

# 숲의 산란계수 계산 모델 개발

이성화, 오이석

홍익대학교 전파통신공학과

lain95@hanmail.net, yisokoh@hongik.ac.kr

## Development of a radar scattering model for forest canopies

Sung-Hwa Lee, Yisok Oh

Dept. of Radio Science and Communication Engineering, Hongik University

### Abstract

In this paper, a radar scattering model for forest canopies has been developed based on an empirical rough surface scattering model and the radiative transfer theory. Leaves in the forest canopy are modeled by rectangular resistive sheets, branches and trunks are modeled by cylinder, which sizes and orientations are randomly distributed. The scattering model has been verified with the measurement data of JPL/AirSAR system.

**Keywords:** scattering model form forest canopies, radiative transfer theory

### I. 서론

원격 탐사 기술을 이용하여 육지 상태를 감시하고 탐지하려면 지표면의 레이더 산란모델을 가지고 있어야 하고 지표면을 이루는 많은 부분 중에는 숲이 큰 면적을 차지하고 있다. 숲에서의 산란은 각각을 이루는 요소들의 크기, 높이, 두께 등 불규칙한 변수를 많이 가지고 있다. 이러한 불규칙한 변수를 가진 숲의 산란특성을 모델링 하고 계산하는데 대표적으로 Radiative transfer(RT) 이론이라고 불리는 방법이 사용된다.

본 논문에서 소개하는 모델은 식물 층과 맨땅으로 2개의 층으로 나누어 계산하였다. 식물 층을 구성하는 구성요소들을 잎, 가지, 나무줄기 등으로 간단히 하였고 땅에서의 산란에 대해서는 SEM(Semi-Empirical Model)[1]을 사용하여 정확성을 향상시켰다. SEM은 지상의 트럭 탑재 scatterometer 들의 측정 데이터와 비행기 탑재 SAR 측정 데이터와 더불어 측정 당시의 지형 상태 데이터를 이용하여 제작된 관계로 사용이 간편하고, 측정데이터에 잘 맞는 장점을 갖고 있다[1]. 식물 층을 구성하는 나뭇잎은 사각형 형태의 resistive sheet으로 모델링 하였고, 줄기와 나무기둥은 유전율을 가지는 cylinder 형태로 간주하여 모델링 하였다. 많은 입력 변수를 줄여 사용자가 간단하면서도 비교적 정확한

후방 산란 계수를 구할 수 있는 모델을 개발하였다. 또한 이 모델의 정확성의 검토를 위해 2000년에 수행되었던 PACRIM2 실험에서 논산-익산 지역에서 얻은 NASA/JPL AirSAR의 polarimetric 데이터를 이용하여 본 모델의 산란 계수 계산 데이터와 비교하였다. 측정결과와 모델 시뮬레이션의 비교를 통해 모델의 정확성과 적용 범위를 알아보았다

### II. 숲의 산란 모델

Radiative transfer(RT) 이론을 이용하여 산란 계수 계산을 하기 위해서는 먼저 단일 개체의 산란 계산이 이루어져야 한다.

숲을 식물 층과 땅으로 구분하고 땅에서의 산란은 실험과 측정을 통해 얻은 SEM을 이용하여 모델화 하였다. 맨땅에서의 편파별 후방 산란 계수는 측정값을 통해 나온 실험식 (1)-(3)를 통해 구할 수 있다[1].

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

$$\sigma_{\text{vv}}^0 = \frac{\sigma_{\text{hh}}^0}{q}, \quad (2)$$

여기서,

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

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

여기서,

$$p = 1 - \left(\frac{\theta}{90^\circ}\right)^{0.35m_v^{0.65}} \cdot \exp(-0.4(ks)^{1.4})$$

식(1)-(3)에서  $\theta$ 는 입사각이고  $m_v$ 는 땅의 수분함유량,  $s$ 는 땅의 rms 높이,  $l$ 은 땅의 상관길이이다. 이들 변수들에 대한 측정값을 넣어 땅의 편파별 후방 산란 계수를 구할 수 있다.

식물 층의 산란을 계산하기 위해서는 먼저 식물 층을 구성하는 나뭇잎, 줄기, 나무기둥의 산란모델이 계산되어야 한다. 단일 나뭇잎의 계산은 잎의 모양이 사각형인 Resistive sheet 이라고 가정하여 산란 계수를 계산할 수 있다[2]. 여기서 나뭇잎의 유전율을 계산하기 위한 나뭇잎의 수분함유량, 나뭇잎의 크기, 나뭇잎의 단위면적당 밀도를 입력변수로 하여 계산하였다. 줄기와 나무기둥의 계산은 유전율을 가지는 cylinder 형태로 간주하여 계산하였다[3]. 여기서 줄기와 기둥의 수분함유량을 이용하여 유전율을 계산하고 길이, 지름, 단위면적당 밀도를 입력변수로 하여 계산하였다.

실제 식물 층에서의 산란은 그림 1처럼 단순하지 않다. 잎에 의해 수차례 산란되고 땅에서 여러 번 반사되어 후방 산란이 이루어지는 다중 산란을 해석하기에는 수식의 복잡성과 계산 과정의 어려움으로 각각의 개체에 한번 산란되는 경우를 나타낸 1차 RTM의 해를 그림 1의 전파 산란 방식으로 계산하였다.

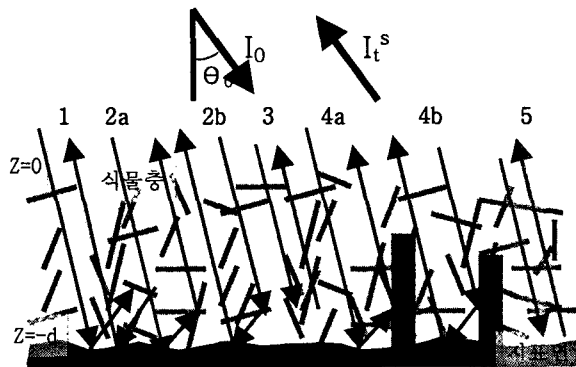


그림 1. 숲의 모델과 후방 산란 방식

그림 1에서  $I_0$ 는 식물 층에 입사하는 전파의 세기이고,  $I_t^s$ 는 후방 산란하는 전체 전파의 세기이다.

그리고 숫자 1, 2a/b, 3, 4a/b, 5는 식물 층 내에서의 전파 산란의 방식들을 나타낸다. 여기서  $\theta$ 는 입사각을 나타내고 식물 층의 두께는  $d$ 로 나타낸다. 후방 산란하는 전체 전파의 세기는 각 산란방식에 의해 산란된 전파세기의 합으로 나타낼 수가 있다.

식물 층을 포함하는 지표면 위에서의 후방 산란의 세기는 다음과 같이 나타낼 수 있다[3].

$$\begin{aligned} \bar{I}_t^s(\mu_0, \phi_0) &= \bar{T}_i(\mu_0, \phi_0)\bar{I}_0(-\mu_0, \phi_0) \\ &= [\bar{T}_c(\mu_0, \phi_0) + \bar{T}_g(\mu_0, \phi_0)]\bar{I}_0(-\mu_0, \phi_0) \end{aligned} \quad (4)$$

투과 행렬  $\bar{T}_c$ 는 식물 층에 의한 산란 행렬이고  $\bar{T}_g$ 는 땅에 의한 산란 행렬이다. 식물 층으로부터의 후방산란에 관계하는 Transformation Matrix  $\bar{T}_c(\mu_0, \phi_0)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T_c = & \frac{1}{\mu_0} \exp(-K_c^+ d / \mu_0) R'(\mu_0, \phi_0 + \pi) \epsilon_c(-\mu_0, \phi_0 + \pi) \\ & \cdot A_1 \epsilon_c^{-1}(\mu_0, \phi_0) R'(\mu_0, \phi_0) \exp(-K_c^- d / \mu_0) \\ & + \frac{1}{\mu_0} \exp(-K_c^+ d / \mu_0) R'(\mu_0, \phi_0 + \pi) \epsilon_c(-\mu_0, \phi_0 + \pi) \\ & \cdot A_2 \epsilon_c^{-1}(\mu_0, \phi_0) \\ & + \frac{1}{\mu_0} \epsilon_c(\mu_0, \phi_0 + \pi) A_3 \epsilon_c^{-1}(\mu_0, \phi_0) R'(\mu_0, \phi_0) \\ & \cdot \exp(-K_c^- d / \mu_0) \\ & + \frac{1}{\mu_0} \epsilon_c(\mu_0, \phi_0 + \pi) A_4 \epsilon_c^{-1}(-\mu_0, \phi_0) \\ & + \frac{1}{\mu_0} \exp(-K_c^+ d / \mu_0) \exp(-K_i^+ H_i / \mu_0) R(\mu_0) \\ & \cdot \epsilon_i(-\mu_0, \phi_0 + \pi) A_5 \epsilon_i^{-1}(\mu_0, \phi_0) \exp(-K_c^- d / \mu_0) \\ & + \frac{1}{\mu_0} \exp(-K_c^+ d / \mu_0) \epsilon_i(\mu_0, \phi_0 + \pi) A_6 \epsilon_i^{-1}(\mu_0, \phi_0) \\ & \cdot R(\mu_0) \exp(-K_i^- H_i / \mu_0) \exp(-K_c^- d / \mu_0) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $A_n$ 은 각 산란 메커니즘을 나타내는 4x4 matrix이고  $R(\mu_0)$ 는 반사하는 지표면의 reflectivity matrix이다[3].

땅에서의 산란 세기를 계산해주는 Transformation matrix는 다음처럼 계산한다.

$$\bar{T}_g(\mu_0, \phi_0) = \exp(-\bar{k}_c^+ d / \mu_0) \bar{G}(\mu_0) \cdot \exp(-\bar{k}_c^- d / \mu_0) \quad (6)$$

여기서  $\bar{k}_c^+, \bar{k}_c^-$ 는 각각 숲 층으로 입사하는 전파와 숲 층으로부터 산란하는 전파를 나타내는 4x4의 extinction matrix를 나타낸다. 또한  $\bar{G}(\mu_0)$ 는 지면의 후방산란 matrix로서 다음과 같이 나타낸다.

$$\bar{G}(\mu_0) = \frac{1}{\cos\theta_0} \bar{M}_m \quad (7)$$

여기서  $\bar{M}_m$  은 modified Stokes scattering operator로서 지면으로부터의 후방산란을 나타내는 것이며 앞에서 구한 땅의 산란 계산에서  $\sigma^o$  에 의해 구할 수 있다[1].

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

$$\begin{aligned} \sigma_{vv}^o &= 4\pi \cos\theta_0 [T_i(\mu_0, \phi_0)]_{11} \\ \sigma_{hh}^o &= 4\pi \cos\theta_0 [T_i(\mu_0, \phi_0)]_{22} \\ \sigma_{hv}^o &= 4\pi \cos\theta_0 [T_i(\mu_0, \phi_0)]_{21} \\ \sigma_{vh}^o &= 4\pi \cos\theta_0 [T_i(\mu_0, \phi_0)]_{12} \end{aligned} \quad (8)$$

### III. 산란모델 계산결과 및 비교

숲의 산란 계수를 계산하기 위해서는 많은 입력 변수가 필요하다. Radiative Transfer 이론을 사용한 지표면에서의 산란계수를 사용하는 모델로는 Michigan 대학의 MIMICS(Michigan microwave canopy scattering Model)를 들 수 있는데, 이 MIMICS는 많은 입력 변수의 사용으로 인해 복잡하다. 본 논문의 숲 산란 모델은 10개의 입력 값으로 산란 계수를 계산할 수 있다. 땅의 산란에 필요한 입력변수인 토양 수분함유량과 지표면 거칠기 s를 이용하여 땅에서의 산란을 계산할 수 있고, 전체 식물 층의 높이와 나뭇잎의 크기와 밀도, 줄기의 크기와 밀도, 나무기둥의 크기와 밀도를 이용하여 숲 산란 계수를 계산할 수 있는 모델을 개발 하였다.

표 1에서 임의의 숲 모델 입력변수를 정하여 개발된 모델로 시뮬레이션하고 그 결과 값을 비교해 보았다. 여기서 토양의 수분함유량  $m_v$ 와 표면 거칠기 s를 이용하여 땅에서의 산란을 계산하였다. 본 논문은 땅의 변수 중에서 상관길이 l을 10cm로 고정함으로써 입력 값을 줄 일수 있었다. 이는 일반적인 토양에서 얻을 수 있는 l은 8-12cm이고 이 범위에서의 변화량이 적음으로 본 모델링에서는 l값을 10cm로 고정하였다. 식물 층의 전체 높이와 나뭇잎의 변수, 줄기의 변수, 나무기둥의 변수를 각각 입력하여 후방 산란 계수를 계산하였다. 그리고 나뭇잎과 줄기는 불규칙한 방향으로 분포되어 있고 나무기둥은 수직의 방향으로 일정하게 분포되어 있다

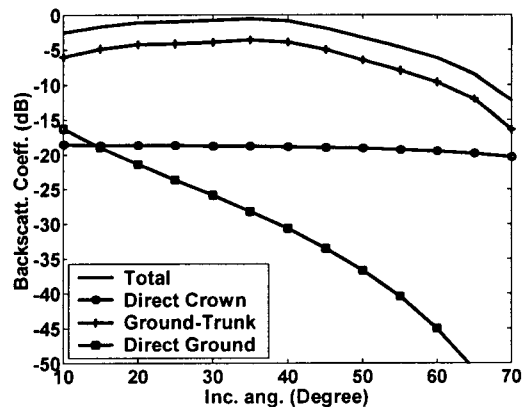
고 가정한다.

그림 1에서는 표1의 임의의 입력 값을 이용하여 입사각에 따른 숲의 편파별 후방 산란 계수를 계산 하였다. 각 주파수에 따라 편파별로 비교를 하였고 L-Band는 1.25 GHz ,C-Band는 5.3 GHz, X-Band는 10 GHz로 주파수를 정하였다.

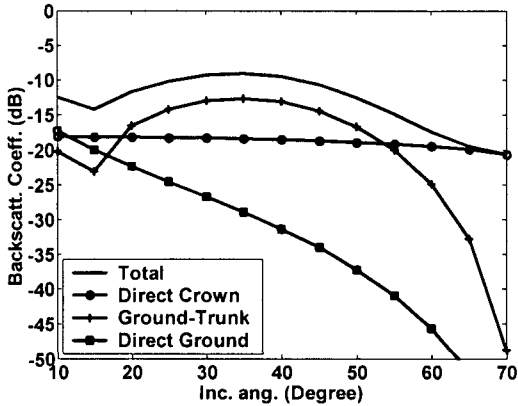
표 1. 숲 모델의 입력 변수와 임의의 입력 값

구분	입력변수	입력 값	
토양	$m_v$ (수분함유량)	0.15	
	s(토양 거칠기)[cm]	0.5	
식물 층	식물 층 높이 [m]	10	
	나뭇잎	길이[cm]	6
		넓이[cm]	3
		밀도[m <sup>3</sup> ]	700
	줄기	길이[m]	0.75
		밀도[m <sup>3</sup> ]	5
	나무기둥	길이[m]	6
		밀도[m <sup>2</sup> ]	0.1

그림 1은 L-Band (1.25GHz)에서 동일편파에서 식물 층의 각 부분의 후방 산란 계수를 계산한 것이다. 숲 전체의 후방 산란 계수와 식물 층중에서 나뭇잎의 후방 산란 계수의 영향과 땅과 나무기둥 사이의 산란영향, 그리고 직접적으로 땅의 영향을 비교하였다. 여기에서 낮은 주파수인 L-Band는 전파가 숲의 나뭇잎 층을 통과하여 나뭇잎 층의 영향보다 땅과 나무기둥사이의 산란영향이 큰 것을 볼 수 있다. 그리고 나무기둥은 VV편파보다 HH편파가 큰 후방 산란 계수를 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 나무기둥이 수직의 방향으로 서있기 때문이다.



(a)



(b)

그림 1. 숲의 영역별 영향  
(a) HH-pol : 1.25GHz, (b) VV-pol : 1.25GHz

그림 2는 주파수의 변화에 따른 숲의 편파별 후방 산란을 본 것이다. 시뮬레이션 결과 값을 보면 낮은 주파수에서는 HH편파와 VV편파의 차이가 크다가 높은 주파수로 올라 갈수록 일정한 값으로 차이가 줄어드는 것을 볼 수 있다.

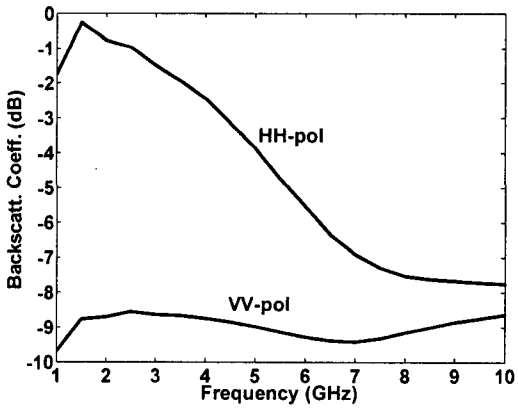
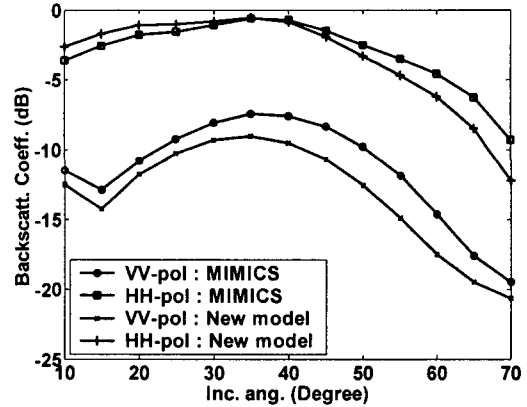


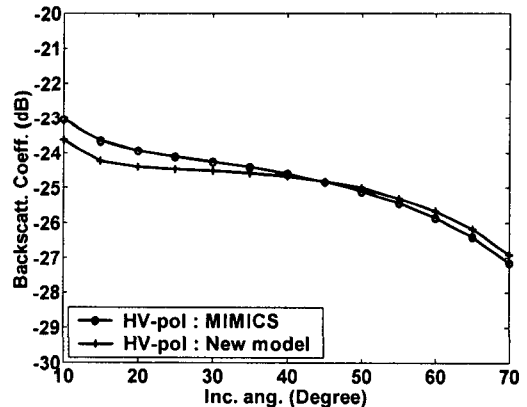
그림 2. 주파수의 변화에 따른 후방 산란 계수 :

입력 값이 많을수록 더욱더 정확한 값을 계산할 수 있겠지만 그만큼 사용자의 사용에 불편함이 있고 입력 변수를 측정하는 것도 어려움이 따른다. 본 모델은 이 부분을 보완하여 10개의 입력 변수로 정확한 모델을 계산할 수 있도록 하였다. 그림 3은 기존의 RTM을 이용한 MIMICS 모델과 본 모델의 비교를 하였다. 비교에 사용된 변수는 서로 비슷한 값을 넣어 계산을 하였다. 주파수는 L-Band에서 비교 하였다. 그림에서 보면 약 60개의 입력 변수를 대입하여 계산하는 MIMICS 모델과 10개의 입력 변수로 입력을 줄인 새로운 모델과 오차가

1-3dB 이내의 결과 값을 보임을 알 수 있다. 이는 본 모델이 적은 입력 변수로도 60여개 이상의 입력 변수를 가지는 모델과 비슷한 결과 값을 계산해 낼 수 있음을 보여준다.



(a)



(b)

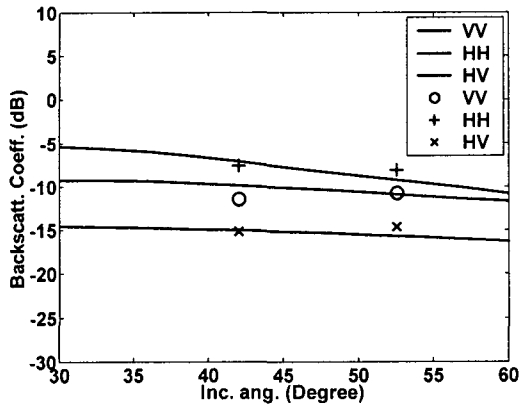
그림 3. L-Band에서 새 모델과 MIMICS 모델 비교  
(a) 동일편파, (b) 교차편파

2000년에 수행되었던 PACRIM2 실험에서 논산-익산 지역에서 얻은 NASA/JPL AirSAR의 polarimetric 데이터를 이용하여 측정값과 시뮬레이션 값을 비교하여 보았다.

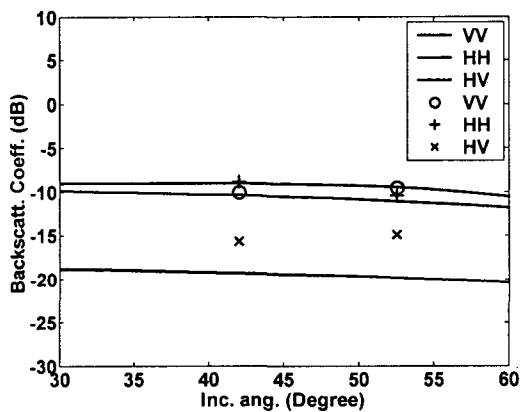
비교 표본지역으로 입사각에 따른 소나무 숲 지역을 2개를 선정하여 표본지역의 지표면 변수를 얻었다. 얻어진 지표면 변수를 시뮬레이션의 입력값으로 대입하여 입사각에 따른 후방 산란 계수를 계산하였다. 그리고 이를 표본지역의 L-Band와 C-Band 측정 데이터와 비교 하였다. 비교결과를 보면 동일 편파는 1-2dB 이내의 오차를 보이고 있다. 하지만 교차편파는 C-Band에서 4-5dB의 오차를 보인다.

이는 다중산란의 계산에서 계산상의 어려움으로 한 번의 산란만을 계산하기 때문에 생기는 오차로 생각된다.

았다. 1차 RTM의 정확성을 향상시키려면 2차 이상의 RTM을 계산해야 하지만 계산이 매우 복잡하여 이용에 어려움이 많다. 또 다른 방법으로 수치 해석적 방법으로 좁은 범위의 다중산란을 계산하여 보완하는 것을 고려해 볼 수 있다.



(a)



(b)

그림 4. 숲의 계산결과와 측정결과 비교  
(a) L-Band, (b) C-Band

#### IV.결 론

본 논문에서는 숲 지역의 마이크로파 편파별 후방 산란 계수를 계산하는데 있어서 Radiative Transfer 모델의 1차 근사식을 이용하였다. 숲을 구성하는 많은 변수들을 간단한 입력 변수 10개로 줄여 사용자의 편의를 위하면서 정확도 또한 큰 오차가 없도록 모델링 하였다. 임의의 숲의 변수들을 결정하여 시뮬레이션 하였고 모델을 통해 숲에서의 산란 특성에 대해 알아보았다. 그리고 AirSAR 측정 데이터와 시뮬레이션 결과를 비교하여 모델의 정확도를 알아보고 교차편파에서 오차가 있는 것을 알

#### 참고문헌

- [1] Yisok Oh, K. Sarabandi, F. T. Ulaby, "Semi-Empirical Model of the Ensemble-Averaged Differential Mueller Matrix for Microwave Backscattering from Bare Soil Surfaces", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 40, No. 6, pp.1348-1355. June 2002.
- [2] 김재형, 이진원, 오이석, "풀밭에서의 마이크로파 편파별 산란 계수 계산용 Radiative Transfer 모델의 정확성 검토", 한국 전자파학회지, 2000년 8월호
- [3] F. T. Ulaby, C. Elachi, **Radar Polarimetry for Geoscience Applications**, Artech House, Inc., 1990.