THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2017 Nov.; 28(11), 853～864.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2017.28.11.853
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

지상 클러터 환경에서 접근표적 감지를 위한 오경보율 감소기법 연구

Study on the False Alarm Rate Reduction Technique for Detecting Approaching Target above Ground

하종수 · 이한진 · 박영식 · 김봉준 · 최재현

Jong-Soo Ha · Han-Jin Lee · Young-Sik Park · Bong-Jun Kim · Jae-Hyun Choi

요 약

본 논문에서는 지상 클러터 환경에서 고속으로 접근하는 소형 표적을 정밀 감지하기 위한 오경보율 감소기법을 제안한다. CFAR 알고리즘은 균일한 잡음 환경에서는 효과적이지만, 클러터가 존재하는 비균일한 잡음 환경에서는 표적을 구별하기가 쉽지 않다. 특히 클러터 세기가 표적신호레벨과 큰 차이가 없을 때에는 높은 오경보율 때문에 표적을 정밀하게 감지하기가 어렵다. 이러한 어려움을 해결하기 위해 본 연구에서는 CFAR 알고리즘과 정합 처리, 이진누적기법에 기반한 오경보율 감소기법을 제안한다. 각 기법의 이론적 분석을 통해 매개변수를 연구하고, 시험결과를 제시함으로써 제안하는 연구의 타당성을 검증한다.

Abstract

This paper proposes a false alarm rate reduction technique for detection of small targets in a terrestrial environment. CFAR algorithm is useful in homogeneous background, but it is not easy to detect targets in non-homogeneous background. In particular, when the clutter power is not significantly different from the target signal, it is difficult to detect the target due to high false alarm rate. To solve these difficulties, this study presents the false alarm rate reduction technique based on CFAR algorithm, matched filter and binary integration technique. The parameters are studied through the theoretical analysis and the validity of the proposed study is examined by the test results.

Key words: False Alarm Rate, CFAR Algorithm, Binary Integration Technique

Ⅰ. 서 론

레이다가 표적을 감지하기 위해서는 수신된 표적신호를 배경으로부터 구별하고, 이를 표적으로 확인하는 과정이 필요하다. 이를 위해 레이다는 작은 표적반사신호를 동기 누적(coherent integration)하여 표적신호레벨 즉, SNR (Signal to Noise Ratio, 신호대잡음비)을 증가시킴으로써 잡음 레벨보다 큰 신호를 표적으로 구별하고, 이를 다시 비동기 누적(noncoherent integration)함으로써 전 단계에서 표적으로 구별된 신호를 표적으로 최종 판단한다[1],[2].

이 때 배경 잡음 레벨보다 큰 신호를 무조건 표적신호라고 판단하면 표적이 아닌 신호를 표적신호로 오인하여 오경보가 발생하는데, 이러한 오경보율을 일정하게 유지하기 위해 표적신호의 임계값을 잡음 레벨에 근거하여

국방과학연구소(Agency for Defense Development)
· Manuscript received August, 11, 2017 ; Revised September, 25, 2017 ; Accepted October, 23, 2017. (ID No. 20170811-078)
· Corresponding Author: Jae-Hyun Choi (e-mail: tang@add.re.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

결정하는 CFAR(Constant False Alarm Rate) 알고리즘이 연구되어왔다[3]~[6]. 이와 함께 동기 누적된 신호그룹을 비동기 누적하여 표적으로 최종 확인함으로써 오경보율을 줄이고, 표적탐지확률을 높일 수 있는데, N개의 신호그룹에서 M개 이상의 신호그룹이 표적으로 구별되면 표적으로 확인하는 기법으로서 이진누적기법이 연구되어왔다[7]~[9].

근거리 미사일/로켓 방어체계[10]에 사용되는 근접신관은 초소형 K-대역 레이다[11]인 RF(Radio Frequency) 근접센서가 표적을 감지하면 기폭신호를 인가하여 장전된 안전장전장치를 통해 기폭관과 연결관, 전폭관의 순차적 폭발로써 탄두를 폭발시킨다. 따라서 근접센서가 표적을 잘못 감지하면 탄두가 오폭되며, 반대로 위험 표적을 감지하지 못하면 접근하는 위협체를 무력화시키지 못하게 된다.

따라서 근접센서는 최적의 신호처리 알고리즘을 통해 표적을 감지함으로써 표적탐지확률을 높이고, 오경보율을 감소시킬 필요가 있다. 그런데 근접센서가 운용되는 지상 환경에는 수풀, 나무, 바위 등의 지상 클러터가 산재되어 있고, 근거리 미사일/로켓의 경우 일반적으로 지면에 밀착하여 접근하기 때문에, 근접센서는 강한 지상 클러터 환경에서 소형 표적을 감지해야 하는 어려움이 있다.

이와 같은 어려움을 해결하기 위해 본 논문에서는 지상 클러터 환경에서의 오경보율 감소기법을 연구한다. 이를 위해 근접센서에 수신되는 표적신호레벨과 클러터 레벨을 분석하고, 클러터에 강인한 CFAR 알고리즘을 설계한다. 이로부터 도출되는 표적탐지확률과 오경보율의 상관관계를 분석하고, 표적 정합 처리와 이진누적기법을 연구함으로써 오경보율 감소기법을 제안하고, 실 사격시험 결과를 통해 제안하는 연구의 타당성을 검증한다.

Ⅱ. 적용기법의 이론적 고찰

2-1 CFAR 알고리즘 개관

다양한 CFAR 알고리즘 중 CA(Cell Averaging)-CFAR 알고리즘과 OS(Ordered Statistics)-CFAR 알고리즘에 대해 검토한다. CA-CFAR 알고리즘은 균일한(homogeneous) 잡음 환경에서는 오경보율을 설계값대로 유지할 수 있지만, 비균일한(non-homogeneous) 잡음 환경에서는 매개변수의 설계 예측값을 벗어나는 강한 클러터에 취약하다. 반면에 OS-CFAR 알고리즘은 비균일한 잡음 환경에서도 비교적 표적을 잘 구별하지만 CA-CFAR 알고리즘에 비해 탐지손실이 크고 계산량이 많은 것으로 알려져 있다[3]~[6].

근거리 위협 표적의 RCS(Radar Cross Section) 확률모델을 Swerling case1으로 가정하면 표적신호의 PDF(Probability Density Function)인 $f(x)$는 식 (1)과 같이 지수분포 형태로 나타낼 수 있다[3],[4].

$$f(x)=\frac{1}{\lambda}e^{\left(\frac{-x}{\lambda}\right)}, \qquad x \geq 0 \tag{1}$$

위 식에서 x는 수신신호의 거리셀을 나타내는데, 각 거리셀은 통계적으로 독립이며 CFAR 알고리즘에서는 L개의 거리셀을 참조(reference)셀로 사용한다. Test 셀 x에 표적이 없을 경우(H_0) 균일 잡음 환경에서의 λ는 클러터+열잡음 전력을 나타내고, 식 (2)와 같이 μ로 표현할 수 있으며, test 셀 x에 표적이 존재하면(H_1) λ는 식 (2)와 같이 $\mu(1+S)$로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}\lambda &= \mu\,(no\ \ target),\ H_0\\ \lambda &= \mu(1+S)\ \ (target),\ H_1\end{aligned} \tag{2}$$

위 식에서 S는 표적신호의 SNR을 나타낸다. 이 때 비균일한 잡음 환경에서의 λ는 test 셀 x에 표적이 없을 경우 열잡음과 클러터를 각각 구분하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 C는 클러터의 CNR(Clutter to Noise Ratio, 클러터대잡음비)을 나타낸다.

$$\begin{aligned}\lambda &= \mu = \mu_0\ \ (thermal\ \ noise)\\ \lambda &= \mu = \mu_0(1+C)\ \ (clutter)\end{aligned} \tag{3}$$

오경보는 표적이 존재하지 않음에도 불구하고, test 셀 x의 신호 Y가 임계값 TZ보다 클 때 발생하며, 표적탐지는 표적이 존재할 때 test 셀 x의 신호 Y가 임계값 TZ보다 클 때 발생한다. T를 임계값을 결정하기 위한 scaling factor라고 하고, Y와 Z를 각각 확률변수라고 할 때 오경보율 P_{fa}와 표적탐지확률 P_d는 각각의 기댓값으로 나타

낼 수 있으며, 앞서 구한 표적신호의 PDF $f(x)$를 이용하여 식 (4), (5)와 같이 구할 수 있다[4]. 이 때 M_z는 확률변수 Z에 대한 적률생성함수(moment generating function)를 나타낸다.

$$P_{fa} = P(Y > TZ|H_0) = E_z\left[\int_{TZ}^{\infty} \frac{1}{\mu} e^{\left(\frac{-y}{\mu}\right)} dy\right] = E_z[e^{\left(\frac{-TZ}{\mu}\right)}] = M_z\left(\frac{T}{\mu}\right) \quad (4)$$

$$P_d = P(Y > TZ|H_1) = E_z\left[e^{\left(\frac{-TZ}{\mu(1+S)}\right)}\right] = M_z\left(\frac{T}{\mu(1+S)}\right) \quad (5)$$

2-2 CA-CFAR 알고리즘 매개변수 분석

CA-CFAR 알고리즘의 일반적인 개념을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 X_i는 참조셀, G는 guard 셀, Y는 test 셀의 값을 나타낸다.

CA-CFAR에서 전체 잡음전력 Z는 식 (6)과 같이 참조셀 L개의 합으로 나타내며 표적 여부를 결정하는 임계값은 scaling factor T와 Z의 곱 TZ로 나타낼 수 있다.

$$Z = \sum_{i=1}^{L} X_i \quad (6)$$

식 (6)에서 X_i로 표현되는 잡음전력 μ가 식 (1)과 같이 지수분포를 따를 때, 지수분포의 PDF $f(x)$의 지수밀도는 α=1을 만족하는 감마밀도의 특수한 경우이므로, 감마함수 $\Gamma(\alpha)$를 이용한 감마분포의 PDF $f(x)$는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} e^{\left(\frac{-x}{\beta}\right)} \beta^{-\alpha} x^{\alpha-1}, \quad x \geq 0,\ \alpha \geq 0,\ \beta \geq 0 \quad (7)$$

위 식에서 $\Gamma(\alpha)$는 α가 정수일 때 $\int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx$ 이므로 $f(x)$의 CDF(Cumulative Distribution Function)를 $G(\alpha, \beta)$라고 하면 확률변수 X~$G(\alpha, \beta)$일 때 X의 적률생성함수 M_X는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_X(t) = \int_0^{\infty} e^{tx} \frac{1}{\Gamma(\alpha)} e^{\left(\frac{-x}{\beta}\right)} \beta^{-\alpha} x^{\alpha-1} dx = (1-\beta t)^{-\alpha} \quad (8)$$

위로부터 확률변수 Z~$G(L, \mu)$일 때 오경보율 P_{fa}와 표적탐지확률 P_d는 식 (9), (10)과 같이 구할 수 있다.

$$P_{fa} = M_z\left(\frac{T}{\mu}\right) = \left(1 - \mu \times \left(-\frac{T}{\mu}\right)\right)^{-L} = (1+T)^{-L} \quad (9)$$

$$P_d = M_z\left(\frac{T}{\mu(1+S)}\right) = \left(1 + \frac{T}{(1+S)}\right)^{-L} \quad (10)$$

2-3 OS-CFAR 알고리즘 매개변수 분석

OS-CFAR 알고리즘의 일반적인 개념을 그림 2에 나타내었다. CA-CFAR 알고리즘이 참조셀의 전체 잡음전력 Z

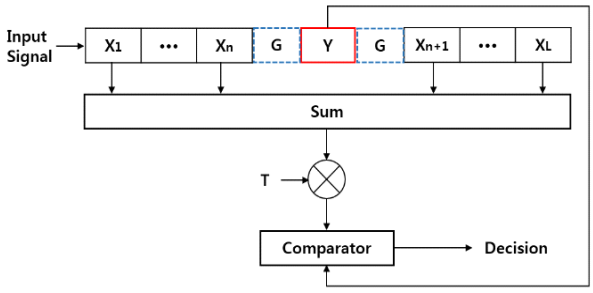

그림 1. CA-CFAR 알고리즘 개념
Fig. 1. The concept of CA-CFAR algorithm.

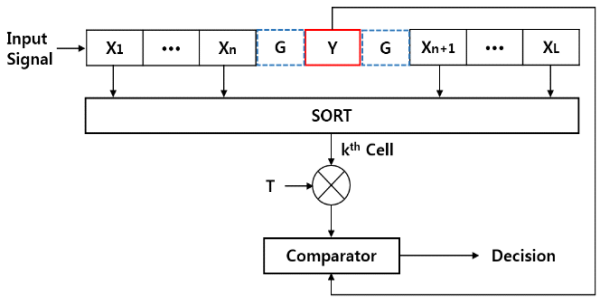

그림 2. OS-CFAR 알고리즘 개념
Fig. 2. The concept of OS-CFAR algorithm.

로부터 임계값 TZ를 결정하는 반면 OS-CFAR 알고리즘은 참조셀을 정렬시킨 다음 식 (11)과 같이 k번째 셀의 값 Z로부터 임계값 TZ를 결정한다.

$$Z = X_{(k)}, \quad (X_{(1)} \le X_{(2)} \le \ldots \le X_{(L)}) \tag{11}$$

Z에 대한 분포 $P(z \le Z \le z+dz)$는 $f(z)dz$이므로 다항분포 확률로 근사화하면 $X_{(k)}$의 PDF $f_k(z)$는 식 (12)와 같이 구할 수 있다[4].

$$f_k(z) \simeq k\binom{L}{k}[F(z)]^{k-1} f(z)[1-F(z)]^{L-k} \tag{12}$$

수신신호가 지수분포를 따를 때 식 (1)의 PDF $f(x)$는 일반적으로 식 (13)의 PDF $f(z)$와 CDF $F(z)$로 나타낼 수 있다[3].

$$f(z) = e^{\frac{-z}{\lambda}}, \quad F(z) = 1 - e^{\frac{-z}{\lambda}} \tag{13}$$

오경보율 P_{fa}는 표적이 아닌 Y_0가 임계값 TZ를 넘을 때 증가하고, 표적탐지확률 P_d는 표적신호 Y_1이 임계값 TZ를 넘을 때 증가하므로 확률변수 Z에 대한 오경보율 P_{fa}와 표적탐지확률 P_d는 식 (13)의 PDF와 CDF를 이용하여 식 (14), (15)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{fa} &= P(Y_0 > TZ|H_0) \\ &= \int_0^{\infty} P[Y_0 > Tz] f_k(z) dz \\ &= \prod_{i=0}^{k-1} (L-i)/(L-i+T) \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} P_d &= P(Y_1 > TZ|H_1) \\ &= \prod_{i=0}^{k-1} (L-i)/(L-i+T/(1+S)) \end{aligned} \tag{15}$$

2-4 위치 예측과 정합 처리 분석

위치 예측은 이전 정보로부터 현재의 위치를 예측하는 것으로 레이다 분야에서 표적 추적을 위해 일반적으로 사용하는 방법이다. 근접센서는 그림 3과 같이 CW(Continuous-Wave)와 FMCW(Frequency-Modulated CW)의 조합

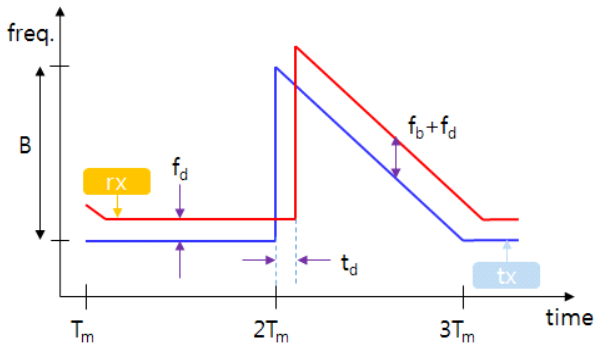

그림 3. 근접센서 송수신 파형
Fig. 3. Tx & Rx waveform of the proximity sensor.

을 송신파형(tx)으로 사용하는데, 수신파형(rx)과의 비교를 통해 비트주파수 f_b와 도플러주파수 f_d를 구하고, 식 (16), (17)과 같이 표적의 거리 정보 $r_m(n)$과 속도 정보 $v_m(n)$을 획득한다[11].

$$r_m(n) = \frac{cT_m}{2B} \times f_b \tag{16}$$

$$v_m(n) = \frac{f_d \lambda}{2} \tag{17}$$

위 식에서 $r_m(n)$[m]는 n번째 스캔에서 획득한 표적 거리, c[m/s]는 빛의 속도, T_m[sec]은 변조 시간, B[㎐]는 주파수 대역폭을 나타내며, $v_m(n)$[m/s]는 n번째 스캔에서 획득한 표적 속도, λ[m]는 파장을 나타낸다.

따라서 n번째 스캔에서의 예측 거리 $r_e(n)$은 이전 $n-1$번째 스캔에서 획득한 표적 거리 $r_m(n-1)$와 속도 $v_m(n-1)$로부터 스캔갱신시간 Δt를 이용하여 식 (18)과 같이 예측할 수 있다.

$$r_e(n) = r_m(n-1) + v_m(n-1) \times \Delta t \tag{18}$$

이로부터 획득 거리 $r_m(n)$과 예측 거리 $r_e(n)$의 차이가 식 (19)의 정합조건 ρ 보다 작을 때 해당 획득 정보는 표적으로 처리되며, 그렇지 않을 경우에는 표적이 아닌 것으로 처리된다.

$$|r_e(n) - r_m(n)| \le \rho \tag{19}$$

이 때 정합조건 ρ를 크게 설정하면 실표적신호가 정합 처리될 확률 P_m을 1에 가깝게 설계할 수 있지만, 이 경우 CFAR 임계값을 초과하는 클러터나 잡음 신호 또한 위 정합조건을 만족할 가능성이 높아지므로, 정합조건 ρ에 따른 비표적신호의 발생확률을 따로 분석할 필요가 있다.

즉, 신호발생에 관한 PDF $f(x)$가 균일분포(uniform distribution)를 따른다고 할 때 표적탐지구간의 길이가 A라면 CDF $F(x)$는 $2\rho/A$가 되며, D개 발생한 비표적신호가 정합 처리될 확률 P_m은 이항분포(binomial distribution) 공식에 따라 $1-(1-2\rho/A)^D$가 된다. 따라서 비표적신호의 오경보율 P_{fa-m}은 위치 예측과 정합 처리를 통해 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{fa-m} = P_m \times P_{fa} = (1-(1-2\rho/A)^D) \times P_{fa} \tag{20}$$

2-5 이진누적기법 분석

M of N 이진누적기법은 B개의 펄스가 동기 누적되는 1신호그룹을 1스캔이라고 할 때, N개의 스캔 중 임계값을 초과하는 스캔이 M개 이상일 경우 표적으로 확인하는 비동기 누적기법이다. 1개 스캔이 임계값을 넘을 확률을 p라고 할 때 N개의 스캔 중 k개 스캔이 임계값을 넘을 확률 $P(k)$는 이항분포 공식에 따라 식 (21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(k) = \binom{N}{k} p^k (1-p)^{N-k} \tag{21}$$

따라서 정합 처리된 오경보율 P_{fa-m}과 표적탐지확률 P_{d-m}에 대해 M of N 이진누적기법을 적용하면 표적으로 최종 판단하는 확률은 오표적일 때의 최종 오경보율 P_{hit-fa}와 실표적일 때의 최종 탐지확률 P_{hit-d}로 각각 식 (22) 및 식 (23)과 같이 구할 수 있다[7].

$$\begin{aligned} P_{hit-fa} &= P(k \geq M | H_0) = \sum_{k=M}^{N} P(k) \\ &= \sum_{k=M}^{N} \binom{N}{k} P_{fa-m}^k (1-P_{fa-m})^{N-k} \end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned} P_{hit-d} &= P(k \geq M | H_1) \\ &= \sum_{k=M}^{N} \binom{N}{k} P_{d-m}^k (1-P_{d-m})^{N-k} \end{aligned} \tag{23}$$

이진누적기법의 최적 탐지성능을 얻기 위해서는 위 식에서 P_{hit-fa}는 줄이고, P_{hit-d}는 높여야 하는데, 이를 위해 오경보율과 표적탐지확률, 그리고 이들 관계로부터 요구되는 SNR 등 매개변수를 최적으로 선정하기 위한 연구들이 수행되어왔다[7]~[9].

본 연구에서는 CFAR 알고리즘의 매개변수를 분석하여 최적의 P_{fa}와 P_d를 도출하고, 이를 기반으로 신호를 정합 처리함으로써 P_{fa-m}와 P_{d-m}을 도출하고, 이진누적기법의 N과 M을 최적 선정하여 강한 지상 클러터 환경에서의 오경보율을 감소시키고자 한다.

Ⅲ. 오경보율 감소기법 연구

3-1 제안하는 기법의 기본 개념

본 연구에서 근접센서는 근거리에서 발사되어, 지면에 밀착하여 고속으로 접근하는 소형 표적을 수초 이내의 매우 짧은 시간 내에 감지해야 한다. 이 때 소형 표적의 SNR은 일정 거리 내로 접근하여도 지상 클러터 환경에서의 CNR보다 반드시 크다고 할 수는 없기 때문에 1스캔 내의 정보만으로는 표적을 탐지하기가 쉽지 않다. 따라서 1스캔 내에서 표적 후보군을 추출하고, 스캔 간 표적 정보의 정합처리를 통해 표적을 판단할 필요가 있다.

이를 위해 먼저 최적의 CFAR 알고리즘을 연구하여, 1스캔의 수신신호에 대해 열잡음 및 지상 클러터 성분으로부터 표적 후보군을 추출함으로써 그 거리 및 속도 정보를 구한다. 이 때 접근하는 표적은 열잡음 및 지상 클러터와는 달리 속도 정보를 가지므로 표적 발생 여부는 속도 정보를 기준으로 판단한다.

그리고 다음 스캔의 수신신호에서 CFAR 알고리즘의 임계값을 초과한 신호 중 식 (19)의 정합조건을 만족하는 신호를 표적으로 판별함으로써 비표적신호를 1차적으로 차단하고, 표적으로 판별된 스캔 수가 M of N 이진누적 조건을 만족할 때 해당 신호를 최종적으로 표적으로 확인함으로써 제안하는 기법은 오경보율을 감소시키고자 한

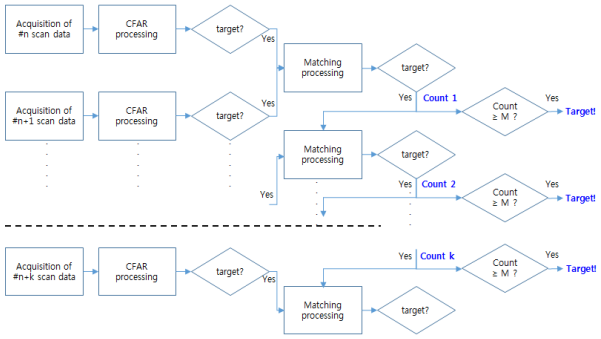

그림 4. 제안하는 기법의 블록도
Fig. 4. The block diagram of the proposed method.

다. 그림 4에 제안하는 기법의 블록도를 도시하였다.

3-2 균일 환경에서의 CFAR 알고리즘 적용 연구

1스캔 내 정보 중 유효 표적 후보군을 추출하기 위해 최적의 CFAR 알고리즘을 적용할 필요가 있다. 일반적으로 CA-CFAR 알고리즘은 정렬과정이 없으므로 OS-CFAR 알고리즘보다 처리속도가 빠르고, ADT(Average Detection Threshold) 레벨도 낮지만, 다중 표적 또는 강한 클러터 환경에서는 OS-CFAR 알고리즘이 CA-CFAR 알고리즘보다 더 강인한 것으로 알려져 있다[3],[4].

그림 5와 같은 지상 환경에서 근접센서[1]에 대전차 로켓을 발사하여 표적 감지 시험을 수행하였다. 지상 클러터 환경에서 접근하는 표적을 감지하기 위해 대전차 로켓을 약 1.5 m 높이에서 발사하여 약 3 m 높이에 탄착되도록 시험하였다. 발사 거리는 약 X+80 m로(그림 6의 X

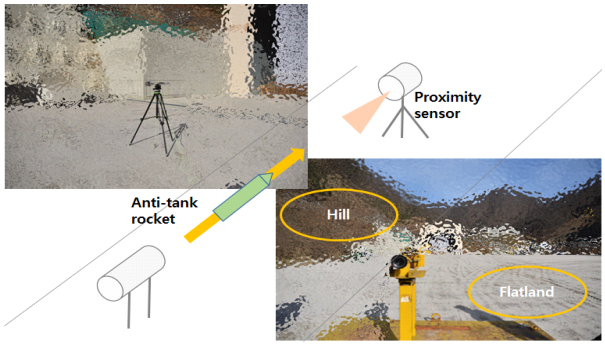

그림 5. 표적 감지 시험
Fig. 5. The target sensing test.

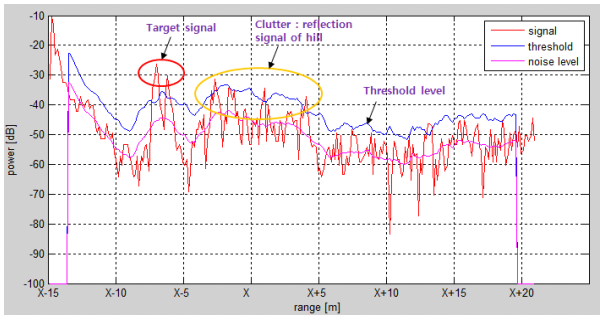

그림 6. CA-CFAR 알고리즘 적용 결과(균일 환경)
Fig. 6. The result of CA-CFAR algorithm(homogeneous environment).

기준) 설정하였으며, 고속카메라를 이용하여 대전차 로켓이 근접센서를 지나가는 순간을 촬영할 수 있도록 시험장을 구성하였다.

그림 5에서 시험장 지면은 평평한 운동장처럼 평지로 조성되어 있으므로 잡음 환경이 전반적으로 균일하다고 할 수 있다. 다만 근접센서의 측면 감지범위 내에 있는 일부 언덕 구간에서는 수목과 바위 같은 강한 지상 클러터 성분이 분포되어 있다.

일반적으로 레이다에서는 CFAR 알고리즘 설계 시 오경보율 P_{fa}를 10^{-6} 수준으로 매우 낮게 설계하는데, 앞서 기술한 바와 같이 소형 표적의 SNR은 지상 클러터의 CNR보다 반드시 크다고 보장할 수 없기 때문에, 본 연구에서는 CFAR 알고리즘 설계 시 P_d를 높이기 위해 P_{fa}를 다소 높게 설정한다.

일례로 식 (9)에서 P_{fa}=10^{-3}이라는 임의의 값으로 가정하기 위해 L=16과 같이 매개변수를 설계하면 식 (10)에서 표적신호레벨 S가 11 dB 수준일 때 P_d=0.5를 충족할 수 있다. 그림 6에 위 시험에서 획득한 신호에 대해 CA-CFAR 알고리즘을 적용한 결과를 도시하였다.

그림 6에서 수신신호레벨(붉은색 선)과 CA-CFAR 알고리즘의 임계값(푸른색 선)을 보면 균일한 잡음 환경에서 약 X-7.5 m 거리의 표적(붉은색 원)을 잘 감지하고 있음을 알 수 있다.

3-3 비균일 환경에서의 CFAR 알고리즘 적용 연구

그림 7과 같은 야전 환경에서 근접센서와 대전차 로켓

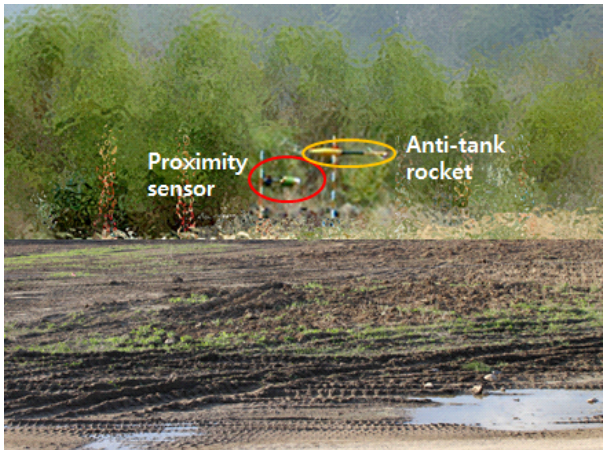

그림 7. 근접센서 교전 시험
Fig. 7. The engagement test of the proximity sensor.

을 서로 교차 발사하여 교전 시험을 수행하였다. 대전차 로켓의 발사 조건은 그림 5와 동일하며, 근접센서는 대전차 로켓과 교전 시 약 1.9±0.5 m의 높이를 유지하도록 교차 발사되었다.

위 시험 데이터에 그림 6에 적용되었던 CA-CFAR 알고리즘을 적용한 결과를 그림 8에 나타내었다.

그림 8에서 그림 5의 균일 환경 대비 클러터 레벨이 상승하면서 표적 SNR이 상대적으로 줄었고, 그 결과 약 X-6 m 거리의 표적(붉은색 원)이 임계값(푸른색 선)보다 작아 탐지되지 않음을 알 수 있다. 실제로 그림 6에서는 약 X-7.5 m 거리의 표적 SNR이 잡음레벨(−50~−60 dB 추정) 대비 약 20 dB 이상임을 알 수 있다. 그런데 언덕에 반사되어 유입된 클러터의 CNR(약 X-4~X+5 m) 또한 약

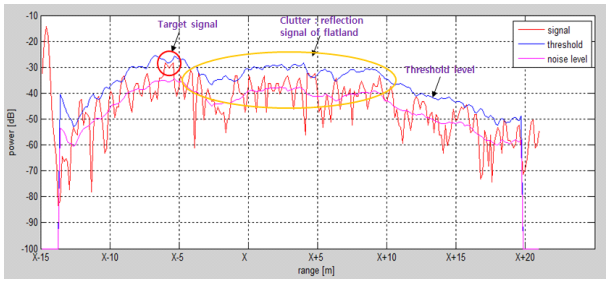

그림 8. CA-CFAR 알고리즘 적용 결과(비균일 환경)
Fig. 8. The result of CA-CFAR algorithm(non-homogeneous environment).

10~20 dB 수준으로 이러한 현상은 그림 8에서도 재현되고 있는 것으로 판단된다.

즉, 그림 8에서 약 X-6m 거리의 표적신호레벨의 경우 −30 dB로 그림 6의 표적신호레벨과 큰 차이가 없으나, 그림 7에서 예상되는 바와 같이 상당한 양의 지면클러터가 유입되면서 그림 8에서는 표적 SNR이 상대적으로 약 10 dB 수준(−40 dB 대비)으로 감소한 것으로 판단된다. 여기에 −30~−40 dB 사이의 지면 클러터가 상당수 유입되면서 CA-CFAR 알고리즘으로는 표적과 클러터를 구별하기가 용이하지 않음을 알 수 있다.

이 때 2-2절의 매개변수 분석과 무관하게 scaling factor T를 임의의 경험값으로 조정하면 그림 8의 표적신호를 감지할 수도 있지만, 이전 프레임들부터 오경보가 다수 발생하여 오표적을 추적하거나, T의 조정값에 따라 표적을 탐지하지 못하는 등의 문제가 발생하였다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 OS-CFAR 알고리즘 적용을 연구하였다. OS-CFAR 알고리즘은 참조값들의 정렬하는 과정이 필요하기 때문에, 처리속도는 느리지만 식 (14) 및 식 (15)의 각 매개변수의 설계에 따라 다중 표적과 클러터에 강인한 알고리즘 설계가 가능한 장점이 있다. 이 때 k는 L/2와 3L/4 사이에서 탐지손실이 최소가 되는 것으로 알려져 있으며, test 셀과 guard 셀을 참조 셀에 포함시켜도 성능에는 크게 영향이 없는 것으로 알려져 있다[3].

다만 OS-CFAR 알고리즘 설계 시 균일한 열잡음 외에 비균일한 잡음 즉, 클러터의 CNR도 고려할 필요가 있으므로 식 (14)에 식 (15)처럼 SNR S 대신에 CNR C를 반영하여 식 (24)와 같이 지상 클러터 성분에 의한 오경보율 P_{fa-C}를 계산할 필요가 있다.

$$P_{fa-C} = P(Y_0 > TZ|H_0) = \prod_{i=0}^{k-1}(L-i)/(L-i+T/(1+C)) \quad (24)$$

표적 SNR은 레이다 수신전력 식 (25)에 따라 거리의 4제곱에 반비례하므로 표적이 가까워질수록 표적탐지확률 P_d는 점점 증가할 것으로 예측할 수 있다. 식 (25)에서 P_t[W]는 송신전력, G_t[dBi]는 송신 안테나 이득, G_r[dBi]는 수신 안테나 이득, λ[m]는 파장, σ[m^2]는 표적

RCS, R[m]은 표적까지의 거리를 나타낸다.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \tag{25}$$

스캔갱신시간 Δt 동안 표적거리 R_{scan}은 표적상대속도 v_t에 따라 1스캔마다 $v_t \Delta t$만큼 감소하므로 표적 SNR은 R_{scan}^4 만큼 상대적으로 증가하게 된다. 따라서 표적탐지구간에서 근접센서와 대전차 로켓이 조우하기까지 표적 SNR은 그림 9와 같이 증가하게 된다.

그림 9에서, 표적이 탐지될 것으로 기대되는 구간(붉은색 사각형)에서 표적 SNR은 표적이 접근하면서 약 12 dB 정도 증가될 것으로 예측된다. 반면, 일정한 이격거리를 갖고 정면에서 접근하는 표적이 근접센서 안테나의 반전력 빔폭[11] 또는 6 dB 빔폭을 벗어날 것으로 예측되는 구간(노란색 사각형)에서 표적 SNR은 약 20 dB 정도 증가할 것으로 보임에도 불구하고, 안테나 이득 감소로 인해 SNR 증가가 크지 않거나, 더 근접한 표적의 경우 그 신호가 소실될 것으로 판단된다.

그림 9의 반전력 빔폭 감소구간(노란색 사각형)에서 표적이 소실되지 않고 표적탐지 기대구간(붉은색 사각형)에서의 표적 SNR이 최대값을 갖는다고 가정하고, 표적탐지 기대구간에서의 표적 SNR의 최소값과 클러터의 CNR을 임의의 값으로 가정할 때, OS-CFAR 알고리즘의 매개변수 k를 L/2와 3L/4 사이의 임의의 값으로 설계하면 오경보율 P_{fa}와 표적탐지확률 P_d, 그리고 지상 클러터 성분에 의한 오경보율 P_{fa-C}는 각각 식 (14), (15), (24)에 따라 약 0.04, 0.71~0.84, 0.62가 된다. 그림 10에 표적탐지확률 P_d를 도시하였다.

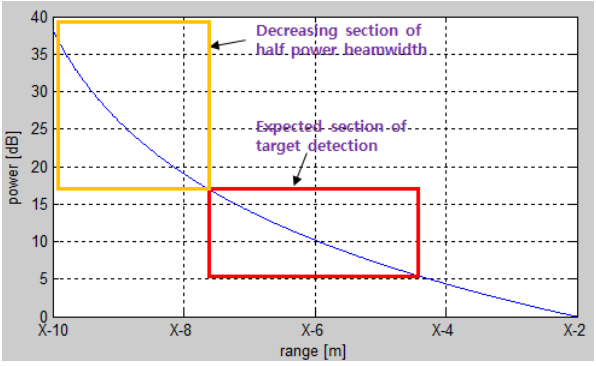

그림 9. 표적 거리에 따른 표적 SNR
Fig. 9. The target SNR with its distance.

이상과 같은 분석을 기반으로 그림 8에서 표적 SNR과 클러터 CNR을 추정하고, P_{fa}와 P_d, 그리고 P_{fa-C}를 고려하여 OS-CFAR 알고리즘의 매개변수 k를 설정함으로써 OS-CFAR 알고리즘을 설계하였다. 그림 7의 교전시험에서 획득한 데이터에 OS-CFAR 알고리즘을 적용한 결과를 그림 11에 나타내었다.

그림 11에서 수신신호레벨(붉은색 선)과 OS-CFAR 알고리즘의 임계값(푸른색 선)을 보면 다수의 클러터가 발생하는 비균일한 잡음 환경임에도 불구하고, 약 X-6m 거리의 표적(붉은색 원)을 감지하고 있음을 확인할 수 있다. 위 그림에 적용한 OS-CFAR 알고리즘의 P_{fa}, P_d값이 그림 8에 적용된 CA-CFAR 알고리즘의 P_{fa}, P_d값과 유사하게 설계되었음을 감안할 때, 비균일한 잡음 환경에서는

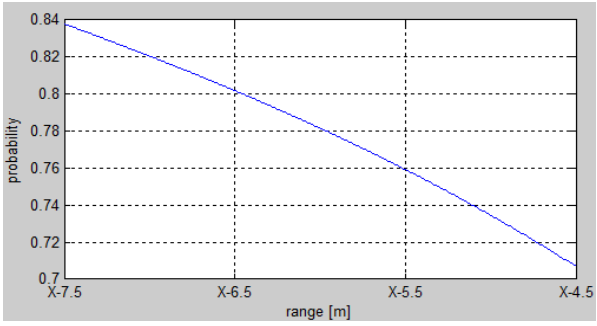

그림 10. 표적 거리에 따른 표적탐지확률
Fig. 10. The probability of detecting target with its distance.

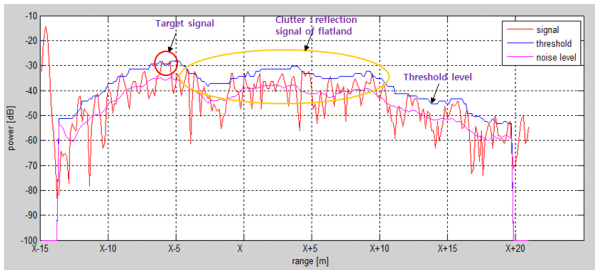

그림 11. OS-CFAR 알고리즘 적용 결과(비균일 환경)
Fig. 11. The result of OS-CFAR algorithm(non-homogeneous environment).

OS-CFAR 알고리즘이 CA-CFAR 알고리즘보다 안정적으로 동작함을 확인할 수 있다.

3-4 정합 처리 적용 연구

앞선 그림 11에서 OS-CFAR 알고리즘의 임계값(푸른색 선)보다 큰 수신신호 레벨(붉은색 선)을 보면 비균일한 잡음 환경에서 지상 클러터로 인한 오표적이 다수 발생하고 있으며, 그 레벨 또한 X-6 m 거리의 표적신호(붉은색 원)와 비교할 때 작지 않음을 알 수 있다.

그림 11에서 소형 표적의 탐지확률을 0.7~0.8 사이로 유지하기 위해 OS-CFAR 알고리즘의 매개변수를 설계하면, 표적신호와 크기가 비슷한(또는 약간 작은) 클러터 세기 때문에 오경보율 P_{fa-C}는 0.6에 달하게 된다. 이는 실표적과 오표적의 크기가 유사하기 때문에 발생하는 근본적인 문제로서 단순히 CFAR 알고리즘만으로 해결될 문제는 아니다.

이 때문에 본 연구에서는 표적 위치 예측 및 정합 처리를 추가하여 오경보율을 감소시킨다. 이를 위해 먼저 근접센서의 스캔갱신시간 Δt, 속도오차 σ_v, 거리오차 σ_r로부터 합산거리오차 σ_s를 식 (26)과 같이 계산한다.

$$\sigma_s = \sqrt{(\sigma_v \Delta t)^2 + \sigma_r^2} \tag{26}$$

위 식으로부터 정합조건 ρ가 $3\sigma_s$일 때 해당신호를 정합 처리하면 실표적신호가 정합 처리될 확률 P_m은 0.95가 된다. 그리고 식 (20)으로부터 길이가 A인 표적탐지구간에서 비표적신호가 정합 처리될 확률 P_m은 설계값에 따라 약 0.26이 된다.

따라서 정합 처리된 실표적신호의 탐지확률 P_{d-m}과 비표적신호의 오경보율 P_{fa-m}, P_{fa-C-m}은 각각 0.01, 0.68~0.8, 0.16이 되어 앞서 OS-CFAR 처리된 신호에 비해 표적탐지확률은 약간 감소하지만, 지상 클러터의 오경보율을 상당 부분 감소시킬 수 있다.

3-5 이진누적기법 적용 및 시험결과 분석

일반적으로 레이다에서는 M of N 이진누적기법 설계 시 2 of 3, 2 of 4, 3 of 8과 같이 매개변수 M과 N을 설계함으로써 실표적일 때의 최종 판단확률 P_{hit-d}를 증가시킨다. 이 때 오경보율 P_{fa}는 일반적으로 10^{-6} 수준으로 매우 낮게 설계되기 때문에 M of N 이진누적기법 처리를 하더라도 오표적일 때의 최종 오경보율 P_{hit-fa}의 증가량은 제한적이다.

그런데 근접센서의 경우 P_{fa}는 약 0.01이지만 P_{fa-C}는 약 0.16이므로 M of N 값을 3 of 8과 같이 설계할 경우, 클러터로 인한 최종 오경보율 $P_{hit-fa-C}$는 약 0.37 정도로 다소 높게 도출되므로 최종 오경보율을 감소시키기 위해서는 매개변수 M과 N을 다소 엄격하게 설정할 필요가 있다. 일례로 M of N 값을 2 of 3이라고 한다면 식 (22), (23)에 의해 P_{hit-fa}는 약 3×10^{-4}, P_{hit-d}는 약 0.76~0.9가 되며, 추가적으로 $P_{hit-fa-C}$는 약 0.07이 된다. 표 1에 M of N 값이 각각 2 of 4, 2 of 3, 3 of 4일 때 P_{hit-fa}, P_{hit-d}, $P_{hit-fa-C}$를 정리하였다.

표 1의 결과로부터 M of N 값이 2 of 4이면 약 0.9~0.97 사이의 높은 표적탐지확률을 얻을 수 있으나, 임의의 값으로 가정된 CNR에 따라 지상 클러터에 의한 오경보율은 약 0.12 정도로 감소됨을 확인할 수 있다. 반면에 M of N 값이 3 of 4이면 지상 클러터에 의한 오경보율을 약 0.014까지 줄일 수 있지만, 표적탐지확률 또한 약 0.62~0.82 사이의 값으로 감소하게 됨을 알 수 있다.

본 연구에서는 M of N 값을 임의의 값이 아닌 실제 클러터의 CNR에 따라 허용 가능한 표적탐지확률과 오경보율을 고려하여 결정할 필요가 있으므로, 그림 7의 시험 데이터와 표 1의 이진누적기법 적용결과를 바탕으로 M of N 값을 설계하였다. 그림 7의 교전시험에서 획득한 시험 데이터에 대해 CA-CFAR 알고리즘을 기반으로 정합 처리 및 이진누적기법을 적용한 결과와 OS-CFAR 알고리

표 1. 이진누적기법 적용결과
Table 1. Result of binary integration technique.

M of N / Probability	2 of 4	2 of 3	3 of 4
P_{hit-fa}	5.9×10^{-4}	3×10^{-4}	4×10^{-6}
P_{hit-d}	0.9~0.97	0.76~0.9	0.62~0.82
$P_{hit-fa-C}$	0.12	0.07	0.014

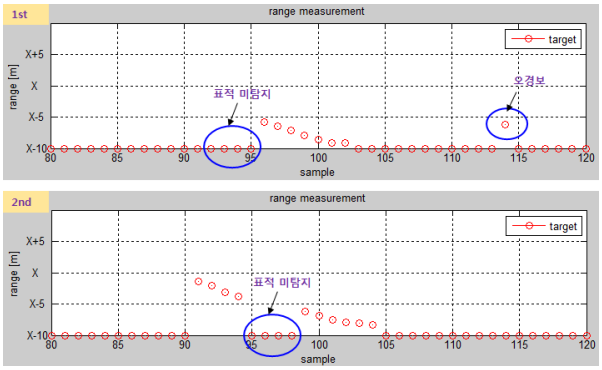

그림 12. CA-CFAR 알고리즘 기반의 표적탐지결과
Fig. 12. The result of detecting target based on CA-CFAR algorithm.

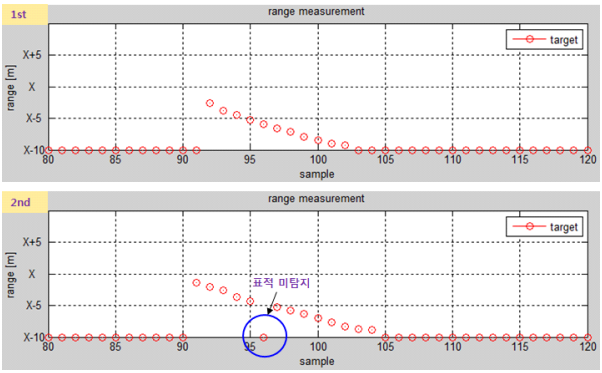

그림 13. 제안하는 기법의 표적탐지결과
Fig. 13. The result of detecting target using the proposed method.

즘 기반의 제안하는 기법을 적용한 표적탐지결과를 그림 12와 그림 13에 각각 나타내었다.

그림 12 및 그림 13에서 상단과 하단의 그래프는 2회의 교전시험결과를 각각 나타낸 그림이다. 수신신호레벨을 분석한 결과, 1회차 시험에 비해 2회차 시험 때 잡음 레벨 및 클러터 세기가 수 dB 더 강했으며, 그 결과 표적 SNR이 상대적으로 다소 감소하였다.

1회차 시험에서는 CA-CFAR 알고리즘 기반으로 처리하면 그림 12에서 X-5 m 이상의 표적은 탐지하지 못하고, 114번째 샘플에서 오경보가 발생하는 등의 결과가 발생했으나, 제안하는 기법의 경우 그림 13에서 일정 SNR 이상의 표적신호를 약 X-2 m부터 100 % 탐지하고, 오경보도 발생하지 않았음을 확인할 수 있다.

2회차 시험에서는 CA-CFAR 알고리즘 기반으로 처리하면 그림 12에서 95~98번째 샘플에서 표적을 탐지하지 못했으나, 제안하는 기법의 경우 그림 13에서 13스캔 중 96번째 표적만 탐지하지 못하였음을 확인할 수 있다. 이 경우 1스캔 정도의 표적소실은 별도의 표적 추적알고리즘을 통해 해결 가능한 수준으로 판단된다. 따라서 비균일한 잡음 환경에서 CA-CFAR 알고리즘을 기반으로 표적을 탐지하는 것보다는 OS-CFAR 알고리즘을 기반으로 제안하는 기법을 적용하는 것이 더 안정적임을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 그림 7의 교전시험 횟수가 많지 않아 통계적으로 신뢰도가 높은 오경보율을 산출하기는 쉽지 않지만, 표 1에서 보듯이 클러터에 의한 최종 오경보율은 M of N 값에 따라 최소 0.014에서 최대 0.12 사이의 값을 가질 것으로 기대되고, 그림 13의 시험결과에서도 높은 표적탐지확률과 함께 지상 클러터에 의한 오경보는 발생하지 않은 점을 감안할 때, 제안하는 오경보율 감소기법은 강한 지상 클러터 환경에서 유효하게 동작하는 것으로 판단된다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 지면에 밀착하여 고속으로 접근하는 소형 표적을 강한 지상 클러터로부터 구별하여 감지하기 위해 RF 근접센서에 적용 가능한 오경보율 감소기법을 연구하였다. 이를 위해 CFAR 알고리즘과 정합 처리, 이진누적기법에 대해 이론적으로 고찰하고, 지상 클러터 환경에서의 매개변수 및 주요 확률을 분석하여 이를 기반으로 접근표적 감지를 위한 오경보율 감소기법을 제안하였다.

CFAR 알고리즘 중 CA-CFAR 알고리즘과 OS-CFAR 알고리즘을 분석하고, 교전시험결과를 바탕으로 적용 가능한 수준의 오경보율과 표적탐지확률을 연구하였으며, 일반적인 잡음에 의한 오경보율 분석 외에 지상 클러터에 의한 오경보율도 분석하여 CFAR 알고리즘의 매개변수를 설계하였다.

소형 표적신호와 크기가 유사한 지상 클러터에 의한 오경보율을 감소시키기 위해 표적 속도 및 거리 정보에 기

반한 정합 처리를 연구하고, RF 근접센서의 속도 및 거리 오차에 기반한 정합조건을 설정함으로써 정합 처리 후 오경보율과 표적탐지확률을 도출하였다.

그런 다음 M of N 이진누적기법을 설계하고, 앞서 도출한 값을 적용하여 제안하는 기법의 최종 오경보율 및 표적탐지확률을 분석하였으며, 실제 시험데이터에 제안하는 기법을 적용하여 표적탐지결과 및 오경보 발생결과를 확인함으로써 제안하는 기법의 타당성을 검증하였다.

향후 연구에서는 제안하는 기법을 적용한 표적탐지결과에 대해 표적을 정밀하게 추적하기 위한 표적추적기법을 연구하고, 근접센서에 다양한 자세로 접근하는 근접표적을 무력화하기 위한 정밀 기폭 알고리즘을 연구할 예정이다.

References

[1] S. M. Sherman, *Monopulse Principles and Techniques*, Artech House, 1984.

[2] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, Tata McGraw Hill, 3rd Edition, 2001.

[3] H. Rohling, "Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situation", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-19, no. 4, pp. 608-621, Jul. 1983.

[4] P. P. Gandhi, S. A. Kassam, "Analysis of CFAR processors in nonhomogeneous background", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 427-445, Jul. 1988.

[5] C. J. Kim, D. S. Han, and H. S. Lee, "Generalized OS CFAR detector with noncoherent integration", *Signal Processing*, vol. 31, no. 1, pp. 43-56, Mar. 1993.

[6] 신상진, "효율적인 CFAR 알고리듬 연구", 한국전자파학회논문지, 25(8), pp. 849-856, 2014년 8월.

[7] M. A. Weiner, "Binary integration of fluctuating targets", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 11-17, Jan. 1991.

[8] T. L. Frey, "An approximation for the optimum binary integration threshold for Swerling Ⅱ targets", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 32, no. 3, pp. 1181-1185, Jul. 1996.

[9] 남창호, 최성희, 나성웅, "부 최적 이진누적 적용 레이다의 표적 측정오차 감소 기법", 전자공학회논문지, 48(9), pp. 65-72, 2011년 9월.

[10] 하종수, 이의혁, 이현아, 박규철, 조규공, "미사일/로켓 방어체계의 RPG-7에 대한 전차방호 성능분석", 한국군사과학기술학회지, 17(3), pp. 350-357, 2014년 6월.

[11] 하종수, 노진입, 최재현, 이한진, 박영식, "지상 접근표적 감지를 위한 초소형 K-대역 레이다 연구", 한국전자파학회논문지, 28(4), pp. 309-317, 2017년 4월.

하 종 수

2001년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)

2003년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학석사)

2003년 3월～현재: 국방과학연구소

[주 관심분야] 근접신관, 전파고도계, 센서 신호처리 등

이 한 진

2010년 2월: 가천의과학대학교 의공학과 (공학사)

2012년 2월: 한양대학교 지능형로봇공학과 (공학석사)

2010년 3월～2012년 8월: 한국과학기술연구원

2012년 10월～현재: 국방과학연구소

[주 관심분야] 근접신관, 신호처리, 로보틱스, 제어 등

박 영 식

2013년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
2015년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
2015년 3월~현재: 국방과학연구소
[주 관심분야] 근접신관, 추적 알고리즘, 센서 신호처리 등

김 봉 준

2013년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
2015년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학석사)
2015년 9월~2016년 9월: ㈜로임시스템
2016년 10월~현재: 국방과학연구소
[주 관심분야] 근접신관, 간섭계 레이다 고도계 등

최 재 현

1995년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
2014년 2월: 충남대학교 전자전파정보통신공학과 (공학박사)
1998년 2월~현재: 국방과학연구소
[주 관심분야] 근접신관, 고도계, 근거리 레이다 등