

전자전 환경에서의 거친 표면에 대한 지면 클러터 수신신호 모의

Simulation of Ground Clutter Received Signals on Rough Surfaces in an Electronic Warfare Environment

문수혁 · 김기인* · 최혁재* · 김경태

Su-Hyuk Moon · Ki-In Kim* · Hyeok-Jae Choi* · Kyung-Tae Kim

요 약

본 논문에서는 전자전 환경에서 무작위 거친 표면에 대한 지면 클러터 모의 신호 생성 방법을 제안하였다. 전자전 지원 상황에서 수신기는 지면 클러터 신호를 포함한 위협 신호를 수신하므로, 실제 지면 클러터 신호와 유사하게 이를 모의하는 것이 매우 중요하다. 기존의 클러터 모의 신호 생성 방식들은 특정 상황과 조건에만 유효하거나, 경험적인 데이터에 의존하여 일반화에 한계가 있었다. 본 논문에서는 키르히호프 근사를 적용하여 임의의 지형에 대한 클러터 산란 계수를 추정하고, 이를 바탕으로 전자전 수신기가 수신하는 지면 클러터 모의 신호를 생성하여 시뮬레이션하는 방식을 제안하였다. 시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위해, LoS 신호만을 시뮬레이션한 신호와 클러터를 포함한 신호를 실측 신호와 비교하여 상관계수를 계산하였고, 상승 시간에 대한 비교도 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 실측신호와 상관계수는 수신기 높이에 따라 3~6 % 증가하였으며, 상승 시간의 오차가 감소하는 유의미한 결과를 보였다.

Abstract

This study proposes a method for generating simulated ground clutter signals over randomly rough surfaces in an electronic warfare (EW) environment. In EW scenarios, the receiver captures threat signals that include ground-clutter components, making it crucial to simulate signals that resemble real ground clutter accurately. Previous methods for generating clutter signals have often been limited to specific conditions or relied on empirical data, making generalization difficult. In this study, we applied the Kirchhoff approximation to estimate the clutter-scattering coefficients for arbitrary terrains and proposed a simulation method that generates ground clutter signals received by an electronic warfare receiver. To validate the accuracy of the simulation, we compared the correlation coefficients between the simulated and measured signals by focusing on the simulations with only line-of-sight (LoS) signals and those with both LoS and clutter components. In addition, the rise times were compared. The results showed an increase in correlation coefficients by 1~4 % depending on receiver height and a significant reduction in rising time errors, demonstrating the effectiveness of the proposed method.

Key words: Kirchhoff Approximation, Electronic Support, Ground Clutter, Clutter Simulation Signal

「이 논문은 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-22-063).」
포항공과대학교 전자전기공학부(Department of Electrical Engineering, POSTECH)

*LIG 넥스원(주)(LIG Nex1 Co., Ltd)

· Manuscript received November 2, 2024 ; Revised November 19, 2024 ; Accepted December 19, 2024. (ID No. 20241102-122)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

I. 서 론

전자전(EW, electronic warfare)은 공간상에 전파되는 전자파의 군사적 응용을 통칭하는 개념이다. 전자전은 유인 및 무인 시스템에 의한 공중, 해상, 지상 및 우주에서 적용이 가능하며, 통신, 레이더 또는 기타 군사 및 민간 자산을 대상으로 한다. 최근 통신 및 레이더를 이용한 군사 기술의 발전으로 전자전의 중요성이 더욱 커지고 있다. 전자전이 취약할 경우, 방공망이나 레이더의 성능의 우수성과 관계없이 무력화될 수 있는 위험이 있으며, 적들에게 정보자산의 우위를 점하기 힘들다. 전자전은 전자 공격(EA, electronic attack), 전자 보호(EP, electronic protection), 전자 지원(ES, electronic support)의 3가지 유형으로 구분이 가능하다.

이 중 ES는 주로 다른 전자전 활동을 지원하기 위한 정보, 감시, 표적 획득 및 정찰을 목적으로 적의 전자적인 활동을 탐지, 식별, 추적하고, 이를 정보화 하는 역할을 한다. 이러한 정보를 통해 EA 및 EP를 계획하는 데 사용할 수 있다. ES는 주로 적의 레이더, 통신시스템의 전자 신호를 탐지, 적의 전자장비나 시스템의 신호를 지속적으로 모니터링하고 추적, 적의 위치 파악, 조기 위협 경고와 같은 활동으로 이루어진다.

실제 ES를 수행하는데 있어 문제가 되는 요소 중 하나로 지면 클러터가 있다. 지면 클러터는 탐지하고자 하는 목표로부터 발생하는 원치 않는 지표면 신호성분으로, 전자전 수신기의 성능과 감지 정확도에 영향을 미치는 요인이다. 지면 클러터 신호는 위협 신호의 탐지를 어렵게 만들어, 전반적인 시스템의 성능을 저하시키는 문제가 있다. 이러한 문제를 최소화 하기 위해 다양한 기술 및 신호 처리 알고리즘을 통한 신뢰성과 정확도 개선을 위한 연구가 계속되고 있다.

전자전 활동을 수행하기 전 모의 신호 생성기 등의 시험 장비를 이용하여 가상의 위협 신호를 생성하고, 이를 통한 성능 검증을 수행한다. 임의의 파형을 사용하여 성능검증을 수행할 경우, 대부분 지면 클러터 성분이 위협 신호 탐지에 큰 영향을 미치기 때문에, 정확한 지면 클러터 모의를 통한 성능평가가 필요하다. 따라서, 정확한 성능 평가를 위해 지면 클러터 신호를 타당한 정확성을 가

지고 모의해야 한다. 현재, 클러터 신호를 모의하기 위한 여러 방식들이 제안되고 있다. 대표적으로 통계적 모델, 경험적 모델, 수치적 모델이 있다.

통계적 모델은 지형 데이터의 통계적 특성을 기반으로 클러터를 모의하는 방식을 의미한다^{[1]~[4]}. 다양한 지형 데이터에서 얻은 폭넓은 통계적 정보를 활용하여 여러 지형에 대한 모델링이 가능하지만, 실시간 환경 변화나 특이 케이스에 대한 모델링이 힘들고, 매개변수 선택에 따라 결과의 편향이 발생할 수 있는 단점이 존재한다. 또한, 펄스압축을 수행하는 레이더 환경에서 주로 사용되는 모델이기 때문에 펄스압축을 수행하지 않는 전자전 상황에 잘 맞지 않는다.

경험적 모델은 경험적 데이터와 과거의 사례를 바탕으로 클러터를 예측하는 방법을 의미한다. 실제 환경에서 얻은 데이터를 바탕으로 가장 잘 맞는 곡선으로 피팅한다. 따라서 현재 측정하고자 하는 지형에는 현실적으로 가장 잘 맞는다. 하지만, 해당 모델은 제한적인 범위 내에서만 유효하며, 새로운 환경이나 조건에 대한 적응성이 떨어진다는 단점이 존재한다^{[5],[6]}.

수치적 모델은 물리적 법칙과 수학적 방정식을 사용하여 클러터를 정밀하게 모델링하는 방법을 의미한다. 수치적 모델은 높은 정밀도와 상세한 제어가 가능하지만, 계산에 많은 시간과 자원이 소요되고, 모델링을 위한 상세한 입력 정보가 필요하다는 단점이 있다^{[7],[8]}.

또한, 클러터 신호를 모델링하기 위한 여러 수치적인 방식들이 제안되어 왔다^[9]. 대표적으로, Gill's 모델, small perturbation 방법, two scale 모델 그리고 키르히호프 근사 등이 있다. 각 방법은 특정한 장단점을 가지고 있으며, 적용 가능한 상황이 다르다. Gill's 모델은 간단한 수학적 접근이 장점이지만 복잡한 지형에는 부적합하다. Small perturbation 방법은 작은 표면 거칠기에 효과적이지만 큰 표면 거칠기에는 부적합하다. Two scale 모델은 정교한 모델링이 가능하지만 계산 시간이 과도하게 소요되어 실시간 환경에서의 적용이 어렵다는 단점이 존재한다. 반면, 키르히호프 근사 알고리즘은 다양한 주파수 대역과 복잡한 표면에서 높은 효율성을 가지며, 계산 비용이 상대적으로 낮아 범용적으로 적용이 가능하다. 키르히호프 근사는 크게 입사각, 표면의 거칠기, 주파수 대역에 따라

근사의 정확도가 달라진다. 특히, 입사각이 낮을수록 또는 표면 거칠기가 매우 크면 근사 정확도가 감소한다. 즉, 입사각이 너무 작지 않다면, 키르히호프 근사는 거친표면에서 발생하는 산란을 잘 모델링 할 수 있다^[10].

본 논문에서는 범용적으로 적용하기 용이하며, 계산의 효율성을 위해 키르히호프 근사 방식을 사용하였다. 이 방법은 다양한 표면과 주파수 대역에서 높은 정확도를 제공하며, 계산이 비교적 간단한 장점이 있다. 기존 연구들은 지형의 일반화에 한계가 있었으며, 주로 가우시안 분포를 가정하여 전자전 환경에 적합하지 않은 문제점을 보였다^{[11]~[13]}. 따라서, 본 논문에서는 임의의 지형에 대해 지면 분할을 수행하고, 분할된 각 지면에 대해 키르히호프 근사를 적용함으로써 임의의 지형에 대한 지면 클러터 모의신호를 생성하는 방식을 제안한다. 또한, 전자전 환경을 가정하여 항공기 위협 신호를 아군 전자전 수신기로 수신하는 모의 시나리오를 설정하였다. 이러한 시나리오를 기반으로 지면 클러터 모의를 위해 고려해야 할 주요 파라미터를 도출하고, 이를 활용하여 전자전 수신기로 수신되는 신호를 모의하고자 한다. 마지막으로, 키르히호프 근사 및 지면 클러터 파라미터화를 기반으로 한 모의 실험 결과를 실측 데이터와 비교 분석하여 본 연구 방법의 타당성과 유효성을 입증하고자 한다.

II. 전자전 환경을 고려한 지면 클러터 모의

본 장에서는 지면 구조를 고려한 지면 클러터 신호 모의 방법을 설명한다. 도식에서 전자전 수신기를 통해 신호를 수신하는 경우의 모식도를 그림 1과 같이 나타내었다.

그림 1은 위협 신호와 지면 클러터 신호가 전자전 수신기로 들어오는 시나리오를 나타낸다. 전자전 수신기는 직선 경로로 위협 신호를 수신하거나, 반사된 지면 클러터 신호를 수신한다. 이러한 지면 클러터 신호 성분은 전자전 수신기의 위협 신호 분석을 어렵게 만들기 때문에, 정확한 지면 클러터 신호를 모의할 필요가 있다.

그림 2는 전자전 위협 환경에서 지면 클러터 모델링을 포함한 수신기의 수신 신호 모의 과정을 나타낸다. 먼저, 전자전 위협 환경 파라미터를 설정한다. 파라미터 설정 이후, 지면 클러터 신호를 모델링한다. 지면 클러터 신호

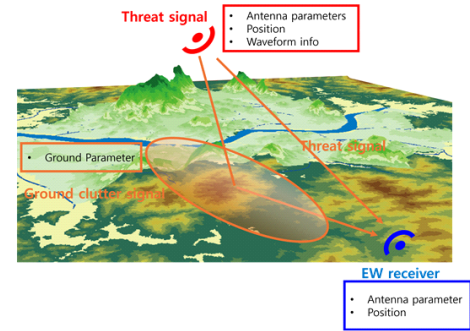


그림 1. 전자전 수신기의 위협 신호 및 지면 클러터 신호 수신 시나리오

Fig. 1. Threat signal and ground clutter signal reception scenario for electronic warfare receiver.

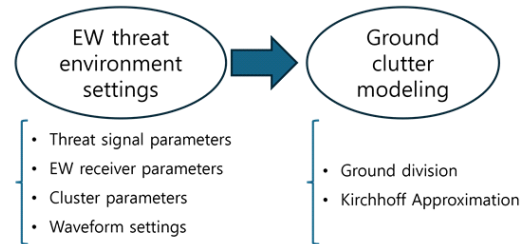


그림 2. 전자전 위협환경에서 지면 클러터 모델링을 포함한 수신기의 수신신호 모의 과정

Fig. 2. Simulation process of received signals for receivers, including ground clutter modeling in an electronic warfare threat environment.

를 모델링하는 방법 중 키르히호프 근사를 여러 지면 조각으로 분리하는 방식을 적용한다^[14]. 마지막으로 각 지면 조각으로부터 전자전 수신기 방향으로 수신되는 신호를 합성하여 전자전 위협 환경에서 지면 클러터 모델링을 포함한 수신기의 수신 신호를 모의한다.

2-1 지면 클러터 모델링을 포함한 전자전 위협환경 파라미터 설정

전자전 위협 환경에서 위협과 관련된 파라미터로 위협 신호원의 안테나 특성 파라미터(방사 패턴, 편파), 위협 신호 파형, 그리고 안테나 위치가 있다. 전자전 수신기와 관련된 파라미터로는 안테나 특성 파라미터(방사 패턴, 편파), 그리고 안테나 위치가 있다. 지면 클러터 관련 파라미터로는 지면의 재질 및 클러터 지면 면적, 입사각 및

반사각 등이 있다. 위협신호 파형은 펄스 파형을 사용한다고 가정할 경우 펄스 반복 주기, 샘플링 속도, 펄스 폭, 반복 횟수 등의 파라미터를 갖는다. 전자전 환경에서의 지면 클러터 모델링을 포함한 수신기의 수신 신호 모의에 필요한 파라미터를 표 1에 정리하였다.

위협 신호원에서 전자전 수신기로 방사하는 전기장을 계산하기 위해 안테나 스티어링 벡터를 계산한다. 위협 신호 생성기 및 전자전 수신기 안테나의 구조를 등간격 사각배열 안테나로 가정한다면, 스티어링 벡터 $a(\phi, \theta)$ 는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$a(\phi, \theta) = \sum_{u=0}^{U-1} \sum_{v=0}^{V-1} \exp \left(\frac{j2\pi}{\lambda} (ud_m \cos\phi \sin\theta + vd_n \sin\phi \sin\theta) \right) \quad (1)$$

여기서 $U, V, \lambda, d_m, d_n, \phi, \theta$ 는 각각 등간격 사각배열 안테나의 열 개수, 행 개수, 파장, 열 간격, 행 간격, 방위각, 고각을 의미한다.

지면 클러터 관련 파라미터 중 지면 클러터 면적은 위협 신호 생성기의 빔이 지면에 조명되는 영역과 전자전 수신기 빔이 지면에 조명되는 영역의 교집합으로 정의할 수 있다. 이때, 지면에 조명되는 빔의 넓이 A_{BW} 는 식 (2)와 같이 계산 가능하다^[15].

$$A_{BW} = 2xh \tan\left(\frac{\Delta\phi_{az}}{2}\right) \left(\tan\left(\theta_{look} + \frac{\Delta\theta_{el}}{2}\right) - \tan\left(\theta_{look} - \frac{\Delta\theta_{el}}{2}\right) \right) \quad (2)$$

표 1. 전자전 환경에서의 지면 클러터 모델링을 포함한 수신기의 수신신호 모의 파라미터 설정
Table 1. Parameters for simulating received signals of receivers, including ground clutter modeling in an electronic warfare environment.

Threat signal	Waveform	EW Receiver	Ground Clutter
Radiation Pattern Polarization Antenna position	Pulse repetition interval Sampling rate Pulse width	Radiation pattern Polarization Antenna position	Clutter ground area Ground division Ground material Incident angle/ Reflection angle

여기서, $x, h, \theta_{look}, \Delta\theta_{el}, \Delta\phi_{az}$ 는 각각 빔 중심에서 지면까지의 거리, 안테나 높이, 고각 관측각, 고각 3 dB 빔 폭, 방위각 3 dB 빔 폭을 의미한다.

지면 클러터 면적을 결정한 후, 여러 조각으로 나누어 여러 지면 조각을 생성한다. 각 지면 조각마다 키르히호프 근사를 사용하기 위해 식 (3)과 같은 타당성 조건을 만족하는지 확인한다^[2].

$$\begin{cases} k\sigma > \frac{\sqrt{10}}{|\cos\theta_i + \cos\theta_s|}, kl > 6 \\ R_c > \lambda \end{cases} \quad (3)$$

이때, $k, \sigma, l, \theta_i, \theta_s, R_c$ 는 각각 파수, 지면 높이 분포의 표준편차, 지면 높이 분포의 자기상관 길이, 위협 신호가 지면 조각으로 입사하는 입사각, 위협 신호가 지면을 맞고 반사되는 반사각 그리고 곡률반경을 의미한다. 입사각 및 반사각은 위협 신호 생성기의 위치, 전자전 수신기의 위치, 지면 조각의 위치에 따라 계산할 수 있다.

표면 재질에 따른 굴절률은 통계적으로 토양의 경우 굴절률은 약 1.2, 소형 나무 플랜테이션의 경우 약 1.4, 숲의 경우 약 1.5의 값을 갖는다는 연구 결과가 있다^{[16],[17]}. 이러한 통계적 결과를 토대로 재질에 맞게 굴절률을 결정한다.

위협 신호 파형은 펄스 반복 주기, 샘플링 속도, 펄스 넓이, 반복 횟수 등으로 결정된다.

2.2 지면 클러터 신호 모의

지면 클러터 신호는 여러 지면 조각의 클러터를 키르히호프 근사하여 산란계수를 구한 후, 전자전 수신기 방향의 신호를 모두 합성하는 방법으로 신호를 생성하여 시뮬레이션한다.

키르히호프 근사는 복잡한 표면에서 발생하는 산란신호를 수학적으로 모델링하는 방식으로, 다양한 지형에서 클러터 모의가 가능하다. 키르히호프 근사를 위해 필요한 파라미터는 입사 전기장, 위협 신호 생성기와 각 지면 조각 간 위치벡터 성분, 지면조각과 전자전 수신기 간 위치벡터 성분, 지면 조각의 법선 벡터 성분, 전체 지형의 높이 분포, 지형의 자기상관 함수가 있다^[18].

먼저, 식 (3)의 타당성 조건을 만족하는 크기로 지형을

분할하여 지면 조각을 생성한다. 지면을 잘게 나눌수록 모의 클러터 신호의 정확도를 높일 수 있으나 복잡도가 증가하며 지면 조각을 크게 나눌수록 복잡도가 감소하지만, 모의 정확도가 감소한다.

각 (m, n) 번째 지면 조각의 입사 전기장 벡터 $(\vec{E}_i)_{mn}$ 를 계산한다. 입사 전기장 벡터를 구하는 수식은 식 (4)와 같다.

$$(\vec{E}_i)_{mn} = \hat{p} E_0 \exp[-j(\vec{k}_i^{mn} \cdot \vec{r}^{mn})] \quad (4)$$

이 때, \hat{p} 는 단위 편광 벡터, E_0 는 입사 전기장의 크기를 의미한다. 다음으로, 각 지면 조각마다 지역 좌표를 설정한다. 각 지면 조각의 단위 법선 벡터 \hat{n} 과 입사 파수벡터 \hat{k}_i 가 이루는 평면에 대한 법선벡터 \hat{t} 를 정의하고, \hat{k}_i 와 \hat{t} 의 단위 외적 벡터 \hat{d} 를 정의하여 $(\hat{t}, \hat{d}, \hat{k}_i)$ 의 지역 좌표를 생성한다. 이를 바탕으로 원거리 Stratton-Chu 공식을 이용한 산란 전기장을 계산할 수 있다^{[19],[20]}. 원거리 Stratton-Chu 공식을 통한 산란 전기장 근사는 식 (5)와 같다.

$$(E_s^{qp})_{mn}(\vec{r}) = \frac{-jk^{mn}}{4\pi R_{mn}} E_0 \int_A f_{qp}^{mn} \exp(j\Phi^{mn}) dA \quad (5)$$

이 때, R_{mn} 은 (m, n) 번째 지면 조각과 전자전 수신기 사이의 거리, f_{qp}^{mn} 는 (m, n) 번째 지면 조각의 편파('hh', 'hv', 'vv', 'vh')에 따른 키르히호프 필드 계수, Φ^{mn} 는 각 지면 조각에 따른 위상변화를 의미한다.

식 (5)을 통해 각 지면 조각의 전자전 수신기 방향의 산란 전기장 성분을 계산한 후, 이를 통해 산란계수를 계산할 수 있다. (m, n) 번째 지면 조각의 산란계수 σ_{qp}^{mn} 를 구하는 식은 식 (6)과 같다.

$$\sigma_{qp}^{mn} = 4\pi R_{mn}^2 \frac{< (E_s^{qp})_{mn} (E_s^{qp})_{mn}^* >}{(E_i^q)_{mn} (E_i^q)_{mn}^*} \quad (6)$$

각 지면 조각마다 산란계수를 구한 후, 이를 합성하여 최종적인 지면 클러터 신호를 모의할 수 있다. 합성된 모의 지면 클러터 신호는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{qp}(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sigma_{qp}^{mn} s(t - \tau^{mn}) \quad (7)$$

이때, $s(t)$, τ^{mn} 은 각각 위협 신호 (펄스 신호), (m, n) 번째 조각의 시간지연 성분을 의미한다.

III. 지면클러터 모델링 및 실측

본 장에서는 제안한 방식을 통해 지면 클러터 신호를 시뮬레이션하고, 성능 검증을 위해 실측 신호와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 먼저, 표 2와 같이 파라미터를 설정하고, 그림 3과 같이 지형정보를 획득하였다. 이때, 전체 지면의 재질은 균일한 토양(굴절률 약 1.2)으로 가정하였다. 또한, 위협 신호의 생성 위치는 고정된 5 m로 설정하고, 수신기의 높이를 5, 10, 15 m로 변화시켜 시뮬레이션을 수행하였다. 설정한 파라미터를 바탕으로 시뮬레이션한 수신신호와 실측 결과를 비교하였다.

시뮬레이션에서 사용된 모든 안테나는 2×2의 등간격

표 2. 시뮬레이션에 사용한 클러터 및 송수신 관련 매개변수

Table 2. Simulation parameters for clutter and transmitter/receiver.

Parameter	Value
Threat signal coordinate (m)	(-27,33,10)
Frequency (GHz)	1.4
Puls repetition period (μs)	18.82 (8,000 sample)
Duty cycle (%)	2.5 (200 sample)
EW coordinate (m)	(30, -32,5), (30, -32,10), (30,-32,15)
ADC/DAC sample (Gbps)	3.4

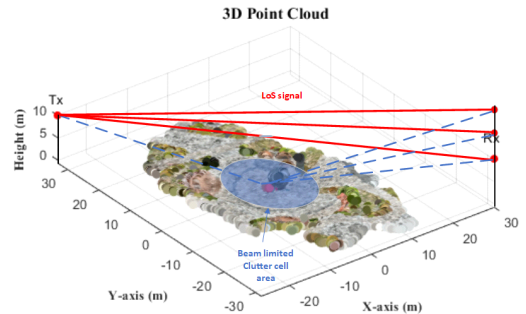


그림 3. 클러터 시뮬레이션을 위해 LIDAR로 스캔한 지형
Fig. 3. Terrain scanned with LIDAR for clutter simulation.

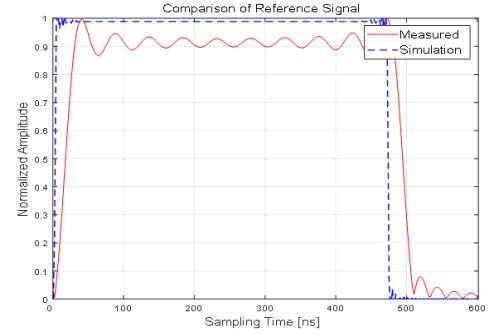
사각배열 안테나로 가정하였다. 두 빔이 교차하는 지점을 지면 클러터 면적으로 정의하고, 그림 3과 같이 여러 개의 지면 조각으로 분할하였다. 지면 조각의 개수는 키르히호프 타당성 조건을 충족하는 개수로 설정하여 분할하였으며(이 시뮬레이션에서는 32×32 로 분할함), 분할한 지면 조각마다 키르히호프 근사를 적용하였다. 지면 조각마다 식 (4)를 사용하여 입사 전기장을 계산한 후, 이를 바탕으로 식 (5)를 통해 원거리 산란장을 계산한다. 마지막으로, 계산한 원거리 산란장을 식 (6)에 대입하여 각 지면 조각별 산란계수를 구한다. 전송하는 신호는 펄스 신호로 가정하였으며, 펄스 신호를 전송한 후, 전자전 수신기에서 지면 클러터 성분이 포함된 신호를 수신한다.

그림 4(a)에서는 시뮬레이션으로 생성한 참조 신호와 실측 참조 신호를 비교하였다. 여기서 참조 신호는 송신 전의 원본 신호를 의미한다. 시뮬레이션 참조 신호는 사전에 정의된 파라미터에 따라 컴퓨터 모델링을 통해 생성된 신호로, 송신 시뮬레이션을 하기 전의 원본 신호를 의미한다. 반면, 실측 참조 신호는 RFSoc를 사용하여 생성한 후 loop-back을 통해 측정된 신호를 의미한다. 이 때, 실측 신호와 시뮬레이션 참조 신호 간의 상승 시간에 차이가 있음을 확인 할 수 있다.

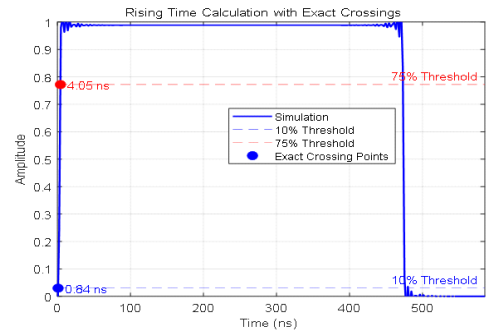
실측 신호와 시뮬레이션 신호 간의 상승 시간 차이는 주로 하드웨어적 요인에서 기인한 것이다. 실측 신호는 RFSoc 보드를 사용하여 측정된 데이터로, 하드웨어의 필터링 효과와 시스템 응답 속도와 같은 물리적 제약이 반영된 결과이다. 반면, 시뮬레이션 신호는 이론적 모델에 기반하여 생성된 신호로, 하드웨어적 특성 및 필터링 과정이 포함되지 않으므로 클러터에 의한 영향이 존재하지 않을 때에도 상승 시간에서 오차를 보이는 것이 확인되었다.

그림 4(b) 및 그림 4(c)에서는 시뮬레이션 신호와 실측 신호의 상승 시간을 비교하였다. 상승 시간은 신호가 처음 도착한 시점부터 최대 진폭에 도달할 때까지 걸리는 시간으로, 신호의 전파 특성과 클러터에 의한 경로 변화에 따라 달라진다. 본 논문에서는 상승 시간을 정의하기 위해 최대 진폭의 10 %와 75 %를 기준으로 하는 threshold를 사용하였다.

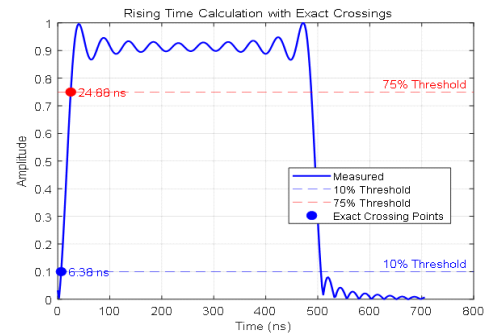
클러터가 존재하지 않는 시뮬레이션 참조신호와 실측



(a) 시뮬레이션 신호와 참조신호
(a) Simulation signal and reference signal



(b) 시뮬레이션 신호의 상승 시간
(b) Rising time of simulation signal



(c) 참조신호의 상승 시간
(c) Rising time of reference signal

그림 4. 한 펄스 반복 구간의 실측 참조 신호와 시뮬레이션 참조 신호 비교

Fig. 4. Comparison of measured and simulated reference signals for one pulse repetition interval.

참조 신호의 상승 시간을 각각 측정한 결과, 시뮬레이션 참조 신호의 상승 시간은 3.16 ns로 나타났으며, 실측 참조 신호의 상승 시간은 18.5 ns로 약 15.34 ns만큼 차이가

있는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 오차 보정을 통해 실측 신호와 시뮬레이션 신호간 상승 시간의 오차를 더욱 감소시킬 수 있다.

그림 5는 전자전 환경에서 지면 클러터를 고려한 수신 신호의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 수신기 높이에 따라 신호의 시간 지연이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 또한, 클러터의 영향으로 인해 예상대로 기존 시뮬레이션 참조 신호보다 상승 시간이 길어지는 것을 확인하였다. 해당 그림에서 'clutter time delay'로 표시된 영역은 클러터로 인해 시간 지연이 발생하는 부분을 의미한다.

지면 클러터를 고려한 펄스 신호를 시뮬레이션한 이후, 실측 신호와 비교하였다. 실제 측정을 위해 송신기는 Xilinx사의 ZCU-111보드를, 수신기는 ZCU-216보드를 사용하였다. 두 보드의 ADC/DAC 샘플링은 모두 3.4 Gps로 동일하게 설정하였다.

그림 6은 전자전 환경에서 지면 클러터를 포함한 실측 값을 나타낸 것으로, 그림 3에 제시된 환경에서 얻은 값이다. 예상한 대로 기존 실측 참조 신호보다 상승 시간이 길어지는 것을 확인할 수 있었다. 해당 그림에서 'clutter + multipath time delay'로 표시된 영역은 클러터에 의한 시간지연뿐만 아니라 건물로 인한 다중 경로 반사 신호의 영향까지 포함하는 것을 나타낸다. 실측 데이터에서는 클러터 신호만을 모의하는 것이 아니라, 주변 환경으로부터의 여러 영향들을 포함하고 있으며, 특히 건물 같은 구

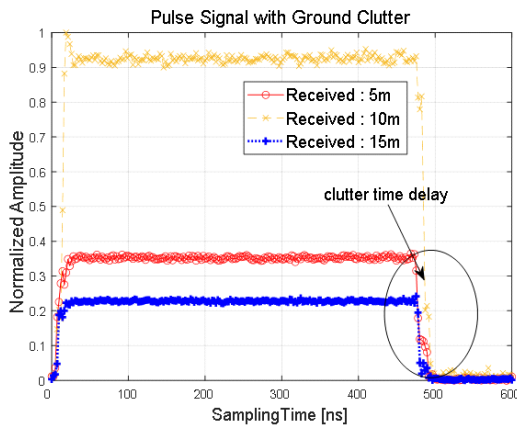


그림 5. 지면 클러터를 고려한 수신신호 시뮬레이션
Fig. 5. Simulated pulse signal considering ground clutter.

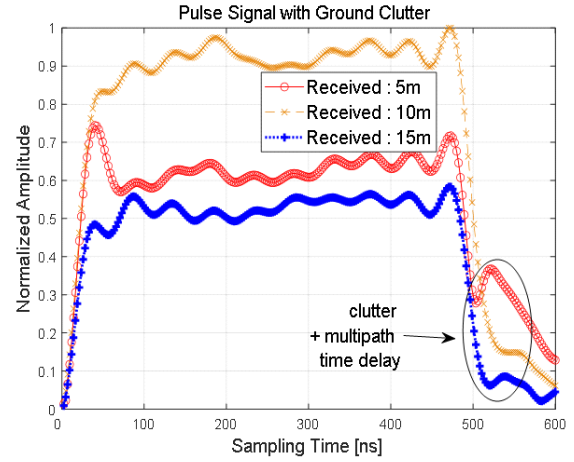


그림 6. 지면 클러터를 포함한 수신신호 실측 결과
Fig. 6. Measurement results of pulse signal with ground clutter.

조물로 인한 추가적인 반사 영향 또한 반영이 되어있기 때문에 시뮬레이션과 실제 환경 간의 차이가 발생한다. 또한, 그림 5 및 그림 6의 그래프를 비교한 결과, 특정 높이(10 m) 구간에서 수신 신호 세기가 상대적으로 더 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 수신 신호가 LoS 신호와 클러터 반사 신호의 합성으로 이루어져 있으며, 수신기 높이에 따라 각 신호 성분의 상대적 기여도가 달라지기 때문에 발생하는 현상으로 판단된다.

특히, 10 m 높이 구간에서 LoS신호와 클러터 반사 신호 간의 보강 간섭이 발생하여 수신 신호 세기가 증가한 것으로 해석된다. 시뮬레이션과 실측 결과 모두 10 m에서 신호 세기가 증가하는 경향을 보였으므로, 시뮬레이션이 실제 환경에서의 신호 특성을 효과적으로 반영하고 있는 것을 알 수 있다.

다음으로, 시뮬레이션으로 수신한 신호와 실제 수신 신호 사이의 일치도를 확인하기 위해, 식 (8)과 같은 상관 계수를 계산한다.

$$R = E[ZZ^H] = \begin{bmatrix} s_1^* s_1 & s_1^* s_2 \\ s_2^* s_1 & s_2^* s_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

이 때, Z 는 모의 신호 s_1 과 실측신호 s_2 의 결합으로 이루어진 행렬로, $Z = [s_1 \ s_2]^T$ 를 의미한다. T 는 전치연산자를 의미하며, H 는 에르미트(Hermitian) 연산자를 의미

한다.

먼저, LoS(line-of-sight)와 1개의 반사 신호만을 고려한 시뮬레이션 신호와 실측 신호 간의 상관계수를 계산하였고, 이후 지면 클러터를 포함한 시뮬레이션 신호와 실측 신호 간의 상관계수를 계산하였다. 그 결과, 표 3에서와 같이 수신기 높이 5, 10, 15 m에 따른 상관계수가 각각 6, 4, 3 %로 향상된 것을 확인하였다.

다음으로, 시뮬레이션의 정확성을 검증하기 위해 수신기 높이에 따른 상승 시간을 비교하고, 그 결과를 표 4에 나타냈다. 이를 위해 동일한 환경에서 측정된 실측 신호와 시뮬레이션 신호의 상승 시간을 분석하였다. 지면 클러터로 인해 신호가 반사되면서 수신기에 도달하는 시간이 지연되기 때문에, 상승 시간이 증가하게 된다.

시뮬레이션에서는 송신기와 수신기 간 경로에서 자유 공간 감쇠를 계산한 후, LoS 신호 방향과 지면 클러터 방

향에 따른 빔 계인을 산출하였다. 이후, 키르히호프 근사를 적용하여 산출된 산란계수를 반영함으로써, 지면 클러터와 관련된 감쇠요소를 시뮬레이션에 포함시켰다.

시뮬레이션과 실측 간의 차이는 시뮬레이션이 지면 클러터만을 고려하여 모의한 반면, 실측 환경에서는 도심 건물을 비롯한 다양한 반사 성분이 추가되었기 때문에 발생한다. 또한, 시뮬레이션에서는 자유 공간 경로 손실 공식을 적용하였으나, 실제 환경에서는 추가적인 장애물과 반사로 인해 신호의 상승 시간에서 차이가 발생하게 된다. 이러한 시간 차이는 실측 신호에서 다중 경로 반사로 인해 신호가 더 지연되어 나타나며, 시뮬레이션 신호보다 상승 시간이 늦게 나타나는 경향을 보인다.

결과적으로, 실측 신호와 시뮬레이션 신호 간의 상승 시간 차이가 존재하게 된다. 상승 시간 차이의 비교 결과 수신기 높이가 5, 10, 15 m로 증가함에 따라 실측 신호의 상승 시간은 각각 40, 44.70, 47.05 ns로 증가하였으며, LoS 신호만을 시뮬레이션 한 경우에는 상승 시간이 4.70, 4.70, 7.05 ns로, 보정치를 추가할 경우 20.04, 20.04, 22.39 ns로 증가하는 경향을 보였다. 또한, 클러터 신호를 포함한 시뮬레이션에서는 각각 21.17, 21.17, 25.88 ns로, 보정치를 추가할 경우 36.51, 36.51, 41.22 ns로 상승 시간이 증가하는 경향을 나타냈다.

실측 신호와 비교했을 때, 클러터를 포함한 시뮬레이션의 시간 오차가 더 줄어들었음을 확인할 수 있다. 즉, LoS 신호만을 시뮬레이션한 경우보다 클러터 신호를 포함한 시뮬레이션이 실측 신호와 더 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

표 3. 실측 신호(LoS+클러터+다중 반사 성분)와 시뮬레이션 신호 간 상관계수 비교 (LoS 및 LoS+클러터)
Table 3. Comparison of correlation coefficients between measured signal (LoS+clutter+multipath components) and simulated signals (LoS and LoS+clutter).

Receiver height (m)	Simulation signal		Correlation coefficient difference (%)
	LoS + 1 reflected signal correlation coefficient	LoS + Clutter signal correlation coefficient	
5	0.86	0.92	6
10	0.92	0.96	4
15	0.92	0.95	3

표 4. 실측 클러터 신호와 시뮬레이션 클러터 신호의 상승 시간 비교
Table 4. Comparison of rising time between measured and simulated signals.

Receiver height (m)	Real reference signal rising time (ns)	Real signal rising time (ns)	Simulation reference signal rising time (ns)	Simulation rising time (LoS signal) (ns)	Simulation rising time (LoS + Clutter signal) (ns) (Parentheses are rising times after error correction) (ns)
5	18.5	40.00	3.16	4.70	21.17 (36.51)
10		44.70		4.70	21.17 (36.51)
15		47.05		7.05	25.88 (41.22)

IV. 결 론

본 논문에서는 전자전 환경에서 무작위 거친 표면에 대한 지면 클러터 모의 신호를 생성하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 지형 정보를 바탕으로 지면을 여러 구역으로 분할하고, 각 구역에 대해 키르히호프 근사를 적용하여 산란계수를 도출함으로써 지면 클러터 신호를 효과적으로 시뮬레이션하였다. 신호의 타당성을 검증하기 위해 실측 신호와의 상관계수 및 상승 시간 비교를 수행하였다. LoS신호와 한개의 반사신호만을 시뮬레이션한 결과와 비교했을 때, 클러터 신호까지 포함한 시뮬레이션에서는 실측 신호와의 상관계수가 3~6 % 향상된 것을 확인할 수 있었다. 또한, 수신기 높이에 따른 상승 시간을 비교한 결과, LoS 신호만을 시뮬레이션 한 경우와 달리 클러터 신호를 포함한 시뮬레이션에서는 상승 시간의 오차가 약 30 ns에서 20 ns로, 하드웨어 오차 보정치를 더할 시, 상승시간의 오차가 약 6 ns로 감소한 것을 확인할 수 있었다.

시뮬레이션과 실측 신호 간 차이는 주로 시뮬레이션이 지면 클러터만을 고려한 반면, 실측 환경에서는 도심 건물과 같은 다양한 반사 성분이 추가되었기 때문에 발생하였다. 또한, 시뮬레이션에서 자유 공간 패스 손실 공식을 적용하였으나, 실제 환경에서는 더 큰 감쇄가 발생하여 이러한 차이가 나타났다.

본 연구는 지면 클러터 신호의 정확한 모의를 통해 전자전 수신기의 성능 평가 및 개선에 기여할 수 있음을 보여주었다. 이 연구를 통해 전자전 시스템의 탐지 성능을 향상시키고, 다양한 지형에서의 적용 가능성을 높여 실질적인 시스템 개선에 기여할 수 있을 것이다.

References

- [1] C. H. Nam, S. W. Ra, "Approximated modeling technique of Weibull distributed radar clutter," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 7, pp. 822-830, Jul. 2012.
- [2] J. B. Billingsley, A. Farina, F. Gini, M. V. Greco, and L. Verrazzani, "Statistical analyses of measured radar ground clutter data," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, no. 2, pp. 579-593, Apr. 1999.
- [3] S. H. Yueh, J. A. Kong, J. K. Jao, R. T. Shin, and L. M. Novak, "K-distribution and polarimetric terrain radar clutter," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 3, no. 8, pp. 747-768, Apr. 1989.
- [4] J. Carretero-Moya, J. Gismero-Menoyo, Á. Blanco-del-Campo, and A. Asensio-Lopez, "Statistical analysis of a high-resolution sea-clutter database," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 4, pp. 2024-2037, Apr. 2010.
- [5] V. Gregers-Hansen, R. Mital, "An improved empirical model for radar sea clutter reflectivity," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, no. 4, pp. 3512-3524, Oct. 2012.
- [6] J. B. Billingsley, *Low-angle Radar Land Clutter: Measurements and Empirical Models*, Stevenage, IET, 2002.
- [7] A. C. M. Austin, M. J. Neve, and G. B. Rowe, "Modeling propagation in multifloor buildings using the FDTD method," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 11, pp. 4239-4246, Nov. 2011.
- [8] O. Ozgun, M. Kuzuoglu, "Physics-based modeling of sea clutter phenomenon by a full-wave numerical solver," *Wave Motion*, vol. 109, p. 102872, Feb. 2022.
- [9] L. Vaitilingom, A. Khenchaf, "Radar cross sections of sea and ground clutter estimated by two scale model and small slope approximation in HF-VHF bands," *Progress in Electromagnetics Research B*, vol. 29, pp. 311-338, Apr. 2011.
- [10] E. I. Thorsos, "The validity of the Kirchhoff approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 83, no. 1, pp. 78-92, Jan. 1988.
- [11] D. E. Newland, H. Saunders, *An Introduction to Random Vibration and Spectral Analysis*, 2nd ed. White Plains, NY, Longman, 1984.

- [12] G. Franceschetti, M. Migliaccio, and D. Riccio, "An electromagnetic fractal-based model for the study of fading," *Radio Science*, vol. 31, no. 6, pp. 1749-1759, Nov. 1996.
- [13] J. W. Goodman, *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications*, Englewood, CO, Robert & Company, 2007.
- [14] F. Shi, W. Choi, M. J. S. Lowe, E. A. Skelton, and R. V. Craster, "The validity of Kirchhoff theory for scattering of elastic waves from rough surfaces," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 471, p. 20140977, Apr. 2015.
- [15] N. J. Willis, *Bistatic Radar(Radar, Sonar and Navigation)*, 2nd ed. Raleigh, NC, SciTech, 2004.
- [16] S. O. Nelson, "Dielectric properties of agricultural products-measurements and applications," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 26, no. 5, pp. 845-869, Oct. 1991.
- [17] H. S. Tan, H. T. Chuah, "Dielectric properties and electromagnetic scattering from foliage and vegetation," in *AMPC Asia-Pacific Microwave Conference*, Adelaide, SA, Aug. 1992, pp. 575-582.
- [18] Y. Yang, K. S. Chen, and S. Wang, "Bistatic radar scattering from non-Gaussian height distributed rough surfaces," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 18, p. 4457, Sep. 2022.
- [19] A. Ishimaru, "Radiation from apertures and beam waves," in *Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering: From Fundamentals to Applications*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, pp. 169-200, 2017.
- [20] A. Collaro, G. Franceschetti, M. Migliaccio, and D. Riccio, "Gaussian rough surfaces and Kirchhoff approximation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 47, no. 2, pp. 392-398, Feb. 1999.

문 수 혁 [LIG 넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0005-8563-9560>



2016년 8월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2021년 8월: 중앙대학교 전자전기공학부 통신 및 신호처리 (공학박사)
 2022년 11월~2024년 10월: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사후 연구원
 2024년 11월~현재: LIG 넥스원 전자전연

구소 선임연구원

[주 관심분야] 전자전, 레이더 신호처리

김 기 인 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0006-0602-5876>



2012년 8월: 아주대학교 전자공학 (공학사)
 2023년 2월: 광주과학기술원 기전공학부 (공학박사)
 2023년 6월~현재: LIG 넥스원 전자전연구소 선임연구원
 [주 관심분야] 전자전, M&S

최 혁 재 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0009-0003-2102-0756>



2006년 2월: 홍익대학교 전자공학과 (공학사)

2006년 1월~현재: 현재 LIG 넥스원 전자전연구소 수석연구원

2024년 8월: 한양대학교 공학대학원 전기·전자·컴퓨터 공학과 (공학석사)

[주 관심분야] 전자전, ES 시스템

김 경 태 [포항공과대학교/정교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1200-5282>



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)

1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)

1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전자공학과 교수

2011년 3월~현재 : 포항공과대학교 전자전기공학과 정교수

2018년 1월~현재: 무인감시정찰기술연구센터장

[주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식 및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정