터의 앞의 밀도보다 증가된 수치로 RTM계산을 하였는데 이는 RTM 모델의 첫 번째 해

(전파가 앞에서 한번 산란)를 사용했기 때문이다. 실제로 풀 층에서의 전파 산란은 다중 산란이 존재하게 되는데 이러한 영향을 고려하여 앞의 밀도를 증가하여서 계산하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 풀층으로 구성된 지역에서의 마이크로파 편파별 후방 산란 계수를 계산하는데 있어서 Radiative Transfer 모델의 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 계산할 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 FDTD 등의 수치 해석적 방법으로 좁은 범위에서 다중 산란을 정확하게 계산하여 보완하는 것을 고려해 볼 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [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-royes, "Microwave Dielectric Spectrum of Vegetation-Part II: Dual-Dispersion Model", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. GE-25, pp. 550-557, 1987.

[5] Y. Oh, *Microwave Polarimetric Backscattering from Natural rough surfaces*, Ph. D. Thesis, Radiation Lab, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA, 1993.

[6] 이호재, 이진원, 오이석, "토양 표면의 레이더 산란 계수, 표면 높이, 수분 함유량 측정과 산란 모델의 적용", 1999년도 대한원격탐사학회, 춘계 학술대회 논문집, pp. 111-116, 1999.

[7] 김재형, 이도훈, 오이석, "나뭇잎에서의 레이더 산란 특성 계산과 측정 결과의 비교", 1999년도 대한원격탐사학회, 춘계 학술대회 논문집, pp. 117-121, 1999.

[8] Senior, T.B.A., K. Sarabandi, and F.T. Ulaby, "Measuring and modeling the backscattering cross section of a leaf", *Radio Science*, vol. 22, no. 6, pp. 1109-1116, November, 1987.

[9] F. T. Ulaby. and C. Elachi (ed), *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*, Artech House, Norwood, MA, 1990.

[10] P. F. Polatin, K. Sarabandi, F. T. Ulaby, "Monte-Carlo Simulation of Electromagnetic Scattering from a Heterogeneous Two- Component Medium", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 43, pp. 1048-1057, 1995.

[11] K. Sarabandi, F. T. Ulaby, "A convenient technique for polarimetric calibration of radar systems", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 28, pp. 1022-1033, 1990.

김 재 형



1996년 2월: 홍익대학교 전파공학과 (공학사)
 1998년 8월~현재: 홍익대학교 대학원 전파공학과 석사과정
 [주 관심분야] 전자파 산란 및 전파 전파, 안테나, 마이크로파 회로

이 진 원



1997년 2월: 순천향대학교 정보통신공학과 (공학사)
 1998년 8월~현재: 홍익대학교 대학원 전파공학과 석사과정
 [주 관심분야] 전자파 산란 및 전파 전파, 안테나, 마이크로파 회로

오 이 석



1982년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)
 1988년 12월: University of Missouri-Rolla 전기 및 컴퓨터 공학과 (MS)
 1993년 12월: University of Michigan. Ann Arbor 전기공학 및 컴퓨터과학(PhD)
 1994년 3월~현재: 홍익대학교 전파공학과 조교수
 [주 관심분야] 전자파 산란 및 전파전파, 안테나, 마이크로파 회로, 마이크로파 원격탐사