1차 Vector Radiative Transfer 기법을 이용한 옥수수 생육에 따른 후방산란 특성 분석

Analysis of Backscattering Coefficients of Corn Fields Using the First-Order Vector Radiative Transfer Technique

권순구 · 황지환 · 박신명 · 홍성욱* · 오이석

Soon-Koo Kweon · Ji-Hwan Hwang · Sin-myeong Park · Sungwook Hong* · Yisok Oh

요 약

본 연구에서는 위성 SAR 영상을 이용한 초목층 정보 예측을 위해 옥수수의 생육에 따른 후방 산란 계수 변화를 분석한다. 이를 위하여 지상형 산란계 시스템을 이용하여 옥수수 밭의 후방 산란 계수를 측정하였으며, 지표면 정보를 입력 변수로 한 1차 VRT(Vector Radiative Transfer) 기법을 이용하여 후방 산란 계수를 계산하여 측정값과 비교/분석한다. 그 결과, 생육 초기에는 옥수수보다 토양에서의 산란이 지배적이었으며, 옥수수의 밀도가 증가하면서 잎의 분포의 영향으로 입사각이 증가하면서 후방 산란 계수가 점차 상승하는 특징을 보였다. 측정 데이터와 1차 VRT 계산 오차는 평균 RMSE (Root Mean Square Error)가 VV-편파에서 1.32 dB이었고, HH-편파에서 0.99 dB이었다. 또한, 1차 VRT 계산을 통해 LAI (Leaf Area Index) 변화에 따른 작물과 토양에서의 산란 영향을 분석하였다.

Abstract

In this study, we analyzed the effect of corn growth on the radar backscattering coefficient. At first, we measured the backscattering coefficients of various corn fields using a polarimetric scatterometer system. The backscattering coefficients of the corn fields were also computed using the 1st-order VRT(Vector Radiative Transfer) model with field-measured input parameters. Then, we analyzed the experimental and numerical backscattering coefficients of corn fields. As a result, we found that the backscatter from an underlying soil layer is dominant for early growing stage. On the other hand, for vegetative stage with a higher LAI(Leaf-Area-Index), the backscatter from vegetation canopy becomes dominant, and its backscattering coefficients increase as incidence angle increases because of the effect of leaf angle distribution. It was also found that the estimated backscattering coefficients agree quite well with the field-measured radar backscattering coefficients with an RMSE(Root Mean Square Error) of 1.32 dB for VV-polarization and 0.99 dB for HH-polarization. Finally, we compared the backscattering characteristics of vegetation and soil layers with various LAI values.

Key words: Radiative Transfer Model, Corn Field, SAR, Vegetation Canopy

I. 서 론

SAR를 이용한 원격 탐사의 중요성이 대두되면서 수많

「본 논문은 국가기상위성센터의 2013년 기상위성 운영 및 활용 기술개발 사업의 지원에 의해 수행되었음.」

홍익대학교 전자정보통신공학과(Department of Electronic Information and Communication Engineering, Hongik University)

*국가기상위성센터(National Meteorological Satellite Center)

· Manuscript received December 4, 2013 ; Revised January 17, 2014 ; Accepted January 23, 2014. (ID No. 20131204-121)

· Corresponding Author: Yisok Oh (e-mail: yisokoh@hongik.ac.kr)

은 SAR 위성이 지구를 돌며 지표면을 촬영하고 있다. 독일의 TerraSAR-X와 TanDEM-X, 이탈리아의 COSMO-Sky-Med 1~4호와 캐나다의 RADARSAT-2 등 차세대 SAR 위성이 운용 중에 있으며, 일본에서는 L-밴드 SAR 센서를 탑재한 ALOS-2가 2014년 발사 예정이다. 대한민국에서도 2013년 8월 최초의 SAR 위성인 다목적실용위성 5호(KOMPSAT-5: Korea multi-purpose satellite-5)가 발사되어 2014년 완료를 목표로 검보정 절차를 진행 중에 있다.

SAR를 이용한 지표면 원격 탐사 분야는 지표면의 분류부터 목표물 탐지, 바다의 염도 및 지표면의 수분함유량, DEM 정보, 초목층과 농작물 정보의 추출 등 기상, 농업, 해양 등 많은 분야에서 연구되고 있다. 그 중 초목층과 농작물 정보 추출은 작물의 종류뿐 아니라, 작물의 생육 상태, 가뭄, 홍수 등 외부 요인에 의한 작물의 피해를 예측, 예방하는 등의 목적이 있다^{[1]~[3]}.

초목층과 농작물 정보 추출을 위해서는 SAR 영상이나 지상형 산란계 시스템 등에 의해 획득된 후방 산란 계수를 이용한 경험 모델이나 VRT(Vector Radiative Transfer) 기법을 이용하는 이론 모델, 또는 이 둘을 결합한 모델 등을 이용해 작물의 후방 산란 계수를 결정하는 요소들을 추출하는 방식이 일반적이다^{[4],[5]}. 경험모델을 이용하면 작물뿐 아니라, 지역에도 차이가 발생하여 제각각인 모델을 일정한 기준으로 사용하기 어렵다. 반면, 이론 모델은 복잡한 계산과 많은 변수들로 인해 결과가 변하므로 신뢰도 높은 모델 개발을 위해서는 실제 후방 산란 계수와 작물의 생육 변수 측정을 통한 이론값 계산이 병행되어야 한다.

본 논문에서는 C-밴드(중심 주파수: 5.3 GHz)에서 VV-, HH-, VH-, HV-편파 데이터 획득이 가능한 지상형 산란계 시스템을 이용하여 옥수수의 생육에 따른 후방 산란 계수를 측정함과 동시에 작물의 생육 정보를 수집하여 1차 VRT 기법을 이용하여 후방 산란 계수를 계산하고, 측정 데이터와 비교/분석을 통해 원격 탐사를 이용한 옥수수 생육의 분석에 활용한다.

II. 1차 VRT 기법을 이용한 초목층 산란 해석

1차 VRT 이론은 랜덤하게 분포된 산란체들의 전파 산란을 계산하는 일반적인 기법이다^[6]. 본 논문에서는 옥수

수 밭을 VRT 기법으로 계산하기 위해 옥수수의 줄기와 잎을 각각 lossy dielectric cylinder와 lossy dielectric disk으로 가정하였다. 1차 VRT 기법은 총 5개의 산란 메커니즘으로 구성되어 있다. 메커니즘-1은 초목층에 의한 후방 산란(I-V-S), 메커니즘-2는 초목층에서 전방 산란된 후 토양에서 반사된 파(I-V-G-S), 메커니즘-3은 토양에서 반사된 후 초목층에서 전방 산란된 파(I-G-V-S), 메커니즘-4는 토양층에서 반사된 후 초목층에서 후방 산란된 후 토양층에서 반사된 파(I-G-V-G-S), 메커니즘-5는 초목층을 통과한 후 토양에서 후방 산란된 후 다시 초목층을 통과하는 파(I-G-S)로 나뉜다. 1차 VRT 기법에 관한 자세한 설명은 참고논문 [7]에서 알 수 있다.

III. 산란계수 및 지표면 정보 측정

1차 VRT 기법의 비교/검증과 옥수수 생육을 분석하기 위해 지상형 산란계 시스템을 이용하여 옥수수 밭을 측정하였다. 지상형 산란계(HPS: Hongik Polarimetric Scatterometer)는 완전 편파 데이터 획득을 위한 OMT Horn 안테나와 입사각 조절이 가능한 모터 컨트롤 시스템, 그리고 데이터 획득을 위한 VNA(Vector Network Analyzer)와 자동획득 프로그램으로 구성되어 있다^[9]. 그림 1은 옥수수 밭을 측정 중인 지상형 산란계 시스템의 사진이다. 또한, 측정 시스템은 DMMCT(Differential Mueller Matrix Calibration Technique)를 사용하여 신뢰도 높은 후방 산란 계수 데이터를 제공한다^[10].

그림 1. 지상형 산란계 시스템

Fig. 1. Scatterometer system.

그림 2. 실험 지표면 사진들

Fig. 2. Photos of test sites.

(a) 엽면적 지수 (b) 토양수분 함유량 (c) 지표면 거칠기 (d) 작물 정보
(a) Leaf area index (b) Soil moisture (c) Surface roughness (d) Particle's data

그림 3. 지표면 정보 측정 예

Fig. 3. An example of ground truth measurements.

측정은 수원시 권선구에 위치한 농업과학기술원 발작물연구소에서 수행하였다. 날짜는 2013/5/29일, 6/13일, 6/26일, 7/11일 총 4회에 걸쳐 이루어졌으며, 그림 2와 같이 생육 초기부터 옥수수 열매가 자랄 때까지 생육 단계별 데이터를 획득하였다.

그림 3은 후방 산란 계수 측정 시 수집한 지표면 정보의 종류로 표 1에서처럼 옥수수의 생육 데이터와 토양의 수분함유량, 지표면 거칠기 등을 측정하였다. 지표면 거칠기는 자체 제작한 레이저 *profilo-meter*를 사용하였으며^[11], LAI는 Decagon devices社의 AccuPAR LP-80을 사용하

표 1. 옥수수 밭 지표면 정보 측정 결과

Table 1. Ground truth of corn field.

입력 변수	측정일			
	5/29	6/13	6/26	7/11
초목층 높이(cm)	30	80	200	250
엽면적지수(LAI)	0.48	1.48	1.78	2.78
지표면 유효높이(cm)	1.30	1.31	1.31	1.22
토양의 수분함유량(cm^3/cm^3)	0.30	0.15	0.18	0.25

였고, 토양 수분함유량은 Decagon devices社의 EC-5를 이용하여 측정하였으며, 옥수수 잎, 줄기의 길이, 두께, 넓이, 각도, 작물의 수분함유량 데이터도 측정하였다.

표 1에서 알 수 있듯이 작물이 자라면서 LAI나 초목층의 높이 등은 계속 증가하며, 지표면 거칠기 등은 큰 변화 없이 일정한 것을 알 수 있다. 또한, 토양의 수분함유량은 그날의 기후에 영향을 받아 계속 변하게 된다.

IV. 옥수수 산란계수 분석

옥수수 후방 산란 계수 측정 데이터와 지표면 정보를 입력으로 한 VRT 모델의 계산 결과를 비교/분석한다. 그림 4는 생육 초기인 5/29일 데이터와 생육 후기인 7/11일

(a) HH-편파(2013/5/29)

(a) HH-polarization(May/29/2013)

(b) HH-편파(2013/7/11)

(b) HH-polarization(July/11/2013)

그림 4. HH-편파 측정데이터에서 5종류 산란 메커니즘의 구성

Fig. 4. Contribution of the five scattering mechanism for HH-polarization data.

그림 5. 잎의 각도가 25°일 때 LAI에 의한 전체 산란계수 변화

Fig. 5. Variation of total backscattering coefficients by LAI when average of leaf angle is 25 deg.

데이터를 VRT 모델로 계산한 결과로 HH-편파에 대해서 각각의 메커니즘 별로 산란의 영향을 비교/분석한 그림이다. 그림 4(a)의 경우, LAI가 0.48로 작물의 밀도가 낮아 토양층의 산란의 영향이 가장 큰 것을 알 수 있다. 초목층의 산란은 잎의 각도의 영향으로 인해 입사각이 약 60°에서 높은 후방 산란 계수 값을 보였지만, 토양층의 산란이 지배적이어서 전체 후방 산란 계수에는 큰 영향을 미치지 못했다.

그림 4(b)의 경우, LAI가 2.78로 작물의 밀도가 매우 높은 편이기 때문에 20° 이상에서 토양층 산란의 영향은 점차 감소하고, 초목층 산란의 영향이 점점 증가하여 30°에서 40° 사이에서 초목층 산란이 토양층 산란보다 큰 값을 갖게 되는 것을 알 수 있다. 이러한 측정 결과와 VRT 계산 결과는 일반적인 지표면에서 입사각에 대한 산란계수

(a) 5/29일

(a) May 29

(b) 6/13일

(b) June 13

(c) 6/26일

(c) June 26

(d) 7/11일

(d) July 11

그림 6. 측정된 후방 산란 계수와 VRT 시뮬레이션 결과 비교

Fig. 6. The result of VRT simulation and measured backscattering coefficients.

변화와는 반대로 입사각이 증가하면서 후방 산란 계수가 증가하는 현상을 확인할 수 있으며, 이것은 초목층의 밀도가 높으면서 초목층의 잎의 분포가 수직에 가까운 경우에 발생한다는 것을 이론적으로 예측할 수 있다.

잎을 lossy dielectric disk로 가정했을 때 disk의 정면에서 가장 크게 산란이 일어나며, 옆면에서는 매우 낮은 값을 보인다^[12]. 이러한 특징 때문에 잎의 각도가 지면에 수직인 경우, 입사각이 증가할수록 잎의 정면을 향하게 되므로 후방 산란 계수가 증가하는 형태를 보인다. 그림 5는 잎의 평균 각도가 25°, 잎의 각도의 표준편차가 25°인 경우, LAI에 따른 입사각에 대한 후방 산란 계수 변화를 보여준다. LAI가 0.5일 때는 5/29일의 데이터처럼 입사각이 증가하면서 후방 산란 계수가 감소하지만 LAI가 증가할수록 잎의 평균 수직 각도인 25°, 즉 입사각이 75° 근처에서 후방 산란 계수가 최대가 되는 것을 알 수 있다.

그림 6은 후방 산란 계수 측정 데이터와 VRT 기법으로 계산한 VV-편파와 HH-편파의 후방 산란 계수를 비교한 그림이다. 교차편파(VH-편파, HV-편파)의 경우, 다중 산란에 의한 영향이 지배적이기 때문에 1차 VRT 기법으로 정확한 계산이 어려우므로 교차의 계산이 필요하다.

총 4회의 후방 산란 계수 측정 데이터에서 HH-편파가 VV-편파보다 높았으며, 각도 별로는 5/29일은 대부분 토양층의 산란으로 입사각 증가에 따라 서서히 후방 산란 계수가 감소했으며, 6/13일과 6/26일은 초목층이 조금 성장하면서 입사각이 60° 부근에서 값이 상승하였으며, 7/11일의 경우 30°부터 대부분 초목층에서 산란이 일어나 입사각이 증가하면서 후방 산란 계수가 상승하였다. 날짜 별로는 5/29일을 제외한 데이터에서는 모든 각도에서 시간이 지날수록 후방 산란 계수가 증가하였으나, 5/29일의 경우, 20°~50°에서 다른 데이터보다 매우 높은 값을 보였다. 그 이유는 토양층 산란의 영향이 매우 컸던 5/29일의 토양의 수분함유량이 0.3 cm³/cm³으로 일반적인 토양의 수분함유량 범위 0.04~0.35 cm³/cm³에서 매우 높은 경우로 후방 산란 계수가 매우 높기 때문이다.

그림 7은 C-밴드, HH-편파에서 LAI를 변경하며 전체 산란계수 중에 각각의 산란 메커니즘의 비중을 계산한 결과이다. 여기서 지표면 유효높이는 1 cm이며, 잎은 균일하다고 가정하였다. LAI가 증가하면서 토양층 산란의

그림 7. LAI에 따른 메커니즘 별 비중 변화 계산

Fig. 7. Variation of scattering mechanism ratio by LAI.

비중은 서서히 감소하며, 초목층의 산란의 비중은 점점 증가한다. 초목층과 토양층 간의 간섭은 토양층 산란과 초목층 산란의 비중이 같아지는 부근에서 가장 높게 나타났다. 그 이유는 LAI가 증가하면서 초목층에 의한 간섭이 증가하다가 점점 지표면이 덮여서 초목층을 통과하지 못하게 되기 때문이다. 이러한 분석은 주파수와 초목층 밀도 등에 따라 토양층에서의 영향을 파악하여 토양층의 수분함유량이나 지표면 거칠기 등의 정보 추출 가능성을 유추해 볼 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 1차 VRT 기법을 이용하여 옥수수의 생육에 따른 후방 산란 계수 변화를 분석하기 위해 지상형 산란계 시스템을 이용한 후방 산란 계수를 측정하여 1차 VRT 기법을 검증하였다. 그 결과, 측정 데이터와 1차 VRT 계산 결과의 오차는 평균 RMSE가 VV-편파에서 1.32 dB, HH-편파에서 0.99 dB였다. 교차편파의 경우, 1차 VRT 기법으로 계산에는 한계가 있다. 또한, 옥수수의 후방 산란 계수 분석을 통해 LAI가 증가하면서 잎의 분포의 영향으로 입사각이 증가하면서 후방 산란 계수가 상승하는 현상과 LAI 변화에 따른 토양과 작물에서의 산란 영향을 예측해 볼 수 있었다. 이러한 연구는 위성 SAR를 이용한 초목층의 원격탐사에서 주파수나 초목층의 종류 등에 따라 토양 수분함유량, 작물 생육 등의 정보 획득의 가능성과 기법 연구에 도움을 줄 것이다.

감사의 글

저자들은 본 연구의 지표면 측정 데이터 수집에 도움을 준 홍익대학교 전자전기공학부 학생 노현우와 전준하에게 감사한다.

References

- [1] S. Said, U. C. Kothyari, and M. K. Arora, "Vegetation effects on soil moisture estimation from ERS-2 SAR images", *Hydrolog. Sci. J.*, vol. 57, no. 3, pp. 517-534, Mar. 2012.
- [2] J. F. Paris, "The effect of leaf size on the microwave backscattering by corn", *Remote Sens. Environ.*, vol. 19, no. 1, pp. 81-95, Feb. 1986.
- [3] N. S. Chauhan, "Soil moisture inversion at L-band using a dual-polarization technique: a model-based sensitivity analysis", *Int. J. Remote Sens.*, vol. 23, no. 16, pp. 3209-3227, Nov. 2002.
- [4] E. P. W. Attema, F. T. Ulaby, "Vegetation modeled as a water cloud", *Radio Sci.*, vol. 13, no. 2, pp. 357-364, Mar.-Apr. 1978.
- [5] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*, Artech House.
- [6] L. Tsang, J. A. Kong, and R. T. Shin, *Theory of Microwave Remote Sensing*, 1st ed. Hoboken, NJ: Wiley, 1985.
- [7] S. -K. Kweon, J. -H. Hwang, and Y. Oh, "Development of a scattering model for soybean fields and verification with scatterometer and SAR data at X-band", *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 12, no. 1, pp. 115-121, Mar. 2012.
- [8] Y. Oh, K. Sarabandi, and 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. 30, no. 6, pp. 1348-1355, Jun. 2002.
- [9] 황지환, 이경엽, 박성민, 오이석, "X-밴드용 완전 편파 Scatterometer 설계", *한국전자과학회논문지*, 20(12), pp. 1308-1315, 2009년 12월.
- [10] 황지환, 박성민, 권순구, 오이석, "X-밴드 완전 편파 Scatterometer 시스템 보정에 관한 연구", *한국전자과학회논문지*, 21(4), pp. 408-416, 2010년 4월.
- [11] 권순구, 황지환, 오이석, 홍성욱, "지표면 산란 계수 예측을 위한 정확한 지표면 거칠기 변수 측정 방법 및 오차 분석", *한국전자과학회논문지*, 24(1), pp. 91-97, 2013년 1월.
- [12] T. B. A. Senior, K. Sarabandi, and F. T. Ulaby, "Measuring and modeling the backscattering cross section of a leaf", *Radio Sci.*, vol. 22, no. 6, pp. 1109-1116, Dec. 1987.

권 순 구

2007년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2009년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
 2009년 3월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 박사과정
 [주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, SAR 영상분석

홍 성 욱

1997년 2월: 서울대학교 지구과학교육 (이학사)
 2000년 2월: 서울대학교 물리학 (이학석사)
 2002년 12월: Texas A&M University 대기과학과 (이학석사)
 2006년 8월: Texas A&M University 대기과학과 (이학박사)
 2006년~2008년: NOAA(미국해양대기청)/NESDIS(미국기상위성센터)
 2008년~2009년: 국립기상연구소
 2009년~현재: 국가기상위성센터
 [주 관심분야] 위성원격탐사기반 알고리즘 개발, 재해감시, 기후변화

황 지 환

2001년 2월: 홍익대학교 전파공학과 (공학사)
 2003년 2월: 홍익대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 2003년 4월~2006년 5월: LG전자 단말연구소 연구원
 2013년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학박사)
 2014년~현재: 국립전파연구소 연구원
 [주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, 안테나

오 이 석

1982년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)
 1988년 12월: University of Missouri-Rolla 전기 및 컴퓨터공학과 (공학석사)
 1993년 12월: University of Michigan, Ann Arbor 전기공학 및 컴퓨터과학과 (공학박사)
 2001년~2008년: 한국전자과학회 상임이사
 2006년~2008년: Chair, IEEE GRS Korea Chapter
 1994년~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수
 2009년~현재: IEEE Fellow
 [주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, 레이더, 안테나

박 신 명

2011년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2013년 3월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
 [주 관심분야] 마이크로파 원격 탐사, SAR 영상 분석