

전파 간섭 환경 모의 방법 및 CFAR 알고리즘에 따른 레이더 성능 변화에 관한 연구

Simulation Method of Wave Interference Environment and Variation of Radar Performance according to Constant False Alarm Rate Algorithm

박명훈 · 김현승 · 전우중 · 권세웅 · 이기원

Myung-Hoon Park · Hyun-Seung Kim · Woo-Joong Jeon · Se-Woong Kwon · Ki-Won Lee

요 약

레이더 운용 시 다양한 외부 원인에 의해 탐지 성능이 저하될 수 있다. 저하 원인으로는 대기 및 지형에 의한 손실뿐만 아니라, 간섭, 타 표적 등이 있다. 국내 운용 중인 레이더는 복잡한 지형 특성상 서로 가깝게 설치되어 있어 간섭 영향을 받아 성능이 저하된다. 본 논문에서는 이러한 레이더 성능 저하를 사전 예측 및 방지하기 위해 주변 레이더 간섭 환경 및 다 표적 환경을 모의하는 방법을 기술하고, M&S 도구를 개발하였다. 이 도구를 통해 신호를 생성하여 기존 CFAR 알고리즘의 성능을 확인하고, 레이더 탐지 성능 향상을 위한 새로운 CFAR 알고리즘 사용 방법을 제안하였다. 그 결과, 레이더 간섭 및 다 표적 환경에서 제안한 CFAR 알고리즘을 통해 레이더 탐지 성능이 향상된 것을 확인하였다.

Abstract

In radar operations, the detection performance is reduced owing to various external factors. These factors include interference and other targets, as well as losses from the atmosphere and terrain. Because of its geomorphic characteristics, radar operating in Korea is affected by interference, and its performance is degraded. This paper describes the simulation of the environment of near-radar interference and multiple targets. The modeling and simulation (M&S) tool was developed to predict and prevent the degradation in radar performance in advance. We validated existing constant false alarm rate (CFAR) detection algorithms by generating signals through the M&S tool and proposed a new CFAR algorithm to enhance the radar performance. Consequently, radar performance is enhanced by the new CFAR algorithm in radar interference and multiple target environments.

Key words: Radar Interference, Radar Performance Prediction, FDR, Modeling and Simulation, CFAR-Algorithm

I. 서 론

레이더와 같은 큰 체계를 운용하기 위해서는 사전에 성능을 예측하는 일은 중요하다. 사전 예측을 통해 운용 시 발생 가능한 위험성을 제거하여 성능 저하 및 시간, 비

용 등을 줄일 수 있다. 레이더는 표적을 탐지하기 위해 빠른 시간에 빔과 주파수를 실시간으로 바꾸면서 운용한다. 이러한 레이더 환경에는 외부적인 요소에 따른 손실이 발생하여 탐지 성능을 저하시키기 때문에 사전 분석이 필요하다. 따라서 시간 기반의 레이더 특성과 환경을 모

LIG넥스원(주) (LIG Nex1 Co., Ltd.)

· Manuscript received February 5, 2021 ; Revised March 4, 2021 ; Accepted March 22, 2021. (ID No. 20210205-013)

· Corresponding Author: Myung-Hoon Park (e-mail: myunghoon.park2@lignex1.com)

의하는 도구를 통한 레이더 성능을 예측하는 것은 매우 중요하다.

레이더의 성능이 저하되는 요인은 크게 내부와 외부로 나뉜다. 내부 요인은 하드웨어 고장에 따른 성능 저하와 신호처리 중 발생하는 손실 등이 있다. 외부 요인으로는 대표적으로 지형 및 대기 상태와 같은 운용환경 및 간섭이 있으며, 다른 항공기 또한 성능 저하 요인 중에 큰 부분을 차지한다. 이는 임의의 시간과 크기로 레이더 성능을 저하시키기 때문에 운용 시 필히 감안해야 하는 부분이다.

현재 감시정찰의 중요성은 나날이 증가하여 레이더에 요구되는 탐지 거리는 지속적으로 증가하고 있다. 그에 따라 레이더간 상호 전파간섭이 발생 가능한 범위 또한 증가하였다. 동일한 목적으로 설계 및 제작, 운용 중인 레이더는 주파수 자원이 부족한 상황에서 좁은 대역폭을 할당받기 때문에 전파간섭이 증가한다. 그 중 펄스를 사용하는 레이더의 경우, 수신 구간에 다른 레이더의 펄스 방사 시간에 따라 간섭 받는 시간이 달라진다. 이런 펄스형 간섭은 주파수 및 빔 운용에 의해서 결정되며, 레이더 운용 환경에 영향을 받는다. 레이더 운용환경은 설치 장소의 고도, 주변 지형, 대기 환경에 따라 결정된다. 레이더의 운용 고도에 따라 주변 지형에 의한 성능 저하 정도가 달라진다. 또한 실시간으로 바뀌는 대기 환경은 불안정한 전파환경을 구성하는데, 이는 원거리로 갈수록 영향성이 커져 원거리에서 탐지능력이 저하된다. 이런 임의적으로 바뀌는 대기 환경과 전파 간섭을 예측하고 줄이기 위해 시간 기반의 레이더 성능과 간섭 영향을 예측하고 분석하는 연구가 진행되어 왔다^{[1]~[3]}.

하지만 기존 진행된 연구에는 운용환경과 간섭 영향에 따른 표적의 탐지 결과를 동시에 분석할 수 없다. 하지만 표적 신호 근처에 펄스형 간섭이 발생하거나, 크기가 큰 다른 항공기가 인접해 있는 경우, CFAR masking(CFAR : constant false alarm rate) 같은 현상으로 표적을 놓칠 수 있다. 이때 CFAR란 노이즈, 클러터, 간섭 등의 배경 잡음에 대응해 유동적으로 하여 오탐지를 하지 않게 사용하는 알고리즘이다.

이러한 간섭 및 운용환경 특성을 모두 반영하기 위해 본 논문에서는 전파환경과 펄스형 간섭을 동시에 고려

가능한 M&S(modeling and simulation) 도구를 개발하여 실제 운용 중인 레이더에 발생 가능한 불포착 가능성을 모의하고 분석하였다.

II. M&S 모델 구성

M&S 도구는 표적을 탐지하는 레이더 모델과 피 탐지 대상을 모의하는 표적 모델, 운용환경을 구성하는 환경모델이 있으며, 간섭을 주는 간섭 레이더 모델로 구성되어 있다. 각 모델은 세부 기능을 하는 하위 모델들로 구성되어 있으며, 그림 1과 같다.

2.1 표적 및 환경 모델

2.1.1 운동방정식 모델

표적의 움직임을 모의하는 운동방정식 모델(dynamics)은 회전운동을 제외한 병진운동만을 고려한 뉴턴 제 2법칙 기반의 3자유도 운동방정식으로 구성되어 있다^[4]. 운동방정식 모델을 통해 계산되는 표적 기동은 정해진 비행 시나리오에 따르며, 직진, 선회, 가속 등이 가능하다.

표적이 직진 및 선회하면 레이더의 지향각도가 실시간으로 변하여 표적의 RCS가 달라지기 때문에 실시간으로 계산해야 한다. 지향각도를 산출하기 위해서 식 (1) 및 식 (2)와 같이 NED(north-east-down) 좌표계에서의 레이더와

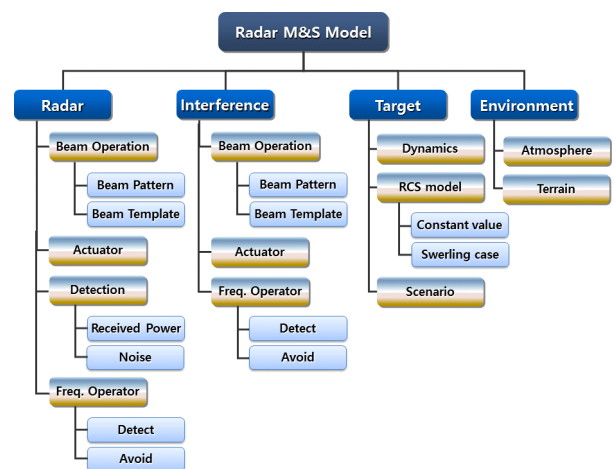


그림 1. M&S 모델 구성도

Fig. 1. The structure of M&S model.

표적 간 상대거리를 표적 자세를 고려하여 동체좌표계로 변환하여 방위각과 고각을 산출한다. 이를 통해 표적 자세 변화에 따라 상대 자세각도를 계산하여 RCS 변화를 반영할 수 있다(그림 2).

$$P = C_N^B R_n$$

$$R_n = [N_R E_R D_R] - [N_T E_T D_T]$$

$$C_N^B = R_1(\phi) R_2(\theta) R_3(\psi)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Aspect_{\phi_{R-T}} = 360^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{P_y}{P_x}\right)$$

$$Aspect_{\theta_{R-T}} = \tan^{-1}\left(\frac{-P_z}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}}\right) \quad (2)$$

R_n : NED 좌표계에서의 상대 위치
 P : 동체 좌표계에서의 상대 위치
 ϕ, θ, ψ : 롤, 피치, 요 자세 각도 (deg)

2-1-2 RCS 모델

표적의 RCS(radar cross section)는 표적 위치 및 자세에 따라 정해진다. RCS 모델은 기동에 따른 표적 RCS 변화를 Swerling 모델, 고정인 대푯값, RCS-Database로 총 3가지 모델로 구성하였다. Swerling 모델은 차수 2 m의 카이 제곱(chi-square) 분포의 특수한 경우로 식 (3)과 같이 나

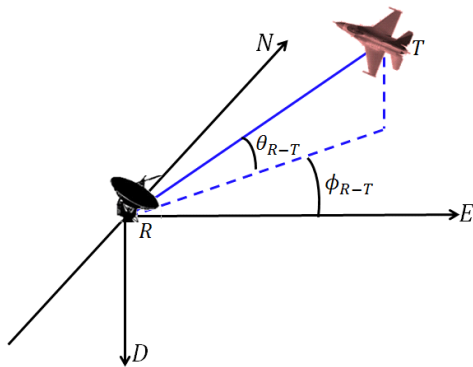


그림 2. 상대 각도 축 개념도
 Fig. 2. The concept of relative angle axis.

타낼 수 있다. 이때 σ_{av} 는 RCS 변동의 평균값을 의미한다. 모의하는 표적은 기동 특성상 스캔 대 스캔변동으로 swerling case1에 해당한다. RCS 대푯값의 경우, 보편적으로 알려진 값으로 표적 자세와 무관하게 고정된 값을 사용한다^[5].

$$p(\sigma) = \frac{1}{\sigma_{av}} \exp\left(-\frac{\sigma}{\sigma_{av}}\right), \sigma \geq 0 \quad (3)$$

RCS-Database는 소형 표적 모델을 제작하여 RCS를 방위 및 고각 1°간격으로 측정하여 구성한 RCS 데이터베이스이다. 구성된 RCS는 사용 주파수에 대해 RCS scattering matrix의 각 성분인 σ_{HH} , σ_{VH} , σ_{HV} , σ_{VV} 로 구성되어 있다. 그림 3과 같이 구성된 RCS는 빔 방사 시간에 대한 표적 자세에 따라 각각 다른 값을 선택하여 사용한다.

2-1-3 운용 환경 모델

운용 환경 모델의 하위 모델로는 전파 및 지형 모델(atmosphere & terrain)이 있다. 레이더 설치 위치의 환경과 운용 시간에 따른 대기 환경을 모의하며, 레이더와 레이더, 레이더와 표적 사이의 전파 환경을 구성한다. 구성된 전파 환경은 다중경로, 회절, 가스 및 비에 따른 손실, 반

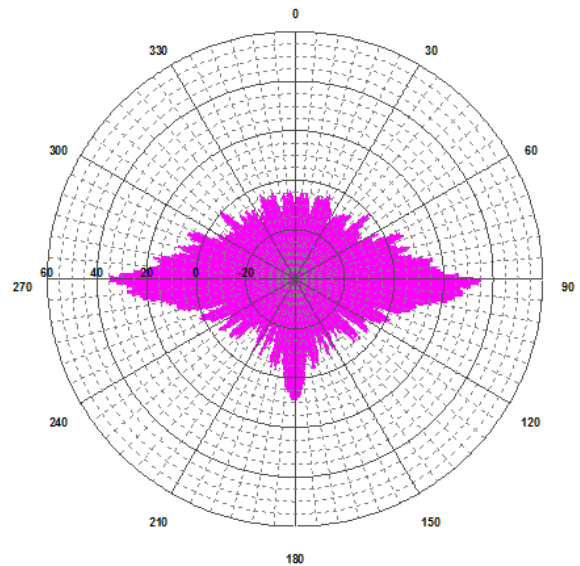


그림 3. 표적 RCS 데이터
 Fig. 3. The RCS data of target.

사계수, 지형 차폐 효과 등을 반영한다. 운용 환경 모델은 전파 환경과 빔 패턴, 운용 주파수 등 레이더 성능을 반영한 전파 손실을 계산한다^{[6][7]}.

2-2 레이더 및 간섭원 모델

레이더 모델은 타 레이더로부터 펄스형 간섭을 받는 환경에서 표적을 탐지하는 상황을 모의한다. 이때 구성된 하위 모델은 빔 방사를 관리하는 빔 운용모델과 레이더 회전을 모의하는 구동모델, 노이즈와 신호크기 및 간섭 크기를 계산하여 탐지 여부를 판단하는 탐지모델, 사용 주파수를 관리하는 주파수 운용모델로 구성되어 있다. 간섭원 모델은 레이더 모델에 펄스형 간섭을 주는 역할을 하며, 탐지모델을 제외한 레이더 모델과 동일한 하위 모델로 구성되어 있다.

2-2-1 빔 운용 및 구동모델

모의한 레이더는 위상배열 안테나를 사용한 레이더로 여러 빔을 정해진 고각에 순서대로 방사한다. 각 빔은 표적 탐지를 목적으로 하며, 방사 고각 및 탐지 거리에 따라서 다른 파형을 사용한다. 방사된 빔들은 각각의 서로 다른 운용 환경 속에서 표적 정보와 간섭 신호를 수신한다. 빔 운용 모델(*beam operation*)은 구성된 빔들을 레이더 운용 환경에 따라 공제선(*sky line*)을 분석하여 그에 맞게 조향각을 변경하여 방사한다.

레이더는 일정 RPM(*revolution per minute*)을 가지고 회전하면서 빔을 방사한다. 그림 4에서 SOP(*sort of pulse*)와 같이 빔의 가장 기본단위는 펄스이고, 펄스 사이의 간격을 PRI(*pulse repetition interval*)라 한다. 각 빔마다 서로 다른 PRI와 펄스 수를 가지며, 하나의 패턴에 방사되는 펄스들의 집합을 *burst*라 한다. 두 대의 레이더는 각각 정해진 서로 다른 빔 운용을 가지고 실시간 회전하면서 빔을

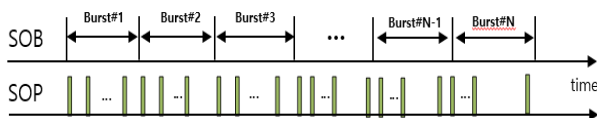


그림 4. 빔 방사 시간 개념

Fig. 4. The concept of beam scheduling.

연속적으로 방사한다. 이러한 연속성을 시뮬레이션을 통해 모의하기 위해 구동모델(*actuator*)은 빔의 최소 단위인 펄스보다 작은 크기의 간격으로 모사하여 연속성을 대체하였다.

2-2-2 주파수 운용 모델

주파수 운용 모델은 간섭 신호를 점검하고, 주파수를 운용(*freq. operator*)하는 역할을 한다. 다른 레이더로부터 전파간섭은 일정 크기로 계속 들어온다. 이때 *burst* 시작 전 간섭 등을 검사하는 시간을 가지는데, 이때 간섭이 검출되면 주파수를 바꿔 사용하게 된다. 식 (4)를 통해 피간섭원의 송신된 펄스 PRI에 수신된 간섭의 시간을 계산할 수 있다. 이때 $R/150$ 의 분모는 거리를 시간으로 환산하기 위한 상수이다. 피간섭원 SOP의 시간을 기준으로 간섭원의 펄스가 도달하는 시간을 계산하여 PRI내 간섭받은 펄스 영향성을 모의한다. 식 (5)를 통해 간섭 신호가 피간섭원의 송신 전 간섭 점검 시간에 검출됐는지를 판단할 수 있다. 이는 수신 레이더의 간섭 점검 시간 내에 간섭 레이더의 송신 중 펄스가 들어오는지 판단하는 것을 뜻한다. 만일 조건에 만족하는 간섭 펄스가 들어오면 주파수를 이격하여 사용하게 된다.

$$RT_j = SOP_R(i) + SOP_A(i) + R/150 \quad (4)$$

$$|(SOB_A(i-1) + PRI \times (N-1) + R/150) - (SOB_R(i))| \leq PLP \quad (5)$$

SOB_A : 간섭원 레이더의 *burst* 송신 시간 (μs)

SOB_R : 피간섭원 레이더의 *burst* 송신 시간 (μs)

SOP_A : 간섭원 레이더의 펄스 송신 시간 (μs)

SOP_R : 피간섭원 레이더의 펄스 송신 시간 (μs)

RT_j : PRI내 간섭 받은 시간 (μs)

PLP : 간섭 등의 점검시간 (μs)

R : 레이더 상호간 거리 (m)

N : 펄스 번호

i : 현재 계산 값

2-2-3 탐지판단 모델

탐지판단 모델(*detection*)은 *burst* 단위로 표적에 대한

정보를 생성하고, 펄스 단위로 전파간섭 환경을 구성한다. 식 (6)의 분자는 표적에 반사되어 수신된 크기를 나타내며, 분모는 간섭 레이더로부터 들어온 간섭 크기와 시스템 노이즈를 뜻한다. 표적 수신 크기는 레이더의 송신 크기, 안테나 이득, 펄스 폭, 레이더 반사 면적과 표적 위치에 따른 거리 및 전파 손실에 의해 계산된다. 간섭 크기는 간섭 및 피간섭 레이더의 송수신 주파수 대역폭의 겹침 정도에 따라 간섭 영향성을 계산하는 FDR , 간섭 레이더의 송신 크기, 안테나 이득, 대역폭, 레이더간 상호 거리에 의해 계산된다^{[8]~[10]}.

$$\frac{S}{J+N} = \frac{\frac{P_t G \sigma A_r \tau}{(4\pi)^2 R^4 L}}{\frac{(ERP) A_r}{4\pi R^2 B_f FDR} + k T_0}, \quad ERP = \frac{P_f G_f}{L_f} \quad (6)$$

$$FDR(\Delta f) = \frac{\int_0^\infty P(f) df}{\int_0^\infty P(f) |H(f+\Delta f)|^2 df} \quad (7)$$

P_f : 간섭 전력 크기 (W)
 P_t : 수신 레이더 송신 전력 크기 (W)
 G_f : 간섭 레이더 안테나 이득 (W/W)
 G : 수신 레이더 안테나 이득 (W/W)
 A_r : 안테나 유효면적 (m^2)
 τ : 펄스 길이 (μs) L, L_f : 손실 (W/W)
 σ : 표적 RCS (m^2) R : 거리 (m)
 B_f : 대역폭 (Hz) T_0 : 시스템 잡음 온도 (K)
 k : Boltzman's constant [$W/(Hz K)$]
 FDR : 주파수간 겹침 정도 (W/W)
 $P(f)$: 송신 신호 전력 스펙트럼 밀도
 $H(f)$: 수신기 주파수 응답

식 (6) 및 식 (7)을 통해 각각 계산된 간섭 및 잡음, 표적 신호는 CFAR 알고리즘을 통해 탐지 여부가 결정된다. 가장 기본적인 CA-CFAR는 그림 5와 같이 표적 셀을 기준으로 보호 셀 이후의 참조 셀들의 평균을 이용하여 잡음 크기를 계산하여 임계값을 정한다. 탐지 판단모델은 CA(cell averaging), Censored, SO(smallest-of), OS(order statistics), CM-CFAR(clutter map)^[11]으로 구성되어 있으며, 일

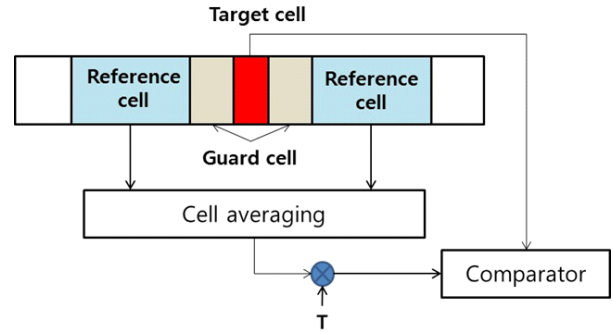


그림 5. CA-CFAR 알고리즘 개념도
 Fig. 5. The concept of CA-CFAR algorithm.

반적으로 신호 하나에 한 개의 알고리즘을 선택하여 사용하게 된다.

본 논문에서는 탐지성능 향상을 위해 신호 형태에 따라 기존 CFAR 알고리즘의 특성을 이용하여 하나의 신호에 여러 알고리즘을 사용하는 방법을 제안하였다. 그림 6과 같이 참조 셀 앞단에 신호 형태를 판단하는 셀 상태 결정(DCC: decision of cell condition) 셀을 추가하였다. DCC에서는 해당 DCC 셀의 신호 형태를 기준으로 어떤 알고리즘이 유리한지 판단하고, 그 해당 셀이 참조 셀에 들어오면 선택한 CFAR 알고리즘이 동작하여 표적 셀의 탐지판단을 수행한다.

이때 알고리즘 선택은 그림 7의 조건을 통해 판단한다. 기본적으로 CA-CFAR로 설정된 상태에서 신호가 만들어지면 DCC 셀에서 정해진 임계값(Th)과 비교하여 클 경

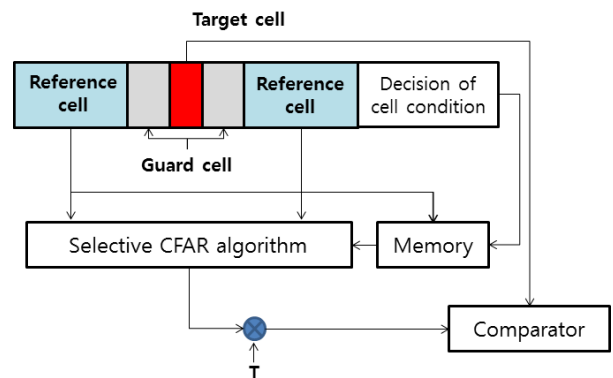


그림 6. DCC-CFAR 알고리즘 개념도
 Fig. 6. The concept of DCC-CFAR algorithm.

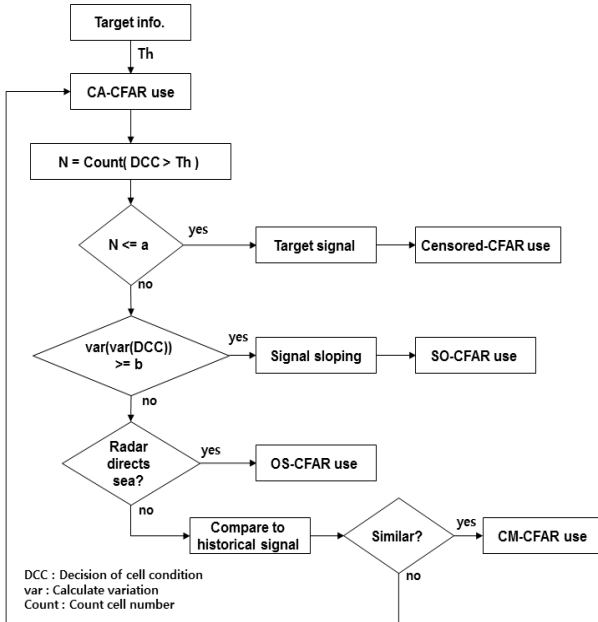


그림 7. DCC-CFAR 알고리즘 조건 순서도
Fig. 7. The flowchart of condition of DCC-CFAR algorithm.

우의 셀 수를 계산한다. 계산된 셀 수가 a 개 이하이면 표적들의 신호로 간주하여 CFAR-masking 현상에 강점을 가진 Censored-CFAR를 선택한다. a 개 이상일 경우, 환경 및 간섭 클러터 신호로 간주하여 신호 형태를 파악하기 위해 변화량의 기울기를 계산한다. 계산한 기울기와 설정 값(b)을 비교하여 SO-CFAR의 사용 여부를 결정한다. 기울기의 절대 값이 크다는 것은 좌우 참조의 평균 값 차이가 크다는 것을 의미하고, 이는 SO-CFAR를 통해 표적 신호를 검출하기 유리한 상황을 뜻한다. 만일 설정 값(b)보다 작으면 일반 잡음 또는 환경 클러터 신호로 판단하여 해상 및 고정(지형) 클러터일 경우, 각각 OS, CM-CFAR를 사용한다. 모든 조건에 만족하지 않으면 일반적인 잡음으로 판단하여 CA-CFAR를 사용한다. 이때 사용한 a, b 값은 운용 중인 레이다 대량의 측정 데이터를 이용하여 산출한 값으로 지속적인 데이터 누적을 통해 업데이트한다.

이러한 조건들을 통해 신호의 형태에 따라 실시간 판단으로 하나의 신호에 여러 알고리즘을 사용하여 탐지 성능을 향상시킬 수 있다. 만일 신호의 형태가 급변하여 선택한 좌우 참조 셀의 CFAR 알고리즘이 다를 경우 표 1과 같이 결정하도록 하였다.

표 1. 알고리즘 선택 테이블
Table 1. Algorithm selection table.

		Right reference cell			
Left reference cell	Algorithm	Censored	SO	OS	CM
	Censored	Censored	SO	Censored	CM
	SO	SO	SO	SO	CM
	OS	Censored	SO	OS	CM
	CM	CM	CM	CM	CM

2.3 모델 통합

본 논문에서 개발한 모델의 시퀀스는 그림 8과 같은 순서로 운용한다. 정해진 빔 템플릿에 따라 빔을 방사하다가 표적이 빔 폭 안에 들어오면(in-beam) 탐지 판단을 진행한다. 이때 상대 레이다의 구동 및 빔 상태에 의한 수신된 간섭 신호를 계산한다. 이때 환경 모델에서는 APM (APM: advanced propagation model)을 통해 빔 패턴 및 대기환경, 지형이 적용된 서로 다른 표적의 전파 손실과 레

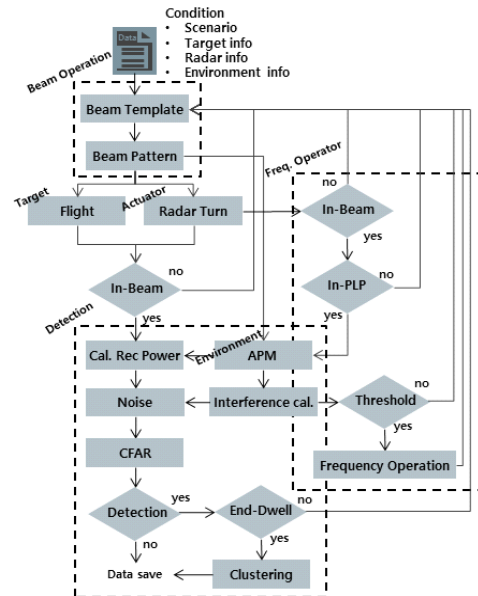


그림 8. M&S 모델 흐름도
Fig. 8. The flow diagram of M&S model.

이다 상호간 전파 손실을 제공한다^[6]. 간섭 신호가 점검 시간에 들어오고(In-PLP), 그 값이 임계값보다 크면 주파수 회피를 진행하여 운용한다. 최종 전파 간섭을 포함한 표적의 신호를 생성하면 선택된 CFAR 알고리즘에 따라 탐지판단을 진행한다. 펄스형 간섭 환경에서 임계값을 넘은 표적 신호들은 dwell이 종료되면 데이터처리 모델의 클러스터링 과정을 통해 최종 하나의 표적 신호가 된다. 계산된 표적 신호에는 실제 빔 운용 및 빔 패턴, 안테나 성능, 주파수 운용, 표적 기동 특성 등이 반영된 레이더의 성능과 레이더의 운용 위치 및 대기 특성이 포함되어 있다. 생성된 신호를 이용하여 펄스형 간섭의 영향성을 줄이기 위한 레이더 성능 변경에 따른 영향성을 예측 및 분석할 수 있다.

III. 시뮬레이션

본 논문에서는 펄스형 간섭 환경에서 표적에 대한 탐지 성능 변화를 모의하기 위해 그림 9와 같이 분석 개념을 설정하였다. 다 표적을 탐색하는 레이더를 기준으로 가시선이 확보된 떨어진 거리에 간섭 레이더를 설정하였다. 레이더 구동 상태의 경우, 상호 간 전파 영향성을 분석한 기존 연구의 시나리오를 기반으로 간섭 레이더의 주엽(main lobe)에 탐색 레이더가 인-빔 될 때 탐색 레이더의 주엽에 표적이 인-빔 되도록 설정하였다. 또한 주파수 운용의 경우, 간섭의 영향성을 덜 받는 섹터로 구분한 주파수로 운용하였다^[12].

그림 10은 통합된 M&S 도구의 결과로 100대의 표적 중 3대의 표적과 다른 레이더의 펄스형 간섭이 동시에 수

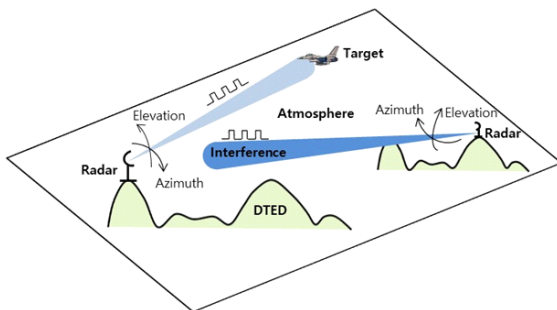


그림 9. M&S 모델 분석 시나리오 개념도
Fig. 9. The concept of M&S model analysis scenario.

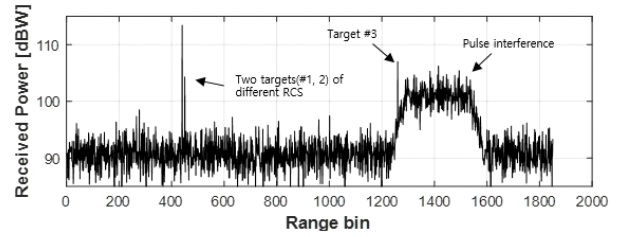
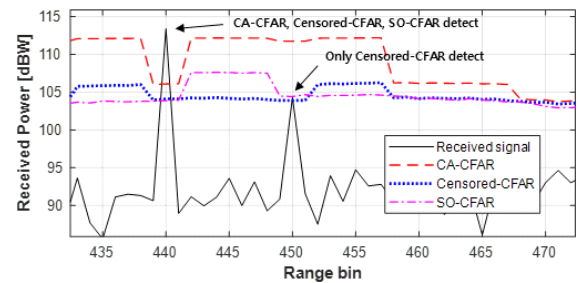


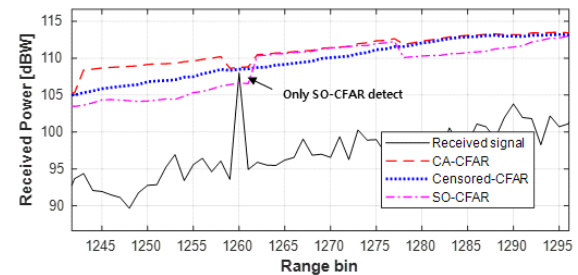
그림 10. M&S 도구 결과
Fig. 10. The result of M&S tool.

신된 신호이다. 신호에는 서로 다른 크기의 RCS를 가진 표적(#1, #2)이 근접해 있고, 펄스형 간섭 신호가 표적(#3) 근처에 수신된 것을 볼 수 있다. CFAR 알고리즘별 성능 비교를 위해 신호에 3개의 알고리즘을 적용하였다.

그 결과, 그림 11과 같이 1번 표적은 3개 알고리즘에 대해 모두 탐지하는 반면, 2번 및 3번 표적의 경우 각각 서로 다른 1개의 알고리즘으로만 탐지가 가능한 것을 볼 수 있다. 반면 본 논문에서 제안한 DCC-CFAR 알고리즘을 사용할 경우, 그림 12와 같이 3개의 표적 모두를 탐지



(a) 표적 1, 2번
(a) Target #1, 2



(b) 표적 3번
(b) Target #3

그림 11. 기존 CFAR 알고리즘별 탐지 결과
Fig. 11. The result of detection as existing CFAR algorithms.

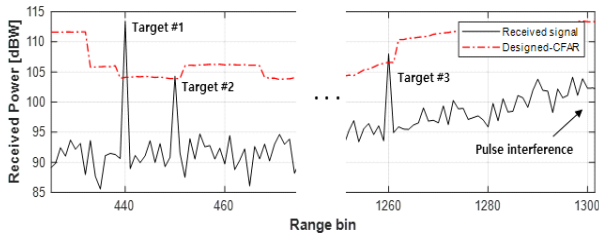


그림 12. 제안한 CFAR 알고리즘 탐지 결과
Fig. 12. The result of detection as proposed CFAR algorithm.

하는 것을 보였다. 일반적인 잡음 구간을 제외한 나머지 구간에서 조건에 의해 Censored와 SO-CFAR를 선택하여 인접한 표적 및 펄스형 간섭 환경에서 탐지 성능이 향상된 것을 볼 수 있었다.

표적을 탐지 못하는 경우는 hit를 생성하지 못하거나, hit 또는 detection 단계에서 클러스터로 처리되는 경우가 있다. 레이더의 탐지 성능을 향상하기 위해서는 우선 hit 생성을 하여 후보군을 많이 만드는 것이 있다. 이때 hit를 많이 생성하는 것은 그만큼 허위가 많이 발생하는 것을 뜻하지만, 이는 클러스터 처리 등을 통해 줄일 수 있다. 이러한 관점에서 어느 일정 수준의 hit를 더 많이 생성하는 CFAR 알고리즘을 선택하는 것이 탐지 성능 향상에 있어 유리하다.

실측과 모의 신호에 대해 다수의 스캔 데이터를 각 CFAR 알고리즘에 따라 hit 수를 측정해 보면 표 2와 같다. 실측 데이터의 경우, 각 셀이 표적인지 클러스터인지 알 수 없는 상태이므로 hit 수를 분석 척도로 정하였다. 모의 결과는 표적이 있는 셀을 알 수 있기 때문에 detection 단계까지 모의하여 그 수를 척도로 정하였다. 그 결과,

표 2. 알고리즘별 hit 및 detection 개수 결과
Table 2. Result of hit and detection number as algorithm.

Algorithm	Result of n scan	
	Test (hit)	Simulation (detection)
CA-CFAR	24,681	4,368
Censored-CFAR	38,867	5,864
SO-CFAR	95,603	5,164
OS-CFAR	24,865	4,420
CM-CFAR	-	-
DCC-CFAR	3,981	6,119

CFAR 알고리즘에 따른 hit 및 detection 수의 경향성이 동일하게 나타났다. CA와 OS는 비슷한 수준의 개수를 가지며, Censored의 경우, 증가한 결과를 가졌다. 반면 SO의 경우, 실측에서는 너무 많은 수의 hit가 생겼으며, 모의 결과는 다른 알고리즘에서 나타나지 않았던 허위가 생성되었다. CM의 경우, 레이더 설치 지형을 반영해야 하고, CM 생성 방식에 따라 결과가 달라져 분석에는 제외하였다. 본 논문에서 제시한 DCC-CFAR 알고리즘을 사용할 경우, 실측 데이터의 hit 수가 Censored-CFAR보다 약간 많은 수로 형성되었고, 모의 결과 표적의 탐지 성능이 향상된 것을 볼 수 있었다.

IV. 결 론

레이더 운용에 있어 성능을 저하시키는 원인은 환경에 의한 손실뿐만 아니라, 타 레이더의 간섭 신호 및 다른 표적 신호도 포함한다. 본 논문에서는 여러 성능 저하를 예측하고 분석하기 위해 레이더 운용 환경을 반영한 간섭 및 다 표적 신호를 생성하여 탐지 성능을 모의하였다. 표적 탐지에 있어 허위 수를 유지하는 개념인 CFAR 알고리즘을 사용하였다. 기존 CFAR 알고리즘을 사용할 시 인접 표적 신호 및 간섭 신호에 의한 불포착 경우가 발생하였다. 탐지 성능을 향상시키기 위해 새로운 알고리즘 방법을 제시하였다. 각 CFAR의 장점에 따라 분류하는 조건을 추가하여 참조 셀 이전에 신호 모양을 판단하여 하나의 펄스 신호에 n개의 알고리즘을 적용할 수 있도록 하였다. 그 결과, 기존 알고리즘에서 불포착된 표적들이 탐지되는 것을 보였다.

개발한 M&S 도구를 통해 실제 운용 중인 레이더의 환경(대기, 지형, 타 레이더 간섭 및 표적 등)을 반영한 신호를 모의하여 탐지 성능 저하를 예측하고 방지할 수 있다. 또한 가상의 레이더를 임의의 위치에 설치하여 운용 평가와 알고리즘 변경에 따른 성능 예측이 가능하다. 나아가 운용 환경을 반영한 해상 및 지형 클러스터를 포함한 신호 모의를 통해 허위를 발생시켜 더 현실적인 성능 평가를 할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] E. P. Lam, H. W. Birrell, and J. Magallon, "Performance

- prediction of firefinder radar using high fidelity simulation," in *2010 IEEE Radar Conference*, Washington, DC, 2010, pp. 48-53.
- [2] M. H. Park, H. S. Kim, W. J. Jeon, S. K. You, S. W. Kwon, and H. W. Moon, et al., "Development of modeling & simulation tool for long range radar considering operational environment in time domain," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 7, pp. 591-602, Jul. 2019.
- [3] T. Foreman, "A radar-to-radar interference prediction model," in *IEEE 1991 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Cherry Hill, NJ, 1991, pp. 200-205.
- [4] B. L. Stevens, F. L. Lewis, *Aircraft Control and Simulation*, New York, NY, A Wiley-Interscience Publication, 1992.
- [5] S. L. Johnston, "Target fluctuation models for radar system design and performance analysis: An overview of three papers," *IEEE Transactions on Aerospace And Electronic Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 696-697, Apr. 1997.
- [6] A. E. Barrios, W. L. Patterson, "Advanced propagation model(APM) Ver. 1.3.1 computer software configuration item(CSCI) documents," *Space and Naval Warfare Systems Center*, San Diego, CA, Tech. Doc. 3145, Aug. 2002.
- [7] A. E. Barrios, "Considerations in the development of the advanced propagation model(APM) for U.S Navy applications," in *2003 Proceedings of the International Conference on Radar*, Adelaide, SA, Sep. 2003, pp. 77-82.
- [8] Frequency and Distance Separations, *ITU-R SM.337-4*, 2007.
- [9] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd ed. New York, NY, McGraw-Hill, 2008.
- [10] M. H. Park, S. W. Kwon, W. J. Jeon, H. S. Kim, S. K. You, and K. W. Lee, "Analysis of radar interference using a modeling and simulation method," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 10, pp. 829-838, Oct. 2019.
- [11] M. A. Recharts, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, New York, NY, McGraw-Hill, 2005.
- [12] S. W. Kwon, Y. W. Kwon, and H. S. Kim, "Method and apparatus for selecting minimum interference frequency based on jamming detection with minimum time resource and statistical processing," Korea Patent 10-2018-0088718, 2018.

박 명 훈 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5217-0365>



2014년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
2016년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학석사)
2016년 1월~현재: LIG넥스원 SW연구소 선임연구원
[주 관심분야] 레이더, M&S, 안테나, 전파

전파 등

김 현 승 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4021-5914>



2014년 2월: 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
2016년 2월: 인하대학교 항공우주공학과 (공학석사)
2016년 1월~현재: LIG넥스원 SW연구소 선임연구원
[주 관심분야] 항공제어, M&S, 추적 알고리즘 등

리즘 등

전 우 중 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3974-0631>



2010년 7월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
2016년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
2016년 1월~현재: LIG넥스원 SW연구소 선임연구원
[주 관심분야] M&S, 레이더, 제어 등

이 기 원 [LIG 넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2545-7579>



2000년 2월: 충남대학교 전기공학과 (공학사)
2002년 8월: 충남대학교 전기공학과 (공학석사)
2002년 7월~현재: LIG 넥스원 레이더 연구소 수석연구원
[주 관심분야] 레이더 체계설계, 안테나, 신호처리 등

권 세 응 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8959-4452>



1999년 2월: 연세대학교 전파공학과 (공학사)
2002년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
2009년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2009년 7월~현재: LIG넥스원 레이더연구소 수석연구원

[주 관심분야] 능동위상배열레이더, 전파 전파 등