표적 도플러 속도와 클러터 스펙트럼 특성에 따른 레이더 신호 처리기의 탐지 성능 분석

Analysis of Detection Performance of Radar Signal Processor with Relation to Target Doppler Velocity and Clutter Spectrum Characteristics

양진모 · 신상진 · 이민준 · 김환우*

Jin-Mo Yang · Sang-Jin Shin · Min-Joon Lee · Whan-Woo Kim*

요 약

MTI 필터는 대부분의 레이더 신호 처리에서 클러터로부터 표적을 분리하는데 이용된다. CFAR 검파 전 클러터를 제거함으로써 탐지 성능이 개선될 수 있다. 레이더 시스템을 설계할 때, 일반적으로 설계자는 평균 SNR과 CNR을 고려하고 MTI 필터의 주파수 응답에 의한 영향은 포함되지 않는다. 실제의 경우, 클러터를 포함한 신호들이 필터를 통과할 때, SNR은 표적 속도에 따라 크게 변화하고, CNR 역시 클러터 중심 속도와 스펙트럼 퍼짐에 따라 변화하게 된다. 본 논문에서는 MTI 필터의 주파수 응답과 표적의 속도와 클러터의 스펙트럼 특성 간의 관계를 유도하였다. 필터 출력의 SNR과 CNR의 변화에 의한 CFAR 탐지 성능을 시뮬레이션을 통해 분석하였고, 성능에 미치는 영향을 확인하였다.

Abstract

MTI filter is used to separate target signal from clutter in many radar signal processing. By suppressing clutter before CFAR detection, the detection performance can be improved. As a radar system designed, a design engineer generally takes averaged SNR and CNR into account and does not include the effect of MTI filter's frequency response. In practice, when the signals including clutter are pass through the filter, SNR is widely varying according to target velocity and CNR is also varying according to clutter center frequency and spectrum spreading. In this paper, we have derived the relationship between the MTI filter's frequency response and a target's velocity and a clutter's spectrum characteristics. With the variation of SNR and CNR at the filter output, the detection performance of CFAR has been analyzed by the simulation and has made certain of their influences on the performance.

Key words : MTI(Moving Target Indication), CFAR(Constant False-Alarm Rate), Probability of Detection, SNR (Signal-to-Noise Ratio), CNR(Clutter-to-Noise Ratio)

I. 서 론

MTI(Moving Target Indication) 필터를 적용한 레이더 수신기는 이동 표적을 클러터로부터 손쉽게 분리할 수 있는 대표적인 방법 중의 하나로 1950년대 초

기 레이더 시스템에서부터 현재에 이르기까지 레이더 신호 처리 분야에서 널리 사용되고 있다.

MTI 필터의 성능과 구현에 대한 많은 연구 결과들로부터 이미 알려진 것처럼 필터를 통과한 후 남겨진 클러터의 잔여 전력은 필터의 차수(=처리되는

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

*충남대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Chungnam National University)

· 논 문 번 호 : 20101008-145

· 교 신 저 자 : 양진모(e-mail : jmyang@daegu.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 11월 22일

펄스 수)와 어떤 형태로 구현될 것인지에 따라 시스템의 개선 인자(improvement factor) 및 일정 오경보율(CFAR: Constant False-Alarm Rate) 검파기의 탐지 성능에 영향^[1]을 미친다. 최근 들어, 디지털 신호 처리 기술의 발전과 함께 다수의 펄스들을 이용한 도플러 필터링이 표적의 거리 및 속도 정보를 추출하는 데 적용되긴 하지만 아직까지도 많은 수의 탐지 레이더에서는 MTI 필터를 이용한 수신기들이 사용되고 있다.

MTI 필터는 고정된 클러터와 이동 표적을 구분하기 위해 2, 3 또는 그 이상의 송신 펄스들로부터 반사되어 수신된 신호들을 처리하기 때문에 도플러 필터링에 비해 신호 처리기의 계산 부담이 적고 구현이 용이한 반면, 표적의 속도 정보를 알 수 없는 단점을 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해 MTI 필터와 도플러 필터링을 연속적으로 사용하는 MTD (Moving Target Detection)^[2] 신호 처리 방식이 사용되기도 한다.

일반적으로 레이더 신호 처리기는 필터링과 검파 과정으로 구분되며, 펄스 압축, MTI 필터 또는 도플러 필터링은 표적을 잡음이나 클러터로부터 구분하고, 필터링된 표적 신호의 검파 과정으로 분류할 수 있다. 필터링 과정은 CFAR 검파 과정의 탐지 성능 또는 탐지 확률을 보장하기 위한 적절한 신호-대-잡음비(SNR: Signal-to-Noise Ratio)를 유지하는데 초점을 맞추어 설계된다. 주어진 오경보 확률(probability of false alarm)에 대해 탐지하고자 하는 표적에 대한 SNR 값을 시스템 요구 조건으로부터 추출하게 되면 신호 처리기를 포함한 시스템 구성 요소들에 SNR값이 할당된다. 대부분의 신호 처리기 설계는 표적의 속도 성분을 사전에 알지 못하기 때문에 신호 처리 과정에서 평균 SNR을 적용하게 된다.

또한, CFAR 검파기의 탐지 성능은 클러터와 같은 비균질 배경에서 급격한 성능 저하^[3]를 보이지만, 클러터의 스펙트럼 특성을 필터의 주파수 특성과 함께 고려하지 않고 평균 클러터-대-잡음비(CNR: Clutter-to-Noise Ratio)로 가정하여 CFAR 검파기의 성능을 예측하기 때문에, 클러터 스펙트럼의 퍼짐이나 중심 주파수 오프셋에 의한 영향을 예측할 수 없다.

레이더 시스템의 성능은 신호 처리기의 정확한 성능 예측으로부터 최적화될 수 있으며, 따라서 본

논문에서는 MTI 필터의 표적 속도에 따른 출력 SNR과 클러터 스펙트럼 퍼짐에 의한 출력 CNR 특성을 분석하고, CFAR 검파기의 탐지 성능에 미치는 영향을 이해함으로써 시스템 성능 예측의 신뢰성을 높일 수 있다.

II장에서는 N-펄스 상쇄기를 이용한 MTI 필터의 표적 속도에 따른 SNR과 클러터 스펙트럼 퍼짐 및 중심 주파수 오프셋에 의한 CNR의 입/출력 관계를 고찰하고, III장에서는 후처리 과정인 CFAR 검파기의 탐지 성능에 대해 알아보았다. IV장에서는 III장의 결과로부터 표적 속도에 따른 탐지 확률의 영향과 클러터 특성에 의한 탐지 성능을 시뮬레이션을 통해 분석하였으며, V장에서는 결론을 맺었다.

II. MTI 필터와 SNR, CNR

MTI 필터는 $[-PRF/2: +PRF/2]$ 주파수 영역 내에서 속도 성분을 갖는 표적 신호를 통과시키고 zero-도플러 근처의 주파수 성분을 갖는 클러터 또는 저속의 신호 성분을 제거하는 노치 필터(notch filter)라 할 수 있다.

레이더로 인가되는 반사 신호는 표적의 반사 신호, $s(t)$, 클러터와 같은 간섭으로부터의 반사 신호, $c(t)$, 및 외부 잡음 신호, $n(t)$ 의 합으로 모델링되며, 각각의 신호 성분들이 서로 독립적이라고 가정하면, MTI 필터의 출력에서 각 성분들은 필터의 진폭 및 위상 특성에 의해서만 영향을 받는다. MTI 필터의 입력, $x(t)$ 는

$$x(t) = s(t) + c(t) + n(t) \quad (1)$$

와 같으며, binomial 가중치^[4]를 갖는 N-펄스 상쇄기에 대한 출력 $y(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = w_0 x(t) + w_1 x(t - T) + \dots + w_{N-1} x(t - (N-1)T) \quad (2)$$

여기서 w_m 는 $(-1)^m (N-1)! / (m! (N-1-m)!)$ 로 주어지고, $m = 0, \dots, N-1$ 의 범위를 갖는다.

MTI 출력에서의 각 성분들은 필터의 차수 즉, MTI 필터를 통과하는 펄스의 수에 의해 결정되는 진폭 응답 특성에 의해 이득(gain)을 갖거나 손실(loss)을 겪게 된다. MTI 필터의 주파수 응답 특성은 구현 방법에 따라 차이가 있으며, 대표적으로 지연선

(delay-line)을 이용한 N-펄스 상쇄기가 많이 사용된다. 본 장에서는 표적 신호의 도플러 속도와 클러터 스펙트럼의 퍼짐 및 오프셀에 따른 N-펄스 MTI 필터의 출력 SNR과 CNR에 대해 살펴본다.

2-1 N-펄스 MTI 필터

N-펄스 상쇄기 구조를 갖는 MTI 필터의 주파수 응답 특성^[4]은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$|H(j\omega)|_N = |1 - e^{-j\omega T}|^{N-1} = 2^{N-1} \left| \sin^{N-1} \left(\frac{\omega T}{2} \right) \right| \quad (3)$$

N 은 필터의 차수 또는 처리되는 펄스 수를, T 는 펄스 반복 주기를 ω 는 각주파수를 나타낸다.

그림 1은 레이더 신호 처리기의 구조와 N-펄스 상쇄기의 필터의 주파수 응답 특성을 나타낸다. 그림 1의 주파수 응답 특성에서 알 수 있듯이 진폭 응답은 필터의 차수가 증가함에 따라 DC 성분의 감쇄 특성이 개선되고, 도플러 주파수(속도)를 갖는 표적 신호가 존재하는 영역의 진폭 특성이 급격히 변하는 특징을 가진다. 또한, 클러터가 주로 존재하는 영역인 DC 주파수 근처의 감쇄 특성이 개선되기 때문에 클러터 스펙트럼의 퍼짐 정도가 일정하다고 했을 때 필터의 차수가 증가함에 따라 클러터 감쇄 성능이 개선된다. 필터의 차수가 증가함에 따라 표적 신호가 통과하는 대역폭이 줄어들고 클러터를 제거하는 영역이 증가하기 때문에, 표적의 도플러 주파수, 클러터 스펙트럼의 퍼짐, 표적 신호의 통과 대역 및 클러터 감쇄를 위한 노치 대역(notch band)의 폭과의 관계를 이해하는 것이 MTI 필터를 적용한 수신기 설계에 있어 중요하다.

2-2 표적 속도와 SNR_o

MTI 필터가 그림 1의 지연선 구조를 가진다고 할 때 2-펄스 상쇄기에 대한 입력-출력 신호 전력비를 유도해 보자. 식 (1)과 (2)에서 MTI 필터의 입력이 표적 성분 $s(t)$ 만 존재한다고 가정하면, 출력 $y_s(t)$ 는 2-펄스 상쇄기의 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_s(t) = s(t) - s(t+T) \quad (4)$$

표적 신호 성분이 임의의 속도 v 를 갖는다면 신호 성분의 전력비($=S_o/S_i$)는 다음과 같이 표현할 수

그림 1. 레이더 신호 처리기 구조와 MTI 필터의 주파수 응답 특성

Fig. 1. Radar signal processor configuration and MTI filter frequency response characteristics.

있다.

$$\frac{S_o}{S_i} = \frac{\overline{y_s^2(t)}}{\overline{s^2(t)}} = \left\{ 2 \left| \sin \left(\frac{\omega T}{2} \right) \right| \right\}^2 = 2 [1 - \cos(\omega T)] \quad (5)$$

여기서 ωT 항은 $2\pi \cdot (2v/\lambda) \cdot T$ 로 표현할 수 있으며, 여기서 $(2v/\lambda)$ 는 표적의 임의 도플러 주파수를 나타낸다. ωT 를 ζ_{tv} 라 정의하면 식 (5)는

$$\frac{S_o}{S_i} = 2 [1 - \cos(\zeta_{tv})] \quad (6)$$

로 표현할 수 있다. 대부분의 신호 처리기 설계 과정에서 입력-출력 신호의 전력비는 표적의 도플러 속도를 알지 못한다고 가정하고 필터의 대역 내에 균일하게 분포한다고 가정한 후 평균값을 취하게 된다.

$$\frac{\overline{S_o}}{S_i} = \frac{1}{v_d} \int_0^{v_d} 2[1 - \cos(\zeta_{tv})] dv = 2 \quad (7)$$

식 (7)에서 v_d 는 펄스 반복 주파수에 의해 결정되는 최대 도플러 속도이며, $\lambda f_{PRF}/2$ 로 주어지기 때문에 적분내 $\cos(\cdot)$ 함수에 대한 적분값이 0이 된다. 여러 참고문헌 [5], [6]에서 이 값을 MTI 필터의 평균 신호 이득이라 정의하고, 신호 처리기 설계 및 MTI 필터의 성능 평가에 대표 값처럼 적용한다. 그러나 실제 시스템에서는 MTI 필터 출력에서의 신호 전력비는 도플러 주파수에 따라 식 (6)과 같은 특성을 가지게 되고, 상쇄기의 차수에 따라 좌우된다.

식 (7)로 주어진 신호 전력비는 잡음비^[7]($N_o/N_i = 2$)를 이용하면 2-펄스 상쇄기 MTI 필터 출력에서의 SNR_o 는 아래의 식과 같이 표현할 수 있으며, 표적 도플러 속도와 입력 SNR_i 의 함수가 된다.

$$\begin{aligned} SNR_o &= \frac{S_o}{N_o} = \frac{S_o}{S_i} \cdot \frac{S_i}{N_o} = \frac{S_o}{S_i} \cdot \frac{S_i}{N_i} \cdot \frac{N_i}{N_o} \\ &= 2[1 - \cos(\zeta_{tv})] \cdot \frac{1}{2} \cdot SNR_i \\ &= [1 - \cos(\zeta_{tv})] SNR_i \end{aligned} \quad (8)$$

MTI 필터의 입력 SNR_i 에 따른 출력 SNR_o 의 변화는 최대 도플러 속도가 150 m/s라 할 때, 5 m/s, 35 m/s, 75 m/s의 표적 속도에 대해 표 1과 같다.

표적의 속도가 최대 속도의 반(75 m/s)에 가까워질수록 SNR은 이득으로 작용하며, 반대로 노치 근처의 값(5 m/s)을 가지게 되면 SNR의 손실을 보인다.

표 1. 표적의 도플러 속도에 따른 필터 출력 SNR
Table 1. Filter's output SNR with respect to target's Doppler velocity.

	2-Pulse canceller			3-Pulse canceller		
	5 m/s	35 m/s	75 m/s	5 m/s	35 m/s	75 m/s
SNR_i	SNR_o			SNR_o		
-30	-46.6	-30.5	-27.0	-65.0	-32.7	-25.7
-20	-36.6	-20.5	-17.0	-55.0	-22.7	-15.7
-10	-26.6	-10.5	-7.0	-45.0	-12.7	-5.7
0	-16.6	-0.5	3.0	-35.0	-2.7	4.3
10	-6.6	9.5	13.0	-25.0	7.3	14.3
20	3.4	19.5	23.0	-15.0	17.3	24.3
30	13.4	29.5	33.0	-5.0	27.3	34.3

그림 2. 표적 도플러 속도에 따른 SNR_o
Fig. 2. SNR_o with respect to target Doppler velocity.

만약 MTI 필터의 신호 이득을 평균값으로 선택하여 사용한다면 SNR_o 는 SNR_i 과 같다. 그러나 식 (5)의 결과를 이용하게 되면 후처리 과정에 입력되는 SNR은 표적의 속도와 MTI 필터의 차수에 따른 주파수 특성에 따라 넓은 범위의 변화폭을 가지게 되고, CFAR의 탐지 확률은 MTI 필터의 신호 전력비에 대한 평균 이득일 때의 성능과 비교하면 많은 변화가 예상된다. MTI 필터의 표적 속도에 따른 SNR 변화에 따른 CFAR 탐지 성능은 다음 장에서 자세히 언급하였다. 그림 2는 표적의 도플러 속도가 MTI 필터의 중심에서부터 DC까지 변화할 때 필터의 차수에 따른 SNR_o 의 변화를 도시한 것이다.

2-3 클러터 스펙트럼 특성과 CNR_o

MTI 필터의 주파수 응답 특성과 클러터의 스펙트럼 특성 간의 관계에 대해 살펴본다. 먼저 MTI 필터의 출력 CNR을 유도하기 위해 Levanon^[8]이 MTI 필터의 클러터 감쇄 성능을 유도하는데 사용된 자기 상관 함수(autocorrelation function)을 이용하고, MTI 필터에 입력되는 클러터의 주파수 스펙트럼이 가우시안 함수로 주어진다고 가정한다.

$$S_C(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_c} e^{-\frac{(f-f_{cv})^2}{2\sigma_c^2}} \quad (9)$$

여기서 f_{cv} 는 클러터 스펙트럼의 중심 주파수이며,

σ_c 는 스펙트럼의 퍼진 정도를 나타내는 표준편차(standard deviation)을 나타낸다. 수풀, 언덕 및 지형 물과 같은 지면 클러터의 경우, f_{cw} 가 DC 또는 DC 근처의 값을 가지며, 바람의 영향에 의한 σ_c 의 변화만을 보이는 반면 비, 구름과 같은 기상 클러터나 해면 클러터의 경우에는 f_{cw} 가 DC로부터 오프셋되어 MTI 필터의 천이 영역(transition region)을 벗어나 존재할 수 있다. 이때 MTI 필터는 설계시 예상되었던 것만큼의 클러터를 제거할 수 없게 된다. 만약 레이더가 장착된 플랫폼이 상대적으로 움직인다면 상대 속도 성분 역시 고려되어야 한다.

식 (9)의 스펙트럼을 갖는 클러터가 2-펄스 상쇄기를 통과한 후 남겨진 클러터 전력에 대한 입력 클러터 전력의 비($=C_o/C_i$)는 클러터 감쇄 성능의 역수로 정의되고, 2-펄스 상쇄기의 클러터 감쇄(CA)는 다음과 같은 과정을 거쳐 유도된다. MTI 필터의 입력에 클러터만이 존재한다고 가정하면, MTI 필터의 출력은

$$y_c(t) = c(t) - c(t+T) \quad (10)$$

와 같고, 클러터 전력은

$$\begin{aligned} E[y_c^2(t)] &= E[(c(t) - c(t+T))^2] \\ &= 2R(0) - 2R(T) \end{aligned} \quad (11)$$

로 주어진다. 여기서 $R(T)$ 는 클러터의 자기 상관 함수이며, $R(0)$ 는 $T=0$ 일 때의 자기 상관 함수 값을 나타낸다. 클러터의 자기 상관 함수 $R(T)$ 는 클러터 스펙트럼 $S_C(f)$ 와 푸리에 변환 쌍^[9]을 이루고, $S_C(f)$ 는 even 대칭 특성을 가지므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R(T) = \int_{-\infty}^{\infty} S_C(f) \cos(\omega T) df \quad (12)$$

식 (9)를 식 (12)에 대입하고 정리하면

$$R(T) = \frac{\sigma_c}{\sqrt{2\pi}} \cos(\omega_c T) \exp\left(-\frac{\sigma_c^2 T^2}{2}\right) \quad (13)$$

와 같고, $R(0)$ 는 위 식에서 $T=0$ 의 값이므로 $\sigma_c/\sqrt{2\pi}$ 가 된다. 식 (13)과 $R(0)$ 를 식 (11)에 대입하고 정리하면 MTI 필터의 입력-출력에서의 클러터 전력 비는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \frac{C_o}{C_i} &= \frac{E[y_c^2(t)]}{E[c^2(t)]} = \frac{2R(0) - 2R(T)}{R(0)} \\ &= 2 \left[1 - \cos(\omega_c T) \exp\left(-\frac{\sigma_c^2 T^2}{2}\right) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)와 식 (6)을 비교하면 표적과 클러터의 속도 성분에 의한 영향은 $\cos(\cdot)$ 항으로 유사하게 표현되고 클러터의 경우, 스펙트럼의 퍼짐은 지수함수로 표현됨을 알 수 있다. 출력 SNR을 유도한 방법과 유사한 방법으로 MTI 필터의 입력-출력에서 CNR을 아래와 같이 정의한다. MTI 필터의 출력에서 CNR_o 는

$$\begin{aligned} CNR_o &= \frac{C_o}{N_o} = \frac{C_o}{C_i} \cdot \frac{C_i}{N_o} = \frac{C_o}{C_i} \cdot \frac{C_i}{N_i} \cdot \frac{N_i}{N_o} \\ &= 2 \left[1 - \cos(\omega_c T) \exp\left(-\frac{\sigma_c^2 T^2}{2}\right) \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot CNR_i \\ &= \left[1 - \cos(\omega_c T) \exp\left(-\frac{\sigma_c^2 T^2}{2}\right) \right] CNR_i \end{aligned}$$

로 주어지고, 표적에서와 달리 클러터의 중심 주파수 성분($\omega_c T$)과 스펙트럼의 퍼짐(σ_c)의 함수가 된다. MTI 필터의 입력 CNR_i 에 따른 출력 CNR_o 의 변화는 중심 주파수가 0일 때와 0이 아닌 경우 클러터 스펙트럼 퍼짐($\sigma_c=5$ m/s, 10 m/s, 20 m/s, 35 m/s)에 대해 표 2와 같다.

클러터의 중심 주파수가 0일 때, MTI 필터의 출력에서 CNR_o 는 2-펄스 상쇄기의 경우 스펙트럼 퍼짐

표 2. $v_c=0$ m/s에서 클러터의 스펙트럼 퍼짐에 따른 필터별 출력 CNR 값

Table 2. Filter's output CNR with respect to clutter's spectrum spreading in $v_c=0$ m/s.

	2-Pulse canceller				3-Pulse canceller			
	0 m/s	10 m/s	20 m/s	35 m/s	0 m/s	10 m/s	20 m/s	35 m/s
CNR_i	CNR_o				CNR_o			
-30	-51.0	-40.8	-35.3	-31.8	-69.1	-48.7	-38.4	-32.6
-20	-41.0	-30.8	-25.3	-21.8	-59.1	-38.7	-28.4	-22.6
-10	-31.0	-20.8	-15.3	-11.8	-49.1	-28.7	-18.4	-12.6
0	-21.0	-10.8	-5.3	-1.8	-39.1	-18.7	-8.4	-2.6
10	-11.0	-0.8	4.7	8.2	-29.1	-8.7	1.6	7.4
20	-1.0	9.2	14.7	18.2	-19.1	1.3	11.6	17.4
30	9.0	19.2	24.7	28.2	-9.1	11.3	21.6	27.4

표 3. $v_c=10$ m/s에서 클러터의 스펙트럼 퍼짐에 따른 필터별 출력 CNR 값

Table 3. Filter's output CNR with respect to clutter's spectrum spreading in $v_c=10$ m/s.

CNR in	2-Pulse canceller				3-Pulse canceller			
	0 m/s	10 m/s	20 m/s	35 m/s	0 m/s	10 m/s	20 m/s	35 m/s
-30	-40.3	-37.9	-34.5	-31.6	-51.2	-43.8	-37.1	-32.3
-20	-30.3	-27.9	-24.5	-21.6	-41.2	-33.8	-27.1	-22.3
-10	-20.3	-17.9	-14.5	-11.6	-31.2	-23.8	-17.1	-12.3
0	-10.3	-7.9	-4.5	-1.6	-21.2	-13.8	-7.1	-2.3
10	-0.3	2.1	5.5	8.4	-11.2	-3.8	2.9	7.7
20	9.7	12.1	15.5	18.4	-1.2	6.2	12.9	17.7
30	19.7	22.1	25.5	28.4	8.8	16.2	22.9	27.7

이 클수록 큰 값을 갖는다. 즉, 클러터가 필터에 의해 감쇄되고 남은 잔여 클러터 량이 상대적으로 کم을 의미한다. 이와 같은 현상은 클러터 가우시안 함수로 가정된 스펙트럼(식 (9))으로부터 알 수 있으며, 다른 필터 구조에서도 스펙트럼 퍼짐이 증가하게 되면 상대적으로 많은 잔여 클러터가 MTI 필터의 출력에 나타남을 알 수 있다.

CNR은 SNR과 달리 작을수록 후처리 과정의 성능을 개선할 수 있다. 따라서 CNR을 적게 유지할 수 있도록 필터의 차수를 선택해야 한다. 또 하나 흥미로운 사실은 클러터의 중심 주파수가 DC가 아닌 필터 대역의 중간 영역으로 증가할수록 MTI 필터의 클러터 감쇄 성능은 재역할을 하지 못하게 되고, 후처리 과정의 성능을 현저히 저해할 수 있음을 예상할 수 있다. 표 3은 클러터 중심 주파수가 DC가 아닌 경우의 CNR값을 구한 결과이다. 표 2에서와 유사하게 클러터 감쇄 특성은 스펙트럼 퍼짐이 증가할수록 악화되고, 표 2와 동일한 조건에서 비교하였을 때 감쇄 성능이 떨어짐을 알 수 있다. 그림 3은 클러터 스펙트럼의 퍼짐 정도에 따라 중심 주파수별 MTI 필터에 대한 CNR_o 를 도시한 것이다.

III. CFAR 탐지 성능

클러터 억제에 위한 MTI 필터가 출력 SNR과 CNR에 대해 표적 속도 및 클러터 스펙트럼 특성에 따라 미치는 영향에 대해 II장에서 고찰하였다. SNR_o 는 표적 속도와 필터 차수에 의해 결정되고,

(a) $v_c=0$ m/s

(b) $v_c=10$ m/s

그림 3. 클러터 스펙트럼 특성에 따른 MTI 필터의 CNR_o

Fig. 3. MTI filter CNR_o with respect to clutter spectrum characteristics.

CNR_o 는 클러터 스펙트럼의 중심 주파수와 퍼짐 정도 및 필터 차수에 의존한다. III장에서는 이와 같은 관계를 고려하여 후처리 과정인 CFAR 검파기의 탐지 성능에 대해 논의한다.

CFAR 검파기의 탐지 성능은 시스템에서 요구하는 P_{FA} 와 입력되는 $SNR(v, N)$ 및 클러터와 같은 비균질 배경(non-homogeneous background) 조건에서는 $CNR(v_c, \sigma_c, N)$ 에 의해 결정된다. 그림 1의 (a)에서 MTI 필터 후단은 신호의 진폭값(envelope)을 얻기 위해 SQL(Square-Law) 검파기를 이용한다. SQL 검파기의 출력은 CFAR 검파기에 입력되어 시스템이

일정 오경보율을 갖도록 한다. CFAR 검파기는 레이더로 입력되는 배경의 크기 변화와 무관하게 일정한 오경보율을 유지하도록 하는 적응 소자로 대부분의 레이더 신호 처리에서 표적을 검출하는데 이용된다. CUT(Cell-Under-Test)의 크기와 기준창(reference window) 내 셀들의 크기 합을 비교하는 CA(Cell-Averaging)-CFAR 검파기의 오경보 확률과 탐지 확률^[10]은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{FA} = (1 + T_S)^{-N_R} \quad (16)$$

$$P_D = \left[1 + \frac{T_S}{1 + SNR} \right]^{-N_R} \quad (17)$$

여기서 T_S 는 문턱값 크기 인자(scaling factor)이고, N_R 는 기준창의 길이를 나타낸다. 식 (17)에서 SNR은 MTI 필터와 SQL 검파기를 통과한 후 CFAR 검파기에 입력되는 신호-대-잡음비는 식 (8)과 같이 주어진다. 표적 속도가 필터 대역 내에서 임의의 값을 가진다고 가정하면 탐지 확률 P_D 는 (v, N) 의 함수가 된다.

$$P_D(v, N) = \left[1 + \frac{T_S}{1 + SNR(v, N)} \right]^{-N_R} \quad (18)$$

CUT가 균질 배경에 대해 비교된다면 식 (18)을 이용하여 CFAR 출력에서의 탐지 확률을 표적 속도에 대해 분석할 수 있다.

표적은 균질 배경뿐만 아니라 클러터와 같은 비균질 배경 내에 존재할 수 있고, SNR 대신 신호-대-클러터 비(SCR: Signal-to-Clutter Ratio)를 고려하여야 한다. 또한, 기준창 전체가 클러터 성분들로만 구성되어 있는지 잡음과 클러터로 구성되어 있는지에 따라 달리 해석된다. 그림 4는 CFAR 검파기로 구성된 후처리 과정의 구성을 나타낸다.

CUT가 클러터와 잡음으로 구성된 비균질 배경내 존재할 때 오경보 확률과 탐지 확률은 P. P. Gandhi^[10]에 의해 유도되고 정리되었다. 기준창이 r 개의 셀은 클러터로, $N_R - r$ 개의 셀은 잡음을 포함하고 있고, CUT가 클러터 배경 내에 존재한다고 가정하면 오경보 확률은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{FA} = [1 + T_S]^{-r} \left[1 + \frac{T_S}{1 + CNR} \right]^{-(N_R - r)} \quad (19)$$

그림 4. CFAR 검파기

Fig. 4. CFAR detector.

비균질 배경에서의 탐지 확률은 식 (19)에 T_S 대신 $T_S/(1 + SIR)$ 를 대입하여 유도할 수 있다. 여기서 SIR 은 신호-대-(잡음+간섭)비로 $SNR/(1 + CNR)$ 로 표현할 수 있고, 식 (19)에 대입하여 정리하면

$$P_D = \left[1 + \frac{T_S}{1 + SNR/(1 + CNR)} \right]^{-r} \times \left[1 + \frac{T_S}{SNR + (1 + CNR)} \right]^{r - N_R} \quad (20)$$

와 같이 주어진다.

만약 MTI 필터의 신호 이득을 속도 성분에 대해 평균을 취한 값으로 적용한다면 식 (20)을 이용하여 탐지 성능을 계산할 수 있지만 표적의 속도와 MTI 필터의 차수에 의한 영향을 고려하여 예측하기 위해서는 식 (8)과 식 (15)를 식 (20)에 대입해야 한다. 비균질 배경에서의 문턱값 크기 인자는 식 (19)를 이용해야 함에 주의해야 한다.

IV. 신호 처리 성능 분석

MTI 필터의 주파수 응답 특성과 출력 SNR과 CNR값의 관계를 이용하여 CFAR 탐지 성능을 비교하고 분석한다.

CFAR의 성능은 일반적으로 SNR에 대한 탐지 확률을 고정 문턱 검파기(fixed threshold detector)에 대해 상대적으로 비교함으로써 성능을 평가하게 된다. 균질 배경의 경우, 잡음만이 존재한다고 가정하며, 표적의 속도 성분과 MTI 필터의 차수에 의한 영향

만이 있다고 가정한다. 비균질 배경의 경우, 기준창의 대부분은 클러터라 가정하고 클러터에 의한 중심 주파수, 스펙트럼 퍼짐 및 MTI 필터의 영향만이 있다고 가정한다. 오정보 확률이 10^{-6} , 기준창(reference window) 길이는 24, MTI 필터에 입력되는 잡음의 확률 밀도 함수는 가우시안 함수이며, MTI 필터와 SQL 검파기를 통과한 후 CFAR 검파기에 입력되는 잡음 분포는 지수 함수 분포(exponential distribution)를 가진다고 가정한다. 표적은 Swerling I 모델이며, Rayleigh 분포를 가진다고 가정한다.

4.1 균질 배경에서의 탐지 확률

균질 배경은 클러터를 포함한 외부의 간섭이 없고 가우시안으로 표현되는 열잡음 환경을 의미한다. CUT가 균질 배경 내에 존재하는 경우, MTI 필터의 클러터 제거 성능은 CFAR 탐지 성능에 영향을 주지 않지만, 필터를 통과한 신호 성분은 필터의 차수에 따른 주파수 응답 특성과 표적의 속도에 따른 SNR 변화에 의해 CFAR 탐지 확률에 영향을 미친다.

MTI 필터를 통과하는 표적의 속도 성분이 필터 대역내 임의의 값을 가진다고 할 때, 2-펄스 상쇄기에 대한 CA-CFAR의 탐지 확률은 그림 5(a)와 같으며, 표적 속도가 35 m/s일 때 MTI 필터의 차수에 따른 탐지 확률은 그림 5(b)와 같다.

표적 속도가 필터의 노치 근처의 값을 가지는 경우, 탐지 확률 50 %에 대해 약 22 dB의 SNR이 요구된다. 반면, 표적 속도가 필터의 통과 대역, 즉, 최대 도플러 속도의 1/2인 경우, 최적 검파기(optimum detector)의 탐지 성능보다 우수한 탐지 특성을 보인다. 표적이 필터의 통과 대역 중심에 해당되는 속도를 가지게 되면 신호 관점에서 이득이 발생하게 되고, 식 (8)에서 알 수 있듯이 최대 3 dB의 이득을 갖게 된다. 따라서 50 % 확률에 대해 약 12 dB의 SNR이 요구된다. MTI 필터를 고려하지 않을 경우, 요구되는 SNR은 14.5 dB이며, 표적 속도에 따른 요구 SNR을 비교하면 표 4와 같다. 또한, 필터의 차수가 증가할수록 표적의 속도에 따른 요구 SNR의 변동 범위가 커질 수 있다.

MTI 필터의 차수에 따른 요구 SNR의 변화를 살펴보면, 그림 5의 (b)에서 알 수 있듯이 50 % 탐지

(a) 표적 속도에 따른 P_D

(a) P_D with respect to target velocity

(b) 표적 속도가 35 m/s일 때 MTI 필터의 차수에 따른 P_D

(b) P_D with respect to MTI filter order (target velocity= 35 m/s)

그림 5. 균질 배경에서 CA-CFAR 탐지 성능

Fig. 5. CA-CFAR detection performance in homogeneous background.

표 4. P_D 50 %에서 표적 속도에 따라 요구되는 SNR

Table 4. Required SNR following target velocity in P_D 50 %.

표적 속도	요구되는 SNR	SNR의 차이
평균 속도 고려	14.0 dB	0.0 dB
5 m/s	22.0 dB	+8.0 dB
35 m/s	14.5 dB	+0.5 dB
75 m/s	12.0 dB	-2.0 dB

확률을 기준으로 차수가 증가함에 따라 35 m/s의 표적 속도에 대해 SNR은 약 3 dB씩 증가한다.

균질 배경에서 표적 속도에 의한 CFAR 탐지 성능은 표적 속도에 따라 어떤 경향을 나타내는지 그림 6의 (a)~(d)를 통해 알 수 있다. (a)는 입력 SNR이 0 dB일 때, 표적이 갖는 속도에 따라 CFAR 탐지 확률의 변화 특성을 나타낸다. 세로축의 최대 크기는 0.025이고, 거의 탐지할 수 없음을 알 수 있다. 적어도 50 % 이상의 탐지 확률을 보장하기 위해서는 MTI 필터에 입력되는 SNR은 10 dB 이상이고, 필터의 차수가 4 이상일 때 표적 속도는 $0.4 v_d$ 이상이어야 함을 (b)에서 알 수 있다. 만약, 적용된 MTI 필터가 2-펄스 또는 3-펄스인 경우 $0.4 v_d$ 의 속도를 갖는 표적이 10 dB의 SNR을 갖고 입력된다면 탐지 확률은 2-펄스의 경우, 약 35 %, 3-펄스인 경우, 약 35 %, 3-펄스인 경우, 약 45 %를 갖게 된다. 50 % 이상의

탐지 확률을 보장하기 위해선, 4-펄스 이상의 MTI 필터를 사용하거나 입력 SNR을 증가시켜야 한다. 4-펄스 이상의 MTI 필터를 적용하게 되면, 송신 전력 관점에서 펄스 수의 손실이 발생하는 것이고, SNR의 증가는 수신기 이득 증가나 신호 처리 과정의 처리 이득(processing gain)을 증가시켜야 함을 의미한다.

4-2 비균질 배경에서의 탐지 확률

CUT가 기준치 내에 클러터와 잡음이 함께 존재하는 비균질 배경에서의 MTI 필터와 CFAR의 탐지 성능에 대해 생각해 보자.

만약 기준치가 대부분 잡음으로 채워져 있고 일부 셀만 클러터로 채워져 있을 때, CUT가 잡음 배경 내에 있다면 탐지 확률은 SNR과 CNR에 의해 결정된다. 반면, CUT가 클러터 배경 내에 존재한다면, 탐지 확률은 SNR대신 SIR(Signal-to-Interference Ratio)

그림 6. 균질 배경에서 표적 속도에 따른 CA-CFAR 탐지 확률

Fig. 6. CA-CFAR detection performance with respect to target velocity in homogeneous background.

에 의해 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다.

CUT가 클러스터 내에 존재할 때, MTI 필터를 통과한 후 남겨진 클러스터 전력은 필터의 차수와 클러스터 중심 주파수 및 스펙트럼 퍼짐에 따라 다르게 나타나며, 그림 3의 (a)와 (b)에서처럼 0 m/s일 때의 필터 출력에서의 CNR 감쇄는 10 m/s일 때의 CNR 감쇄에 비해 스펙트럼 퍼짐이 작을수록 커진다. 다시 말해, 클러스터 중심 속도 성분이 0 m/s일 때, 출력 CNR의 감쇄는 스펙트럼 퍼짐이 클수록 작아지고, 중심 속도 성분이 10 m/s인 경우에는 출력에서의 CNR은 덜 감쇄된다. 클러스터의 중심 속도 성분을 고려하지 않는다면, CNR은 동일한 클러스터 스펙트럼 퍼짐에 대해 필터의 차수가 커질수록 감쇄 폭이 커진다. 또한, 스펙트럼 퍼짐이 커질수록 CNR의 감쇄량은 필터의 차수와 무관하게 입력 CNR에 의해서만 결정된다. CNR의 변화는 MTI 필터의 클러스터 감쇄(CA)와 동일한 경향을 갖는다.

MTI 필터를 사용할 때와 사용하지 않을 때의 CFAR 성능을 비교해 보면, 필터를 사용하지 않았을 때 클러스터 전력은 CNR을 증가시키고, 따라서 탐지 확률이 감소한다. 반면, 필터를 사용하게 되면 CFAR의 탐지 성능은 MTI 필터를 사용하지 않았을 때에 비해 개선될 것이다. MTI 필터를 사용하지 않았을 때, CFAR 탐지 성능은 CNR이 증가함에 따라 동일한 탐지 확률을 유지하기 위해 -10 dB의 CNR일 때의 SIR에 비해 CNR이 +10 dB가 되면 SIR은 10 dB가 추가로 요구된다. CNR이 +10 dB일 때, MTI 필터를 사용하는 경우, 탐지 성능이 개선되는 것을 그림 7에서 알 수 있다. 입력 CNR이 +10 dB일 때, 필터의 차수가 증가함에 따라 50 %의 탐지 확률을 얻기 위해 요구되는 SIR은 표 5와 같으며, 필터의 차수가 올라갈수록 요구되는 SIR이 적어짐을 알 수 있다.

클러스터의 중심 속도가 0이 아닌 경우, MTI 필터에

표 5. 비균질 배경에서 50 % 탐지 확률에 요구되는 SIR

Table 5. Required SIR for 50 % detection probability in non-homogeneous background.

No MTI filter	With MTI filter			
	N=2	N=3	N=4	N=5
24.9 dB	24.8 dB	23.7 dB	18.1 dB	17.6 dB

(a) CNR_i 변화에 따른 P_D
(a) P_D with respect to CNR_i

(b) MTI 필터에 의한 P_D 개선
(b) P_D improvement by MTI filter

그림 7. 비균질 배경에서 CA-CFAR 탐지 성능

Fig. 7. CA-CFAR detection performance in nonhomogeneous background.

의한 클러스터 제거 특성은 후처리 과정에 큰 영향을 주게 된다. 클러스터 중심 속도가 증가하면, 그림 3에서 알 수 있듯이 클러스터의 제거 특성이 떨어지기 때문에 입력 CNR이 필터에 의해 영향을 덜 받는다. 즉, 클러스터가 감쇄되지 않고 그대로 CFAR 검파기에 입력되므로 SIR이 저하된다.

그림 8은 입력 CNR이 +20 dB일 때, 중심 속도에 따른 CFAR 탐지 성능을 나타낸다. (a)와 (b)는 중심 속도가 0 m/s일 때, (c)와 (d)는 10 m/s일 때 SIR에 따른 탐지 확률을 나타낸다. 탐지 확률은 SNR의 함수인 대신 SIR에 의해 결정된다. 이는 앞에서 설명했듯이, CUT가 잡음 배경이 아닌 클러스터 배경에 존재한다고 가정하였기 때문이다. 원하는 탐지 확률을

그림 8. 비균질 배경에서 클러터 특성에 따른 CA-CFAR 탐지 성능

Fig. 8. CA-CFAR detection performance with spectrum spreading in non-homogeneous background.

언기 위해서 요구되는 SIR은 클러터 중심 속도가 증가할수록 스펙트럼 퍼짐이 증가할수록 증가하게 된다.

V. 맺음말

본 논문에서는 클러터와 표적을 분리하는데 적용되는 MTI 필터가 CFAR 검파기 탐지 성능에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 대부분의 레이더 신호 처리기 탐지 성능은 신호 처리기 전단에 적용된 필터의 전기적 성능과 후단의 검파기 구조에 의해 결정된다. 이때 필터의 출력 SNR은 표적의 속도값을 알지 못하기 때문에 DC에서부터 펄스 반복 주파수에 의해 결정되는 표적 최대 속도까지의 범위 내에서 정규화(속도에 대한 평균값)하여 설계 또는 성능 분석시 사용한다. 실제의 경우, MTI 필터의 주파수 응

답 특성은 필터의 차수와 표적 속도 값에 따라 출력 SNR에 영향을 주며, CNR 역시 클러터 스펙트럼의 중심 속도와 퍼짐 정도에 따라 출력 CNR에 영향을 미친다. 따라서 MTI 필터의 출력에서 SNR과 CNR이 MTI 필터의 특성에 의해 영향을 보였으며, SNR과 CNR의 필터 주파수 응답에 따른 변화가 CFAR 탐지 성능에 미치는 영향에 대해 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Robert D. Short, "An adaptive MTI for weather clutter suppression", *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-18, no. 5, pp. 552-562, Sep. 1982.

- [2] D. Curtis Schleher, *MTI and Pulsed-Doppler Radar*, Artech House, 1991.
- [3] Marks A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing, Chapter 6. Detection*, McGraw-Hill, 2005.
- [4] Eyung W. Kang, *Radar System Analysis, Design, and Simulation, Chapter 11. Moving Target Indicator*, Artech House, 2008.
- [5] D. K. Barton, *Radar System Analysis, Chapter 7. MTI Techniques in Search Radar*, Artech House, 1989.
- [6] F. E. Nathanson, *Radar Design Principles, Chapter 9. Moving Target Indicators(MTI)*, McGraw-Hill, 2nd Ed., 1991.
- [7] Harlod R. Raemen, *Radar System Principles, Chapter 9. Methods of Combatting Clutter*, CRC Press Inc., 1997.
- [8] N. Levanon, *Radar Principles, Chapter 11. Moving Target Indication(MTI)*, John Wiley and Sons, 1988.
- [9] Wilbur B. Davenport, *Probability and Radom Processes*, McGraw-Hill, 1970.
- [10] P. P. Gandhi, S. A. Kassam, "Analysis of CFAR processors in nonhomogeneous background", *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 427-445, Jul. 1988.

양진모

1988년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
 1991년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
 1991년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
 2006년 3월~현재: 충남대학교 전자공학과 박사과정

[주 관심분야] 초고주파 시스템, 위상 배열 레이더 시스템

이민준

1986년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 1988년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
 1999년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1988년 2월~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 능동 위상 배열 레이더 시스템

신상진

1996년 2월: 한양대학교 제어계측공학과 (공학사)
 1998년 2월: 한양대학교 제어계측공학과 (공학석사)
 2003년 2월: 한양대학교 제어계측공학과 (공학박사)
 2003년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 능동 위상 배열 레이더 시스템, 추적 필터

김환우

1977년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1979년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1988년 6월: University of Utah 전자공학과 (공학박사)
 1980년~현재: 충남대학교 전자전파 정보통신공학부 정교수

[주 관심분야] 통신 시스템 및 신호 처리 등