THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2023 February.; 34(2), 79～87.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2023.34.2.79
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

지면 레이다 클러터 신호의 특성 및 생성 방법

Characteristics of Land Clutter Signals and Their Synthesis Methods

김 태 인 · 김 상 혁

Tae-In Kim · Sanghoek Kim

요 약

클러터 시그널은 레이다로 들어오는 의도하지 않는 신호이다. 클러터 신호는 크게 해상 클러터, 지면 클러터, 강우나 구름으로 인한 클러터로 나눌 수 있다. 이러한 클러터 신호는 레이다가 타겟을 감지하는 데 방해가 되는 요소이다. 탐지의 정확성을 높이기 위해 클러터 신호를 배제하고, 타겟 데이터만을 선별할 수 있어야 한다. 그러므로 클러터 신호의 특성을 이해하는 것은 매우 중요하다. 본 논문에서는 지면 클러터 신호의 특징과 클러터 신호를 임의로 생성하는 방법에 대해 이야기한다.

Abstract

Clutter signals are undesired for radar detection. Clutter signals can be categorized as volume, land, and sea clutter. These unwanted signals disturb radar by detecting the target. To increase detection accuracy, the radar must be able to differentiate clutter signals from the target and remove cluttering signals. Therefore, it is important to understand the characteristics of clutter signals. In this paper, we review the characteristics of land clutter signals and the methods used to generate them.

Key words: Land Cluttering, Radar Cross Section, Reflected Voltage

Ⅰ. 서 론

클러터 신호는 표적의 탐지를 어렵게 하고, 레이다의 성능을 심각하게 저하할 수 있는 요소이다. 따라서 레이다 운용에 있어서 표적에서부터 반사된 신호를 다른 잡음과 해상 지면[1],[2], 혹은 강우나 구름과 같은 환경으로부터 반사된 클러터 신호와 구별해내는 것은 매우 중요하다. 또한 국방과학기술조사서[3]에 따르면 클러터 특성 억제 기술은 더욱더 다양하게 요구될 것으로 기대된다. 선진국에서는 클러터와 관련된 연구들이 이전부터 활발하게 진행이 돼서 계속 개선하고 있지만, 국내에서는 아직까지 자체적으로 클러터를 새롭게 측정하고, 측정 결과를 통해서 모델을 개발하거나 개선하지는 못하고 있다. 선진국들이 오래전에 행한 실험 결과와 모델링에만 의존하여 사용할 경우, 레이다 기술은 주로 선진국에 의존적일 수밖에 없다. 미래에 레이다 하드웨어가 업데이트되었을 때에도 선진국에서 다른 실험 환경에서 수행한 클러터 신호 측정 결과에 의존할 수 없기 때문이다. 따라서 레이다 클러터링의 성능을 더욱더 제대로 연구하기 위해서는 독자적으로 국내 환경에 대해서 클러터 측정과 그것에 대

경희대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Republic of Korea)
· Manuscript received November 10, 2022 ; Revised November 20, 2022 ; Accepted February 22, 2023. (ID No. 20221110-003S)
· Corresponding Author: Sanghoek Kim (e-mail: sanghoek@khu.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한 모델링이 필요하다.

클러터 모델을 생성하기 위해서는 다양한 표면과 볼륨으로부터 반사된 클러터 신호들의 통계적인 분포를 이해하는 것은 필수적이다. 일반적으로 클러터 신호는 지면, 해상, 볼륨 클러터와 같은 운용모드로 나눌 수 있고[9], 바람의 세기와 지표면의 상태와 같은 다양한 환경 변수, 레이다의 성능 변수에 따라서도 다양하게 영향을 받는다.

본 논문에서는 그중에서도 지면 클러터의 통계적 특성을 리뷰하고, 그러한 통계적 특성을 갖는 클러터 신호를 생성하여 향후 레이다 운용에 있어서 도움이 되도록 한다.

Ⅱ. 지면 클러터링

2-1 지면 클러터의 분포 특성

2-1-1 고정되지 않은 작은 반사체

지면 경계에서 반사되어 돌아오는 신호는 지면의 변화로 인하여 시간에 따른 변화가 있다. RCS의 분포는 지면의 다양한 종류에 따라 Rayleigh 분포, Rician 분포, log-normal 분포, 또는 Weibull 분포와 같이 다양한 분포로 근사할 수 있다. 그중 가장 간단한 분포는 Rayleigh 분포이다. 지면 클러터가 레이다의 해상도 셀 안에 다양한 작은 scatterer들로부터 무작위로 반사되는 신호들의 합이라고 가정할 경우, 레이다가 만일 전압을 그 위상까지 함께 측정한다면 실수값과 허수값은 각각 mean이 zero인 Gaussian 분포를 따른다. 실제적으로 레이다에서 관측하는 것은 주로 전압의 크기인데, 두 Gaussian 분포의 norm값은 Rayleigh 분포를 따른다. 따라서 지면 클러터가 레이다의 해상도 셀 안에 다양한 작은 scatterer들로부터 무작위로 반사하는 신호들의 합이라고 가정할 때, 이론적으로 레이다에서 측정하는 전압은 Rayleigh 분포를 따를 때, 전압의 제곱인 전력은 exponential 분포를 따르기 때문에 클러터 분포는 exponential 분포라고 지칭하기도 한다. 즉, 같은 클러터 신호 분포를 전압의 실수부나 허수부가 갖는 분포를 지칭하여 Gaussian 분포, 전압의 전체 크기를 지칭하여 Rayleigh 분포, 전력의 분포를 지칭하여 exponential 분포라고 부르기도 하지만, 기본적으로 모두 같은 클러터 분포를 가리킨다.

2-1-2 고정된 큰 반사체

대부분의 경우, 지면 클러터는 다양하게 많은 작은 scatter들로만 이루어져 있지는 않다. 많은 경우, 커다란 나무라든지 바위, 빌딩과 같은 움직이지 않고 고정된 큰 반사체가 있는데 이 경우에 클러터 분포는 Rayleigh 분포를 따르지 않는다. 앞서 설명한 Gaussian 분포에 추가로 움직이지 않는 강한 DC 성분이 있을 때에 적합한 첫 번째 분포는 Rician 클러터 파워 분포이다. 고정된 신호 대 변화하는 신호의 비율에 따라 Rician 분포는 Rayleigh 분포를 포괄할 수 있는 상위 분포이다. 일반적으로 바람의 세기가 강하면 Rayleigh 신호 특성이 강한 Rician 분포가 되고, 바람의 약하면 고정된 신호의 세기가 상대적으로 강해져서 Rayleigh 신호 특성이 약해진다.

2-1-3 고정되지 않은 작은 반사체와 고정된 큰 반사체가 공존

Rician 분포와 비슷하게 고정된 센 신호와 변화하는 신호가 공존할 때 지면 클러터를 모델링하는 또다른 모델은 Weibull 분포이다.

$$p(\sigma) = \frac{b\sigma^{b-1}}{\alpha}\exp\left(-\frac{\sigma^b}{\alpha}\right) \tag{1}$$

여기서 α와 b는 Weibull 분포 특성을 나타내는 파라미터이다. Rician 분포와 비슷하게 Weibull 분포는 파라미터 b의 크기에 따라서 고정된 신호 대비 변화하는 신호 비율이 조절될 수 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이, b의 크기가 크면 클수록 고정된 신호의 세기가 큰 곳을 알 수 있다. 특히 b=1인 경우에는 Rayleigh 분포로 다시 회귀한다. 일반적으로 지면 클러터링은 b=1.0에서 1.3 정도가 되는 것으로 알려져서, Rayleigh 분포나 Rayleigh 특성 정도가 강한 Weibull 분포로 근사할 수 있다.

요약을 하자면 표 1로 나타낼 수 있다.

2-2 지면 클러터 주파수 특성

전투기의 레이다는 기본적으로 송신한 신호와 수신하는 신호와의 상관 분석을 지속적으로 구함으로써 표적의 위치를 추출한다. 표적으로부터 후방 반사한 신호와 클러

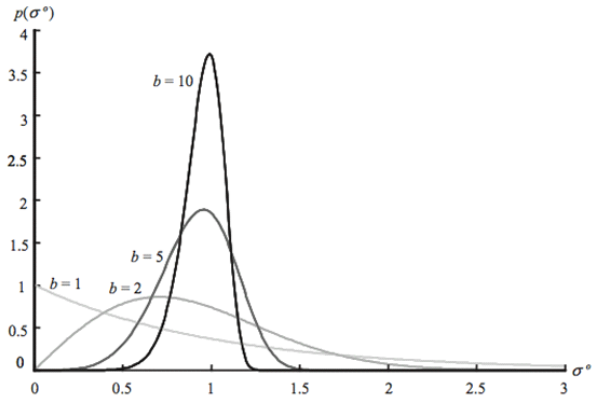

그림1. Weibull 분포
Fig. 1. Weibull distribution.

표 1. 반사체의 크기에 따른 파워 분포 요약
Table 1. Summary of correlation of reflector size and power distribution.

Rayleigh distribution	If clutter is the summation of randomly reflected signal from the scatter in radar resolution cell, the voltage of measurement in radar accoding to Rayleigh distribution.
Rician distribution	When there are big fixed reflector like rock and building, clutter distribution do not follow the Rayleigh distribution. In this case, the signal has a strong DC with Gaussian distribution. This distribution is matched well with Richian distribution.
Weibull distribution	This model used when signal has a strong DC and AC component like Rician distribution.

터 신호를 구분하기 위해 클러터로부터 후방 반사한 시그널의 주파수 특성을 아는 것은 매우 중요하고, 이를 위해서 클러터 신호의 자기 상관의 특성을 우선 이해해야 한다.

일반적으로 반사 신호는 고정되어 있는 반사체(빌딩, 바위)로부터의 반사와 진동하고 있는 반사체(풀, 나뭇가지)로부터의 반사의 선형 합으로 표현한다. 이 경우 클러터 반사 신호의 파워 스펙트럼은

$$G_1(\omega) = a^2\delta(\omega-\omega_0) + G(\omega) \tag{2}$$

식 (2)와 같이 표현된다. 여기서 a^2은 고정 반사체로부터의 반사 전력과 진동하고 있는 반사체로부터의 반사 전력과의 전력비를 의미하고, $G(\omega)$는 주파수 특성이 있는 반사 전력 분포를 의미한다. 고정 반사체로부터의 반사 전력은 주파수 필터링을 통해서 비교적 쉽게 제거할 수 있지만, 진동체로부터의 클러터 신호는 일반적으로 더 까다롭다.

한 예로, 지면 클러터 신호의 특성은 Gorelik의 모델을 사용하여 분석할 수 있다. 입사각 θ을 갖고 전자파가 지표면에 입사할 때, 바람에 의해서 진동체의 위치가 x_j 만큼 변화하면 $(r_j = r + x_j\sin\theta)$, $\sigma_f^2 = 4k^2\sin^2\theta\,\overline{(\triangle u)^2}$를 이용하여 진동체로부터 발생한 클러터 신호는 σ_f^2/k^2의 범위에 따라 식 (3) 및 식 (4)와 같은 파워 스펙트럼을 가진다.

· $\sigma_f^2 \gg k^2$일 때,

$$G(\omega) \propto (2\pi\sigma_f^2)^{0.5}\exp\left(-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2\sigma_f^2}\right) \tag{3}$$

· $\sigma_f^2 \ll k^2$일 때,

$$G(\omega) \propto \left[\frac{\sigma_f^2/2k}{(\sigma_f^2/2k)^2 + (\omega-\omega_0)}\right] \tag{4}$$

이때, $\overline{(\triangle u)^2}$은 진동체의 속도 분산이며 σ_f^2는 반사전력이 가우시안 분포로 표현될 때 표준편차, k는 로렌츠 상수를 나타낸다.

2-3 지면 RCS 모델

앞에서 지면 분류의 당위성에 대해서 설명하였듯이, 클러터의 세기와 특성은 여러 가지 상황에 따라 변화되어 관측된다. 이에 RCS(radar cross section) 모델은 각각의 환경 상황에 따라 지면으로부터 반사되어 오는 전파의 세기를 모델링하는 것이다.

2-3-1 부드러운 지표면의 RCS

상대적으로 부드러운 표면의 경우, 섭동(perturbation) 방법에 따라서 비교적 정확하게 편광효과를 고려한 RCS를 구할 수 있다. 이때 표면이 부드럽다는 것은 표면의 굴곡 반지름이 전자파장보다 훨씬 더 큰 것을 의미한다. 이를 수식으로 표현하면 $f(x,y)$가 지면의 높이 변화를 나타

낼 때,

$$|k\sigma_h \sin\psi| \ll 1 \tag{5}$$

$$|\frac{df(x,y)}{dx}| \ll 1 \tag{6}$$

$$|\frac{df(x,y)}{dy}| \ll 1 \tag{7}$$

일 경우, 섭동 방법을 적용하면 편광 간 표준 RCS는 식 (8) 및 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\sigma^0_{HH} = 4\pi k^4 \sin^4\psi |\alpha_{HH}|^2 S(k_0) \tag{8}$$

$$\sigma^0_{VV} = 4\pi k^4 \sin^4\psi |\alpha_{VV}|^2 S(k_0) \tag{9}$$

이 모델링의 한계는 이종 편광 간 RCS가 0으로 나타나 실제 실험 결과와 모순이 된다는 것이다. 따라서 이종 편광 클러터 신호를 표현하기에는 적합하지 못하다. 또한 RF 주파수에 따라 거친 표면의 기준이 변화하는 점도 한계로 작용한다(표 2).

2-3-2 거친 지표면이나 수풀이 있는 지면에서의 RCS

$$\sigma^0 = \frac{R^2_{f_0}}{\sin^4\psi}\cos^2\beta_0 \exp\left(-\frac{\cot^2\psi}{\tan^2\beta_0}\right) \tag{10}$$

식 (10)의 단점은 산란된 신호의 편광 효과는 고려할 수 없고 정확도가 떨어진다는 점이다. 수풀이 있을 때 RCS를 구하는 해석학적 접은 방법은 매우 복잡할 뿐만 아니라 효과적이지 않으며, 실험 결과에 기반을 둔 경험적 모델을 사용하는 것이 일반적이다(표 3).

표 2. 식 (8) 및 식 (9)의 변수 및 상수
Table 2. Variable and constant value of formula (8) and (9).

$S(k_0)$	Spectrum density of surface roughness $k_0 = \frac{4\pi}{\lambda}\cos\psi$
α_{HH}	$\frac{\epsilon - 1}{(\sin\psi + \sqrt{\epsilon - \cos^2\psi})^2}$
α_{VV}	$\frac{\epsilon - 1[\epsilon(1+\cos^2\psi) - \cos^2\psi]}{(\epsilon\sin\psi + \sqrt{\epsilon - \cos^2\psi})^2}$
α_{VH}	$\alpha_{VH} = \alpha_{HV} = 0$

표 3. 식 (10)의 변수
Table 3. Variable of formula (10).

β_0	Variable of average slope at the rough surface
R_{f_0}	Fresnel reflection coefficient of flat surface

2-4 지면 RCS 모델의 검증 방안

일차적으로 본 논문에서 생성한 모든 모델은 기존 문헌 결과들과 비교를 통하여 검증한다. 이때 주의할 점은 앞서 설명한 대로 같은 클러터 신호를 모델링하는 경우에도 여러 모델링이 존재하고, 어떤 모델링을 선택하느냐에 따라서 결과값도 많이 달라진다는 점이다. 이 이유는 첫째, 같은 실험값을 갖고도 다른 모델링 결과에 도달할 수 있기 때문이다. 실제로 미국의 GIT와 영국의 PRE(Royal Radar Establishment)는 비슷한 시기에 비슷한 실험 결과 데이터를 가지고 모델링을 진행하였지만 모델링 결과는 사뭇 차이가 난다[6]. 두 번째 이유는 대부분의 모델링이 실험값과 실험 환경(풍속, 레이다 특성, 바다 상태 등) 간의 실험적 fitting 결과인데, 모든 실험 환경을 다 포함할 수 없기 때문에 생기는 오차이다.

따라서 논문에서 생성한 모델이 다른 모델들과 절대적으로 일치할 것을 기대할 수 없다. 다만 본 연구에서 선택하는 클러터 모델에 관하여 기존 문헌이 의미하는 바를 정확히 구현했는지 확인하는 절차가 반드시 필요할 것이다.

Ⅲ 지면 클러터 신호 생성

그림 2(a)와 같이 레이다가 비추는 지면은 그림 2(b)와 같이 작은 patch S_i들로 분할할 수 있다. S_i의 면적은 range resolution인 60×60 m^{2}보다 충분히 작은 30×30 m^{2}로 설정한다[6]. 각각의 patch S_i는 해당 면적 내에서 동일한 texture와 normalized RCS를 갖는다고 가정한다. 예를 들어 S_i의 texture는 지면 정보에 따라서 수풀, 도로, 빌딩과 같이 할당될 것이다. 지면으로부터 반사되어 레이다로 돌아오는 신호는 메모리에 저장된다. 특히 m-번째 range-bin에 저장되는 전압 신호는 식 (11)과 같이 표현될 수 있다[5].

$$r(m) = \sum_{R_m + nR_u < R_i < R_{m+1} + nR_u} \frac{G_i \lambda}{(4\pi)^{1.5} R_i^2} e^{-j\frac{4\pi R_i}{\lambda}} \sqrt{S_i}\,(V_{0i,RE} + jV_{0i,IM}) \tag{11}$$

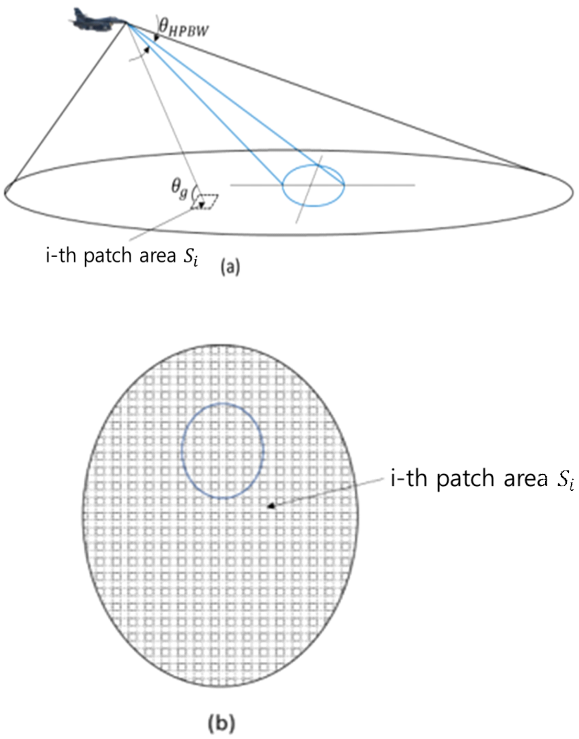

그림 2. 클러터 분석을 위한 지면 면적 분할
Fig 2. Surface division method for clutter analysis.

3-1 Normalized RCS σ_{0i} 모델링

많은 문헌 자료에서 그 특성을 제시하고 있는 normalized RCS σ_{0i}는 단위 면적당 반사 전압 V_{0i}의 크기 제곱에 해당한다.

$$\sigma_{0i} = V_{0i,RE}^2 + V_{0i,IM}^2 \tag{12}$$

참고문헌 [5]에 따르면 i-번째 패치의 normalized RCS σ_{0i}는 식 (13)과 같이 θ_{gi}의 영향을 고려하여 나타낼 수 있다(표 4).

$$\sigma_{0i} = \sigma_{0m}\sin\theta_{gi} + \sigma_{0v} w_i \exp\left(-\frac{(90-\theta_{gi})}{\theta}\right) \tag{13}$$

3-2 아스팔트, 빌딩과 같은 고정 반사체의 Normalized RCS σ_{0i} 모델링

아스팔트, 빌딩과 같은 고정 반사체의 경우, 시간에 대한 variation은 일반적으로 무시한다. 다만 patch와 patch 간에 spatial variation을 Weibull 분포를 이용하여 모델링하도록 한다. 즉, 식 (13)에서의 w_i가 Weibull 분포를 따르는 랜덤 변수로 설정하면, 지면 클러터의 경우에는 일반적으로 [0,1] 사이에 균등하게 분포하는 랜덤 변수 U를 사용하여 $w_i = -\log_e U$ 와 같이 w_i를 생성할 수 있다[4]. 이때 w_i의 평균값은 1이 되어 식 (13)에 있는 normalized RCS σ_{0i}의 평균값 σ_{0i}^0은 식 (14)과 같이 나타내진다.

$$\sigma_{0i}^0 = \sigma_{0m}\sin\theta_{gi} + \sigma_{0v}\exp\left(-\frac{(90-\theta_{gi})}{\theta}\right) \tag{14}$$

표 4. 식 (12)의 변수 및 상수
Table 4. Variable and constant of equation (12).

θ_{gi}	i-th patch's grazing angle of i-th patch
σ_{0v}	normalized RCS at the 90 degree angle (Use -5 dBm^2)
σ_{0m}	normalized RCS at the 45 degree angle
θ	$\dfrac{-20}{\log_e\left(\dfrac{\sigma_{0m}}{\sigma_{0v}}\sin 70^\circ\right)}$
w_i	Random value according to surface texture (Use -13 dBm^2)

3-3 아스팔트, 빌딩과 같은 고정 반사체의 반사 전압 V_{0i} 모델링

이 경우, 각 패치별로 σ_{0i}를 w_i에 따라 다르게 얻으면, 마지막으로 반사 전압은 식 (10)에 따라 $V_{oi,RE} = \sqrt{\sigma_{0i}}\cos\phi$와 $V_{oi,IM} = \sqrt{\sigma_{0i}}\sin\phi$과 같이 $[0,2\pi]$ 사이의 균등하게 분포하는 랜덤 변수 ϕ를 사용하여 패치별 반사 전압의 위상을 모델링한다. 이와 같은 과정을 걸쳐서 생성된 고정 반사체의 $V_{0i,RE}$와 $V_{0i,IM}$의 예시는 그림 3과 같다. 그림 3과 같이 시간에 대한 변이는 없도록 모델링한다.

하지만 여러 패치를 생성할 때 spatial variation은 앞서 소개한 w_i에 의해 고려된다. 결과적으로 70도 grazing angle에서 관찰하는 고정된 패치가 10,000개 있을 경우, 그들이 만들어내는 RCS는 그림 4와 같은 히스토그램으로 분포한다. 그림 4의 히스토그램을 볼 때, RCS가 의도한 Weibull 분포를 잘 따르는 것을 확인할 수 있다.

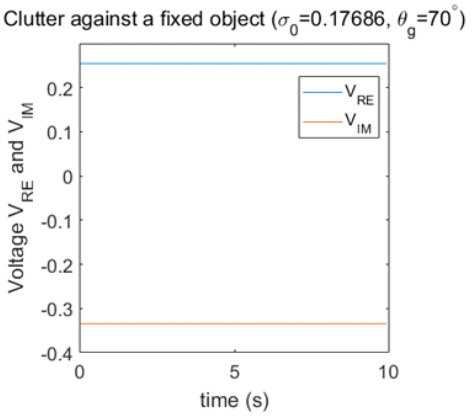

그림 3. 고정된 반사체의 $V_{0i,RE}$, $V_{0i,IM}$
Fig. 3. $V_{0i,RE}$, $V_{0i,IM}$ of a fixed reflector.

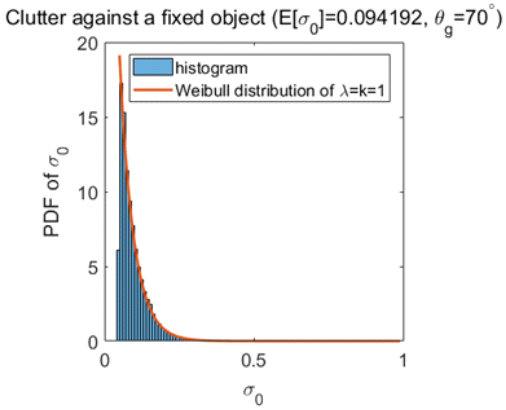

그림 4. 고정된 반사체의 만드는 RCS (Weibull)
Fig. 4. RCS distribution generated by a fixed scatterer (Weibull).

3-4 수풀의 Normalized RCS σ_{0i} 모델링

수풀의 경우에는 여러 작은 반사체들이 만들어내는 신호로 가정할 수 있기 때문에 패치별 반사 전압 $V_{0i,RE}$와 $V_{0i,IM}$이 Gaussian 분포로 잘 근사될 수 있다. Normalized RCS σ_{0i}의 평균값 σ_{0i}^0는 다른 지면과 마찬가지로 식 (13)을 따르도록 설정한다. 수풀은 고정 반사체와 다르게 같은 패치에서도 반사 신호가 시간에 따라 변화하는 스펙트럼 분포를 갖는다. 그리고 이 스펙트럼 분포는 바람의 세기에 따라 영향을 받는다. 참고문헌 [6]에서는 수풀의 경우에도 시간에 따른 스펙트럼을 무시한 반면, 본 프로젝트는 수풀의 경우 이러한 스펙트럼 분포를 고려하도록 한다.

3-5 수풀의 반사 전압 V_{0i} 모델링

구체적인 반사 전압 클러터 생성 절차는 다음과 같다. 대부분의 문헌 자료는 단위 면적당 반사 전압 V_{0i} 대신 normalized RCS σ_{0i}의 파워 스펙트럼 특성을 제시한다. 전압 신호의 생성을 위해 필요한 $V_{0i,RE}$와 $V_{0i,IM}$의 파워 스펙트럼 밀도는 각각 σ_{0i}의 파워 스펙트럼 필도에서 -3 dB만큼 작다(부록 참조).

Kulemin에 의하면 normalized RCS σ_{0i}는 다음과 같은 파워 스펙트럼 분포를 갖는다.

$$S_{\sigma\sigma}(f)=\frac{G_0}{1+\left(\frac{f}{f_c}\right)^n} \tag{15}$$

10 GHz의 경우 n=3을 사용하는 것이 측정치를 잘 근사하는 것으로 알려져 있다[7]. 바람의 세기에 따라서 f_c는 표 5와 같이 증가한다.

여기서 G_0는 파워 스펙트럼이 포함한 총 에너지 $\int G(f)df = R_{\sigma\sigma}(0)$가, 앞서 설명한 normalized RCS의 평균값 σ_{0i}^0(식 (13))이 되도록 정한다. f_c가 4 Hz일 때와 9 Hz일 때 각각 $\int 1/\left(1+\left(\frac{f}{f_c}\right)^3\right)df$이 2×4.84=9.68과 2×10.88=21.76이므로, $V_{0i,RE}$와 $V_{0i,IM}$ 각각의 파워 스펙트럼은 $S_{V_{RE}V_{RE}}(f)=S_{V_{IM}V_{IM}}(f)=\frac{1}{2}G_{\sigma_{0i}}(f)=\frac{\sigma_{0i}^0/(4A)}{1+\left(\frac{f}{f_c}\right)^3}$이 되도록 생성한다. 바람에 따른 normalization factor A는 표 2를 따른다. 이와 같은 과정을 걸쳐서 생성된 $V_{0i,RE}$와 $V_{0i,IM}$의 예시는 그림 5 및 그림 6과 같다.

위와 같이 생성된 시간 도메인에서의 $V_{0i,RE}$와 $V_{0i,IM}$을

표 5. 풍속과 f_c, normalization factor A
Table 5. 3-dB width f_c and normalization factor A with respect to wind speed.

Wind speed	0~5 mph	6~15 mph
3-dB width f_c	4 Hz	9 Hz
Normalization factor A	4.84	10.88

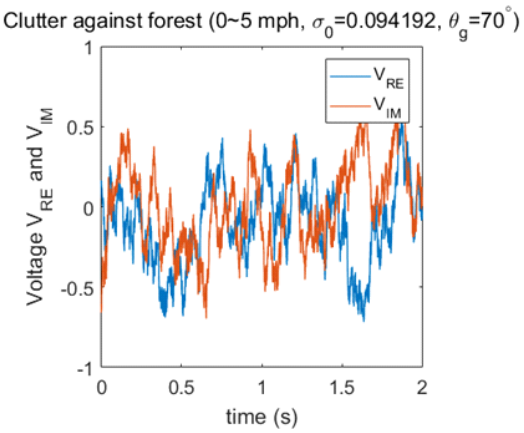

그림 5. 수풀의 반사 전압 예시(풍속 0~5 mph)
Fig. 5. An example of reflection voltage for forest with the wind speed of 0~5 mph.

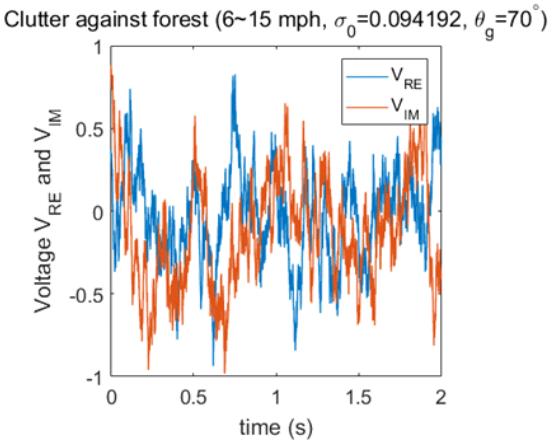

그림 6. 수풀의 반사 전압 예시(풍속 6~15 mph)
Fig. 6. An example of reflection voltage for forest with the wind speed of 6~15 mph.

통하여 normalized RCS $\sigma_{0i} = V_{0i,RE}^2 + V_{0i,IM}^2$의 파워 스펙트럼 밀도를 다시 구할 경우, 원래 계획한 대로 $S_{\sigma\sigma}(f) = \frac{G_0}{1+\left(\frac{f}{f_c}\right)^n}$를 잘 따르는 것을 확인할 수 있다(그림 7).

3-6 수풀의 Normalized RCS σ_{0i} 분포

앞서 설명한 대로 일반적으로 $V_{0i,RE}$와 $V_{0i,IM}$은 Gaussian 분포를 따르도록 모델링하면, 그 결과 normalized

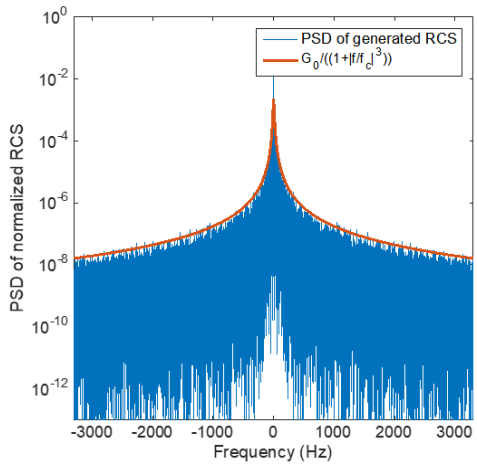

그림 7. 수풀 반사 RCS의 스펙트럼 분포
Fig. 7. Spectrum distribution of the reflection RCS for forest.

RCS σ_{0i}는 exponential 분포를 따른다.

$$p(\sigma_{0i}) = \frac{1}{\sigma_{0i}^0}\exp\left(-\frac{\sigma_{0i}}{\sigma_{0i}^0}\right) \tag{16}$$

이때, σ_{0i}^0는 앞서 설명하고, 식 (14)에 의해서 생성하는 i-번째 면적 patch의 normalized RCS의 평균값이다. 이를 확인하기 위해 앞서 "수풀의 반사 전압 V_{0i} 모델링"에서 생성한 시간 영역에서의 $V_{0i,RE}$와 $V_{0i,IM}$의 제곱합으로부터 σ_{0i}를 구한 후, σ_{0i}의 분포를 그리면 그림 8과 같이

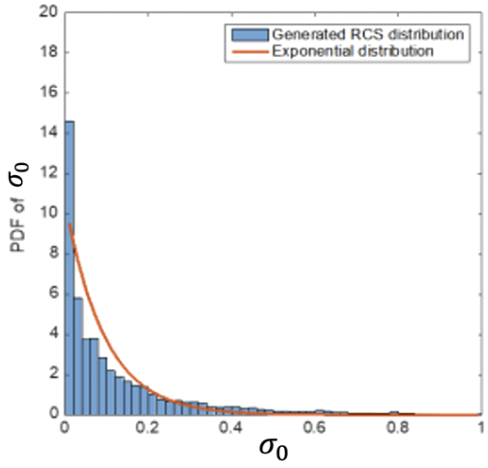

그림 8. 수풀의 normalized RCS 분포
Fig. 8. normalized RCS distribution of grass.

exponential 분포를 따르는 것을 확인할 수 있다.

상기 RCS 분포 식 (15)에서 보다시피 RCS 분포는 바람의 영향을 받지 않는다. 즉, 바람이 셀 경우 시간에 따라서 RCS가 더 빠르게 변화하지만, 그 분포는 변하지 않는다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 레이다 클러터링 신호들 중에서 주로 지면 클러터링 신호에 대해서 리뷰를 하고, 지면 클러터링의 RCS 및 반사 전압을 모델링하였다. 지면 클러터링 중에서도 아스팔트와 빌딩과 같은 고정 반사체, 수풀과 같은 반사체의 클러터링 신호를 생성하였다.

부 록

σ_{0i}의 파워 스펙트럼 분포와 V_{0i}의 파워 스펙트럼 분포와의 상호 관계는 다음과 같이 구할 수 있다. 우선 σ_{0i}의 autocorrelation $R_{\sigma\sigma}(\tau)$는 그 정의에 따라서

$$R_{\sigma\sigma}(\tau) = E[(V_{0i,RE}(t+\tau) + jV_{0i,IM}(t+\tau))(V_{0i,RE}(t) - jV_{0i,IM}(t))]$$

와 같다. $V_{0i,RE}$와 $V_{0i,IM}$이 서로 독립적이라고 가정할 경우,

$$E[V_{0i,RE}(t+\tau)\,V_{0i,IM}(t)] = E[V_{0i,IM}(t+\tau)\,V_{0i,RE}(t)] = 0$$

이므로,

$$\begin{aligned} R_{\sigma\sigma}(\tau) &= E[V_{0i,RE}(t+\tau)\,V_{0i,RE}(t)] + Ep[V_{0i,IM}(t+\tau)\,V_{0i,IM}(t))] \\ &= R_{V_{RE}V_{RE}}(\tau) + R_{V_{IM}V_{IM}}(\tau) \end{aligned}$$

와 같다. 따라서 파워 스펙트럼 밀도는

$$S_{\sigma\sigma}(f) = S_{V_{RE}V_{RE}}(f) + S_{V_{IM}V_{IM}}(f)$$

와 같이 나타난다. $V_{0i,RE}$와 $V_{0i,IM}$이 서로 동일한 분포를 가진다고 가정하면 각각의 파워 스펙트럼 밀도를

$$S_{V_{RE}V_{RE}}(f) = S_{V_{IM}V_{IM}}(f) = \frac{1}{2}S_{\sigma\sigma}(f)$$

와 같이 구할 수 있다. 즉, $V_{0i,RE}$와 $V_{0i,IM}$의 파워 스펙트럼 밀도는 σ_{0i}의 주파수 스펙트럼 밀도에서 -3 dB만큼 작은 형태를 가진다.

References

[1] S. M. Seo, Y. Choi, H. Lim, and J. H. Park, "A deep learning-based compact weighted binary classification technique to discriminate between targets and clutter in SAR images," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 4, pp. 412-418, Jul. 2022.

[2] S. Choi, H. Yang, J. Song, H. Jeon, J. Kim, and Y. Chung, "Sea clutter covariance matrix estimation and its application to whitening filter," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 21, no. 2, pp. 134-142, Apr. 2021.

[3] Defense Agency for Technology and Quality, "2016 Defense science and technology survey," 2016. Available: https://www.krit.re.kr/krit/bbs/gbgh_pdf.do?bbsId=gbgh&article_category=&nttId=4369&page=1&searchCnd=0&searchWrd=2016&startd=&endd=&menu_no=03090200

[4] D. Kim, A. J. Park, U. S. Suh, D. Goo, D. Kim, and B. Yoon, et al., "Accurate clutter synthesis for heterogeneous textures and dynamic radar environments," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 58, no. 4, pp. 3427-3445, Feb. 2022.

[5] C. Alabaster, *Pulse Doppler Radar: Principles*, *Technology*, *Applications*, Raleigh, NC, SciTech, 2012.

[6] C. M. Alabaster, E. J. Hughes, "Clutter mapping for airborne pulse Doppler radar," in *2008 IET Seminar on Radar Clutter Modelling*, London, Feb. 2008, pp. 49-55.

[7] N. C. Currie, R. N. Trebits, and R. D. Hayes, *Millimeter-Wave Radar Clutter*, Norwood, MA, Artech House, 1992.

[8] K. Ward, R. Tough, and S. Watts, *Sea Clutter*, *Scattering*, *the K Distribution and Radar Performance*, Stevenage, Institution of Engineering and Technology, 2013.

[9] J. Choi, I. S. Koh, and J. Jung, "Time domain signal simulation of weather clutter for an airborne radar based on measured data," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 4, pp. 403-411, Jul. 2022.

김 태 인 [경희대학교/석사과정]

https://orcid.org/0000-0001-5964-8942

2022년 2월: 경희대학교 전자공학과 (공학사)

[주 관심분야] SWIPT, Radar Clutter

김 상 혁 [경희대학교/부교수]

http://orcid.org/0000-0002-3268-7287

2007년 2월: 서울대학교 전자공학과, 수학과 (공학사)

2013년 2월: 미국 Stanford University 전자공학과 (공학박사)

2016년 2월～현재: 경희대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] RF, Wireless Power Transfer, Bio-Electronics