

논문 2012-49TC-3-5

비균질 환경에 강인한 검출기를 위한 변동 지수 CFAR의 성능 향상

(Performance Improvement of a Variability-index CFAR Detector for
Heterogeneous Environment)

신 종 우*, 김 완 진**, 도 대 원**, 이 동 훈***, 김 형 남****

(Jong-Woo Shin, Wan-Jin Kim, Dae-Won Do, Dong-Hun Lee, and Hyung-Nam Kim)

요 약

레이더 및 소나와 같은 탐지 시스템에서 잡음 환경은 균질 (homogeneous) 환경과 비균질 (heterogeneous) 환경으로 구분되며 비균질 환경은 간섭 신호 환경 (target masking)과 클러터 경계 환경 (clutter edge)으로 모델링 할 수 있다. VI (variability index) CFAR (constant false alarm rate)는 이러한 다양한 잡음 환경에 강건한 표적신호 탐지 성능의 확보를 위한 방법으로, mean-level CFAR 알고리즘들 중에서 주어진 잡음 환경에 최적화된 기법을 선택하는 방법이다. 하지만, VI CFAR의 경우 클러터 잡음 경계 환경과 간섭 신호 환경에서 검출 확률이 저하되는 단점을 보인다. 이를 극복하기 위해, 본 논문에서는 TM (trimmed mean) CFAR와 sub-window를 이용하여 비균질 환경에 의한 검출 확률의 저하를 최소화시키는 방법을 제안한다. 모의 전산 실험 결과에 따르면, 제안된 알고리즘은 기존의 VI CFAR 및 단일 CFAR 알고리즘에 비해 간섭 신호 환경과 클러터 경계 환경에서 검출 확률 및 오경보 확률 측면에서 우수한 성능을 보인다.

Abstract

In RADAR and SONAR detection systems, noise environment can be classified into homogeneous and heterogeneous environment. Especially heterogeneous environments are modelled as target masking and clutter edge. Since the variability-index (VI) CFAR, a composed CFAR algorithm, dynamically selects one of the mean-level algorithms based on the VI and the MR (mean ratio) test, it is robust to various environments. However, the VI CFAR still suffers from lowered detection probabilities in heterogeneous environments. To overcome these problems, we propose an improved VI CFAR processor where TM (trimmed mean) CFAR and a sub-windowing technique are introduced to minimize the degradation of the detection probabilities appeared in heterogeneous environments. Computer simulation results show that the proposed method has the better performance in terms of detection probability and false alarm probability compared to the VI CFAR and single CFAR algorithms.

Keywords: CFAR, 변동 지수, variability index, 검출기, 소나

I. 서 론

레이더 (RADAR)나 소나 (SONAR)와 같은 탐지시스템 (detection system)에서는 배경 잡음, 간섭 신호, 클러터 (clutter), 잔향음 (reverberation) 등이 포함된 신호로부터 표적 신호를 탐지하기 위해 CFAR 검출기 (constant false alarm rate detector)가 사용되고 있다. CFAR 검출기는 Neyman-Pearson 검출 이론에 기반을

* 학생회원, **** 정회원, 부산대학교 전자전기공학과 (School of Electrical Engineering, Pusan National University)

** 정회원, *** 학생회원, 국방과학연구소 (Agency for Defense Development)

※ 본 논문은 2009년 국방과학연구소의 “광대역 소나의 신호처리 최적화 기법 연구”에 대한 연구용역으로 이루어 졌음.

접수일자: 2011년12월26일, 수정완료일: 2012년3월19일

두고 있으며^[1], 테스트 셀 (test cell)의 주변 셀들로부터 잡음의 평균 파워를 추정하여 그 값을 통해 얻어지는 문턱 값 (threshold)과 테스트 셀을 비교하여 표적 신호의 유무를 판단한다. 문턱 값은 테스트 셀의 오경보 확률 (false alarm probability)을 일정하게 유지시키도록 주변 잡음의 상태에 따라 적응적으로 결정되는데, 잡음의 파워를 추정하는 데 사용되는 알고리즘의 종류에 따라 검출기의 성능이 달라진다. 잡음이 균질한 (homogeneous) 환경 하에서는 CA (cell averaging) CFAR 알고리즘이 최적의 성능을 보이는 것으로 알려져 있으나, 잡음의 균질성이 보장되지 않는 환경 하에서는 그 성능이 저하되는 단점이 있다^[2].

비균질한 (heterogeneous) 특성을 가지는 잡음 환경에 대처하기 위해 GO (greatest of), OS (ordered statistics), switching CFAR 등과 같은 다양한 알고리즘들이 제안되었으나^[3~8], 이러한 알고리즘들의 경우 주로 특정한 비균질 잡음 환경에서만 우수한 성능을 보이기 때문에 다양한 비균질 잡음 환경에 대처하기 어려운 문제점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 여러 가지 CFAR 알고리즘들을 융합하는 방법들이 제안되었다^[9~10]. 이 중에서 변동 지수 (VI, variability index) CFAR 알고리즘은 MR (mean ratio)과 VI를 이용하여 잡음의 균질 여부, 클러스터 경계의 존재 및 간섭 신호의 유무를 판단하여 CA, GO 및 SO (smallest of) CFAR 알고리즘을 선택적으로 사용함으로써 균질/비균질 잡음 환경에 관계없이 우수한 성능을 보일 수 있도록 하였다^[10].

하지만 변동 지수 CFAR의 경우 다음과 같은 두 가지 경우에 최적의 성능을 보이는 데 어려움이 있다. 첫째, 간섭 신호가 테스트 셀의 양쪽에 모두 존재할 경우, 표적의 검출 확률이 급격히 떨어진다. 둘째, 클러스터 경계가 존재하고 테스트 셀이 클러스터를 포함하고 있지 않은 경우에도 GO CFAR를 이용하므로 문턱 값을 높게 형성하게 되며 이로 인해 검출 확률이 떨어지는 단점이 있다.

본 논문에서는 위의 두 가지 문제를 해결하기 위해 TM (trimmed mean) CFAR와 sub-window를 이용한 향상된 VI CFAR 알고리즘을 제안한다. TM CFAR는 OS 계열 CFAR 알고리즘 중의 하나로서 간섭 신호의 제거에 효과적이다. 따라서, 테스트 셀의 양쪽에 모두 간섭 신호가 존재한다고 판단될 경우 SO CFAR 대신에 TM CFAR를 적용하게 되면 간섭 신호를 효과적으

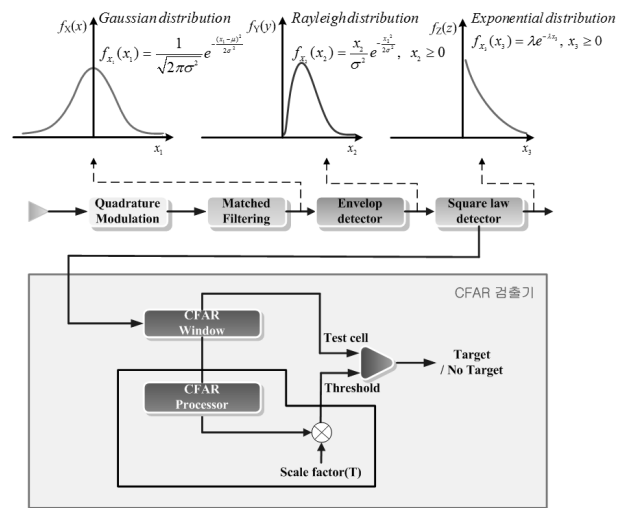


그림 1. CFAR 검출기의 구조
Fig. 1. The structure of a CFAR detector.

로 배제시키고 잡음을 추정할 수 있다. 클러스터의 경계가 존재할 경우 테스트 셀의 근방에 sub-window를 적용하여 클러스터 경계의 위치를 좀 더 세분화 하여 찾을 수 있다. 테스트 셀의 근방에서 클러스터의 경계가 존재할 경우에만 GO CFAR를 적용하고 이외의 경우에는 클러스터의 경계가 존재하지 않는 쪽의 윈도우를 사용하여 잡음을 추정한다. 이로 인해 테스트 셀이 클러스터를 포함하고 있지 않을 경우에 GO CFAR의 사용으로 인하여 불필요하게 문턱 값이 상승해 검출확률이 낮아지는 현상을 방지할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 CFAR 검출기의 구조와 수신 신호에 대한 확률 모델에 대하여 소개하고 III장에서는 융합형 CFAR 알고리즘인 VI CFAR에 대하여 설명한다. IV장에서는 향상된 VI CFAR 알고리즘을 제안하고 V장의 시뮬레이션을 통하여 제안된 알고리즘의 성능을 분석한다. 마지막으로 VI장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. CFAR 검출기의 구조 및 배경 잡음 모델

1. CFAR 검출기의 구조

CFAR 검출기는 그림 1과 같은 구조를 가진다. 윈도우 내의 셀들에 포함된 신호는 배경 잡음, 간섭 신호, 클러스터 등을 포함하는 잡음신호이다. 이로부터 추정되는 잡음 값에 고정 오경보 확률을 유지시키기 위해 결정되는 상수 값(T)을 곱하여 문턱 값(TZ)을 결정한다. 테스트 셀의 신호를 Y라고 할 때, 표적 신호의 유무는 다음과 같이

판단된다.

$$\begin{cases} \text{No target}(H_0) & , \text{ if } Y < TZ \\ \text{Target present}(H_1) & , \text{ if } Y \geq TZ \end{cases} \quad (1)$$

2. 배경 잡음 모델

CFAR 검출기의 우수한 성능을 위해서는 수신 신호에 대한 가정을 실제 신호와 유사하게 하여 이를 바탕으로 문턱 값 결정에 필요한 파라미터를 설정하여야 한다. 수신되는 잡음 신호가 복소 가우시안 분포를 가지며 정합 필터, 포락선 검출기, 자승 검출기의 순으로 처리된다고 하면 CFAR 윈도우에 입력되는 신호는 그림 1에서 보는 바와 같이 지수 분포의 형태를 가진다고 가정된다. 따라서, 수신 신호의 모델은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_X(x) = \frac{1}{2\lambda} e^{-\frac{x}{2\lambda}}, \quad x \geq 0 \quad (2)$$

$$\lambda = \begin{cases} \mu & , \text{ if } H_0 \\ \mu(1+S) & , \text{ if } H_1 \end{cases} \quad (3)$$

여기서, μ 는 잡음의 평균 파워를 의미하고 S 는 표적 신호의 존재 시 신호 대 잡음비 (SNR)을 의미한다. 식 (2)와 식 (3)으로부터 잡음의 평균 파워가 알려져 있는 이상적인 경우의 검출 확률 및 오경보 확률을 다음과 같이 지수의 형태로 표현할 수 있다^[2].

$$P_{fa}^{opt} = P[Y > Y_0 | H_0] = e^{-\frac{Y_0}{2\mu}} \quad (4)$$

$$P_d^{opt} = P[Y > Y_0 | H_1] = e^{-\frac{Y_0}{2\mu(1+S)}} \quad (5)$$

고정 오경보 확률을 이용하여 식 (4)로부터 문턱 값 Y_0 를 구할 수 있으며 위의 두 식으로부터 이상적인 경우의 검출 확률과 오경보 확률은 $P_d^{opt} = (P_{fa}^{opt})^{1/(1+S)}$ 의 관계를 가지는 것을 알 수 있다. 하지만, 잡음의 평균 파워는 알려져 있지 않고 제한된 개수의 셀들에 포함된 잡음 신호를 이용하여 추정하여야 한다. 따라서, 잡음 신호의 특성이 CFAR 검출기의 성능에 매우 큰 영향을 준다. 윈도우 내의 셀에 포함되는 잡음 신호는 균질한 (homogeneous) 신호와 비균질한 (heterogeneous) 신호로 구분할 수 있고 비균질한 신호의 경우 간섭 신호가 존재하는 경우와 클러터의 경계가 존재하는 경우로 모델링할 수 있다^[3].

가. 균질한 잡음 환경

CFAR 검출기는 테스트 셀 주변의 셀들로부터 테스트 셀이 가지는 잡음의 파워를 추정한다. 그림 2와 같이 주변 셀들에 포함된 잡음이 균질상태일 경우 지수 분포를 가지는 각 셀들의 평균 파워가 같다고 가정할 수 있다. 따라서, 균질한 잡음 환경에서는 모든 셀들의 평균을 테스트 셀에 포함된 잡음의 파워라고 추정하는 것이 가장 정확한 추정 방법이다. 이러한 CFAR 기법을 CA (cell averaging) CFAR라고 하며 가장 널리 쓰이는 기법 중의 하나이다^[2]. CA CFAR는 잡음 파워의 추정에 사용되는 윈도우의 크기가 클수록 이상적인 경우에 가까운 성능을 보인다.

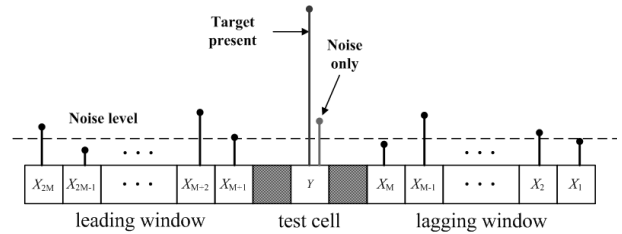


그림 2. 균질한 잡음 환경
Fig. 2. Homogeneous environment.

나. 간섭 신호 (target masking)

균질한 배경 잡음 신호에 간섭 신호 혹은 다수의 표적 신호가 윈도우 내의 셀에 포함되었을 경우를 그림 3에 나타내었다. CA CFAR를 이용하여 잡음의 파워를 추정하는 경우, 간섭 신호로 인해 추정되는 값이 실제 잡음의 파워에 비해 큰 값을 가질 것이고 그에 따라 문턱 값이 높게 설정되어 검출 확률이 낮아지고 오경보 확률 또한 설계된 값 아래로 낮아지게 된다. 이러한 경우에 적합하도록 제안된 CFAR 검출기로는 SO (smallest-of) CFAR, OS (ordered statistics) CFAR, excision CFAR 등이 있으며 잡음 파워의 추정 시에 큰 값을 가지는 셀의 신호를 배제시킴으로써 균질한 잡음 신호만을 이용한다.

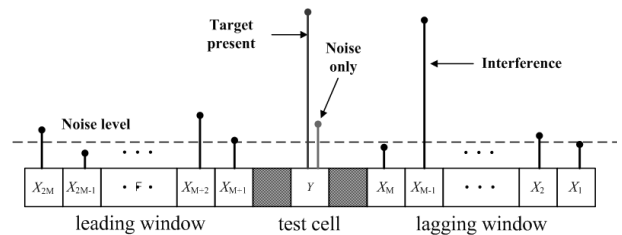
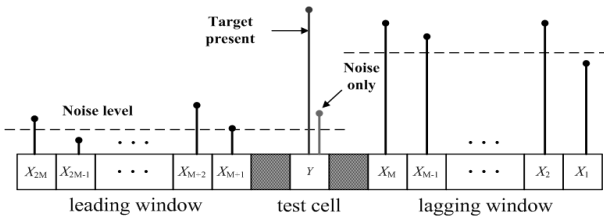


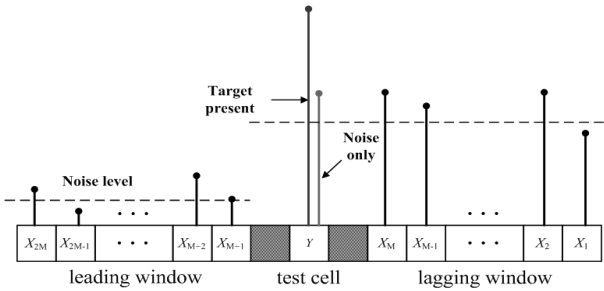
그림 3. 간섭 신호를 포함하는 경우
Fig. 3. A case of including an Interference signal.

다. 클러터 경계 (clutter edge)

윈도우 내에 클러터의 경계가 포함되어 있는 경우를 그림 4에 case 1과 case 2로 구분하여 나타내었다. 클러터의 경계가 존재하는 경우, 잡음의 평균 파워가 다른 두 가지 균질한 잡음이 윈도우 내에 포함되어 있다고 볼 수 있다. Case 1의 경우 잡음의 평균 파워가 낮은 쪽에 테스트 셀이 포함되는 경우이고 case 2의 경우 잡음의 평균 파워가 높은 쪽에 테스트 셀이 포함되는 경우이다. CA CFAR를 이용하면, case 1은 간섭 신호가 포함된 경우와 마찬가지로 추정되는 잡음의 파워가 높아지며 검출 확률 및 오경보 확률이 낮아지는 현상이



(a) case 1



(b) case 2

그림 4. 클러터 경계를 포함하는 경우
Fig. 4. Two cases of including the clutter edge.

발생한다. 반대로 case 2의 경우는 테스트 셀에 포함된 잡음의 평균 파워보다 낮은 값들이 잡음의 추정에 사용되기 때문에 오경보 확률이 높아지는 반면에 테스트 셀의 신호 대 잡음비는 작아지기 때문에 검출 확률은 낮아지는 현상이 발생한다. 이러한 상황에 적합하도록 제안된 CFAR 검출기로는 GO(greatest-of) CFAR와 HCE (heterogeneous clutter estimating)가 있고 높은 쪽의 클러터를 이용하여 잡음의 파워를 추정함으로써 클러터 경계에서 오경보 확률의 상승을 억제시킨다.

비균질 잡음 환경에 대처하기 위해 제안된 단일 CFAR 알고리즘 중에서 가장 널리 사용되는 ML (mean level) CFAR인 CA, GO, SO CFAR와 OS CFAR에 대한 균질 환경에서의 검출 확률 및 오경보 확률과 적용 가능한 비균질 환경에 대한 특성을 표 1에 나타내었다. 여기서 윈도우의 크기는 $N=2M$ 이고 OS CFAR의 경우 k 는 선택되는 셀의 순서이다.

III. 변동 지수 (VI, Variability Index) CFAR

VI CFAR는 mean-level 계열의 CFAR 알고리즘인 CA, GO, SO CFAR를 기반으로 하여 윈도우내의 셀에 포함된 잡음의 상황에 따라 능동적으로 알고리즘을 선택하는 CFAR 검출 기법으로서 그림 5와 같은 구조를 가진다^[10]. 윈도우는 테스트 셀을 기준으로 leading 윈도우와 lagging 윈도우로 나뉘고 각각 윈도우의 평균과 분산을 이용하여 VI (variability Index)와 MR (mean ratio)를 구한 다음 그 값을 이용해 잡음 추정에 사용할 윈도우를 선택한다. VI와 MR은 윈도우에 포함

표 1. ML 계열 및 OS CFAR의 성능
Table 1. Performance of the mean-level CFAR and the OS CFAR.

	균질 환경에서 검출 확률	균질 환경에서 오경보 확률	적용 가능한 비균질 환경
CA CFAR	$(1 + \frac{T}{1+S})^{-N}$	$(1 + T)^{-N}$.
GO CFAR	$2(1 + \frac{T}{1+S})^{-M} - 2 \sum_{i=0}^{M-1} \binom{M+i-1}{i} \cdot (2 + \frac{T}{1+S})^{-(M+i)}$	$2(1+T)^{-M} - 2 \sum_{i=0}^{M-1} \binom{M+i-1}{i} \cdot (2+T)^{-(M+i)}$	클러터 경계
SO CFAR	$2 \sum_{i=0}^{M-1} \binom{M+i-1}{i} \cdot (2 + \frac{T}{1+S})^{-(M+i)}$	$2 \sum_{i=0}^{M-1} \binom{M+i-1}{i} \cdot (2+T)^{-(M+i)}$	간섭 신호
OS CFAR	$\prod_{i=0}^{k-1} \frac{N-i}{N-i + \frac{T}{1+S}}$	$\prod_{i=0}^{k-1} \frac{N-i}{N-i + T}$	간섭 신호

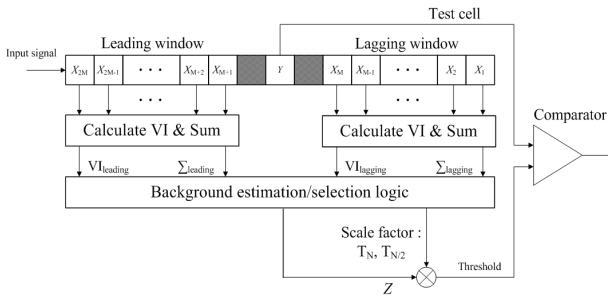


그림 5. Variability index CFAR의 구조
Fig. 5. The structure of the Variability index CFAR.

된 잡음의 특성을 판단하기 위한 것인데, VI를 이용하여 간섭 신호의 존재 여부를 판단하게 되고 MR을 이용하여 클러터 경계의 존재 여부를 판단한다.

VI는 스케일 불변한 특성을 가지는 2차 통계 치로서 통계량이 가지는 물리적 형태 (shape)의 변화를 추정하는 파라미터이며 추정되는 평균 값($\hat{\mu}$)과 분산($\hat{\sigma}$)의 함수로 표현되고 그 표현은 다음과 같다.

$$VI = 1 + \frac{\hat{\sigma}^2}{\hat{\mu}^2} \quad (6)$$

윈도우 내의 셀의 신호가 배경 잡음 및 간섭 신호를 포함하고 있다면 VI는 큰 값을 가지게 되며 VI에 대한 문턱 값(K_{VI})이상의 값을 가지면 윈도우가 간섭 신호를 포함하는 것으로 다음 식과 같이 판단한다.

$$\begin{cases} VI \geq K_{VI}, \text{variable} \\ VI < K_{VI}, \text{invariable} \end{cases} \quad (7)$$

VI 값에 대한 확률밀도함수는 존재하지 않으며 반복실험을 통해 균질한 잡음의 상태를 간섭 신호가 존재한다고 오판단할 확률에 대한 값을 얻을 수 있다.

$$\alpha_0 = P[VI > K_{VI} | \text{Homogeneous}] \quad (8)$$

MR은 leading 윈도우와 lagging 윈도우의 평균값의 비로서, 클러터의 경계가 존재하는지를 판단하는 기준이 되며 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$MR = \frac{\sum_{i=1}^M X_i}{\sum_{i=M+1}^{2M} X_i} \quad (9)$$

VI와 마찬가지로 MR에 대한 문턱 값(K_{MR})과 비교하여 클러터 경계의 존재 여부를 다음 식과 같이 판단한다.

표 2. VI CFAR에서 문턱 값 생성 방법
Table 2. Threshold decision method for VI CFAR.

$VI \geq K_{VI}$		MR	Adaptive threshold
leading	lagging		
No	No	Same	$(\sum_{leading} + \sum_{lagging}) \cdot T_N$
No	No	Different	$\max(\sum_{leading}, \sum_{lagging}) \cdot T_{N/2}$
Yes	No		$\sum_{lagging} \cdot T_{N/2}$
No	Yes		$\sum_{leading} \cdot T_{N/2}$
Yes	Yes		$\min(\sum_{leading}, \sum_{lagging}) \cdot T_{N/2}$

$$\begin{cases} K_{MR}^{-1} \leq MR \leq K_{MR}, \text{ Same mean} \\ \text{Otherwise}, \text{ Different mean} \end{cases} \quad (10)$$

균질한 상태의 잡음을 클러터의 경계가 존재한다고 오판할 확률(β_0)에 대한 식 (11) 을 이용하여 K_{MR} 의 값을 설정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \beta_0 &= 1 - P[1/K_{MR} \leq MR \leq K_{MR} | \text{Homogeneous}] \\ &= 2 \left(1 - \frac{K_{MR}^M}{(M-1)!} \cdot \sum_{r=0}^{M-1} \frac{(r+M-1)!}{r!(K_{MR}+1)^{r+M}} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

VI 및 MR 을 이용한 CFAR 알고리즘의 선택 방법을 표 2에 나타내었다.

$$T_N = (P_{fa})^{-N} - 1 \quad (12)$$

$$T_{N/2} = (P_{fa})^{-N/2} - 1 \quad (13)$$

고정 상수 값은 선택되는 윈도우의 크기에 따라 각각 식 (12)와 식 (13)과 같이 얻을 수 있고 균질 잡음과 leading 윈도우, lagging 윈도우 중에서 어느 한 쪽만 간섭 신호를 포함하고 있을 경우는 CA CFAR와 같이 동작한다. 그리고 양 쪽 윈도우 모두 간섭 신호를 포함하고 있을 때에는 SO CFAR, 클러터 경계를 포함할 시에는 GO CFAR와 같게 동작함으로써 비균질 잡음환경에 적절히 대처할 수 있다.

IV. 제안하는 향상된 VI CFAR 기법

VI CFAR는 잡음을 추정할 때, 비균질한 잡음을 포함하는 윈도우를 배제시킴으로써 다양한 잡음 상황에 대하여 균질 잡음 상태의 성능을 유지하도록 한다. 하지만, 다음 두 가지 상황에서는 잡음을 추정하는 데 있어서 비균질 상태의 잡음을 완전히 배제시키지 못하며 최적의 성능을 보이지 못한다. 첫째, 간섭 신호가 테스

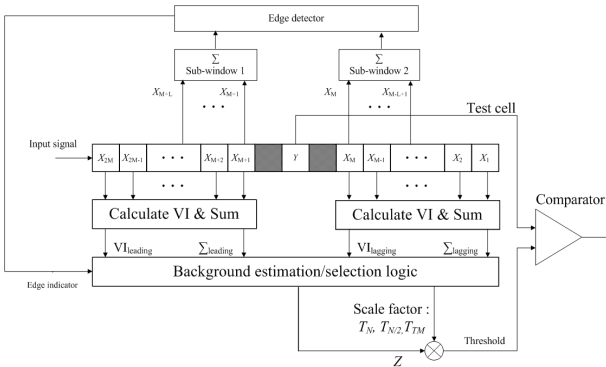


그림 6. 향상된 Variability index CFAR의 구조
Fig. 6. The structure of an improved VI CFAR.

트 셀의 양 쪽에 모두 존재하는 경우이다. 이 때, SO CFAR를 적용하여 잡음의 파워가 작은 어느 한 쪽 윈도우를 사용하게 되는데 양 쪽 모두 간섭 신호를 포함하고 있으므로 잡음의 추정에 간섭신호가 반드시 포함되게 된다. 이로 인해, 검출 확률이 매우 낮아지는 단점을 가진다. 둘째, 클러터 경계가 존재할 시에 GO CFAR가 적용되는데 그림 4(a)와 같이 테스트 셀이 클러터를 포함하고 있지 않는 경우에는 문턱 값이 지나치게 높아져 검출 확률이 매우 낮아지게 된다.

제한하는 CFAR 알고리즘에서는 간섭 신호가 테스트 셀 양 쪽에 모두 존재할 시에 SO CFAR를 대신하여 TM (Trimmed Mean) CFAR를 사용하여 간섭 신호를 제거한다. TM CFAR는 윈도우 내에 포함된 셀 중에서 가장 큰 값을 가지는 k_1 개와 가장 작은 값을 가지는 k_2 개를 제거한 후 나머지 셀에 대해서 CA CFAR를 적용하게 된다. TM CFAR를 이용하여 결정되는 문턱 값은 다음 식과 같이 표현된다.

$$TZ = T_{TM} \cdot \sum_{j=k_1+1}^{N-k_2} X_{(j)} \quad (14)$$

여기서, $X_{(j)}$ 는 j 번째 크기를 갖는 셀의 값이고 T_{TM} 은 TM CFAR에 대한 고정 상수 값으로서 TM CFAR에 대한 오경보 확률을 이용하여 구할 수 있다^[5]. TM CFAR를 사용하게 되면 k_1 개 이하의 간섭 신호를 제거할 수 있고 균질한 상태의 셀만을 사용하여 잡음을 추정할 수 있다.

클러터 경계가 존재하는 경우 테스트 셀 양 쪽에 $N/2$ 보다 작은 L 의 크기를 가지는 sub-window를 사용하여 평균값의 비율(MR')을 계산함으로써 클러터 경계가 테스트 셀로부터 양 쪽으로 L 개의 셀 이내에 있는 지를 판단한다.

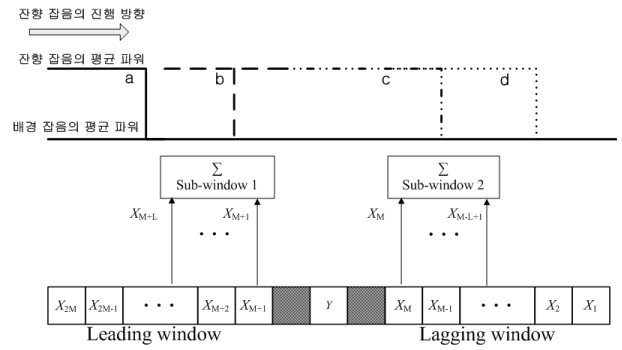


그림 7. 클러터 경계의 위치
Fig. 7. Position of the clutter edge.

$$MR' = \frac{\sum_{i=M-L+1}^M X_i}{\sum_{i=M+1}^{M+L} X_i} \quad (15)$$

$$\begin{cases} K'_{MR}^{-1} \leq MR' \leq K'_{MR}, & \text{Same mean} \\ \text{Otherwise} & \text{, Different mean} \end{cases} \quad (16)$$

이에 따른 문턱 값 설정 방법은 표 3에 나타나 있다. Sub-window를 이용하여 평균값을 비교하면 테스트 셀의 근처에 클러터 경계가 존재하는지를 판단할 수 있는데, 그림 7의 b, c와 같이 테스트 셀의 근방에서 클러터의 경계가 존재할 경우에는 sub-window 간의 평균의 차이가 크게 나타나므로 클러터의 경계가 테스트 셀에 가깝게 위치한다고 할 수 있다. 그림 7의 a, d에 클러터의 경계가 존재할 경우에는 sub-window 간의 평균값은 거의 같아지고 leading 윈도우와 lagging 윈도우 중에서 클러터가 존재하는 윈도우의 VI 값이 커지는 현상이 발생한다. 따라서, VI 값이 작은 쪽의 윈도우를 선택한다면 테스트 셀의 통계적 특성과 유사한 윈도우를 이용하여 잡음의 파워를 추정할 수 있다.

V. 모의 실험 결과

제한된 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 모의 전산 실험을 통하여 CA, OS, VI CFAR와의 검출 확률 및 오경보 확률을 비교하였다. 식 (8), (11)에 나타난 바와 같이 균질한 상태의 잡음을 간섭신호가 존재한다고 오관할 확률과 클러터의 경계가 존재한다고 오관할 확률인 α_0 , β_0 를 각각 5% 이하로 하기 위해 $K_{VI} = 4.76$, $K_{MR} = 1.806$, $K'_{MR} = 1.6$ 으로 설정하였고 sub-window의 크기 L 은 12로 설정하였다^[11]. 설계된 고정 오경보

확률은 10^{-4} 이며 간섭 신호와 표적 신호의 크기는 같다고 가정하였고 세 가지 잡음 환경에 대한 모의 전산 실험 결과를 나타내었다.

1. 균질한 잡음 환경

균질한 환경에서는 검출 확률을 통해 CFAR loss를 얻을 수 있는데 임의의 검출 확률을 얻기 위한 SNR을 이상적인 경우와 비교한 차이를 CFAR loss라고 한다. 그림 8에서 보는 바와 같이 모든 알고리즘이 1 dB 이하의 낮은 CFAR loss를 보인다. 따라서, 모든 알고리즘들이 균질한 잡음 환경에서 최적에 가까운 성능을 보이는 것을 알 수 있다.

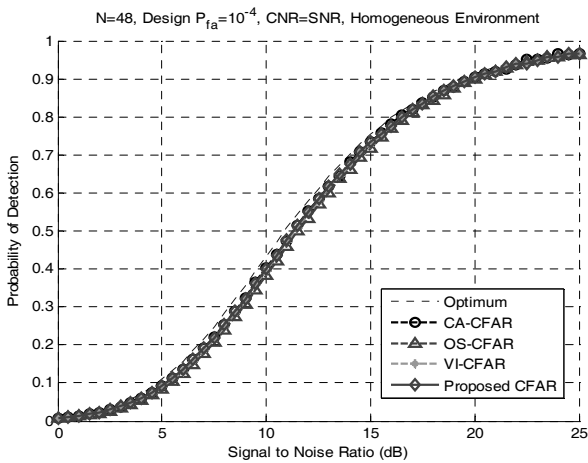


그림 8. 균질한 환경에서 검출 확률 비교
Fig. 8. Detection probability in homogeneous environment.

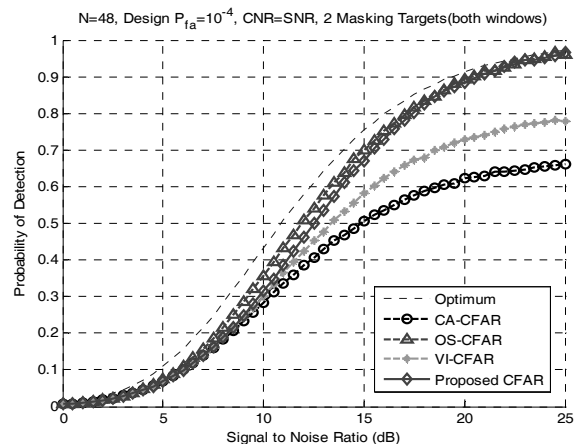


그림 9. 테스트 셀의 양 쪽에 간섭신호가 존재할 경우의 검출 확률 비교
Fig. 9. Detection probability when the interfering targets are included in both side of window.

2. 간섭 신호 잡음 환경

테스트 셀의 양 쪽에 모두 간섭 신호가 존재하는 경우 VI CFAR는 검출확률 측면에서 성능의 저하를 겪는다. 테스트 셀의 양 쪽에 각각 하나의 간섭 신호가 존재할 경우, SNR에 대한 검출 확률 및 오경보 확률을 그림 9와 그림 10에 나타내었다. VI CFAR에서 검출 확률 및 오경보 확률이 모두 낮아지는 현상이 발생하는 반면 제안된 방법에서는 검출 확률 및 오경보 확률이 낮아지는 폭이 매우 작은 것을 확인할 수 있으며 간섭 신호 환경에서 강인하도록 설계된 OS CFAR가 가장 좋은 성능을 보이는 것을 알 수 있다.

3. 클러스터 경계 잡음 환경

신호 대 잡음비 (SNR)와 클러스터 대 잡음비 (CNR)가 각각 10 dB일 때, 클러스터 경계의 위치에 따른 검출 확률 및 오경보 확률 그리고 선택되는 윈도우에 따른 확률을 그림 11과 그림 12에 나타내었다. 테스트 셀이 클러스터를 포함하고 있는 경우에는 VI CFAR와 검출 확률 및 오경보 확률이 동일하지만 테스트 셀이 클러스터를 포함하고 있지 않은 경우에는 제안하는 방법이 오경보 확률을 더욱 잘 유지시키며 높은 검출 확률을 보이는 것을 확인할 수 있다. 단일 알고리즘인 OS CFAR와 CA CFAR의 경우는 오경보 확률이 상승하므로 클러스터 경계가 존재하는 경우는 성능이 좋지 않은 것을 확인할 수 있다. 그림 13과 그림 14를 통해 클러스터의 개수에 따라 선택되는 윈도우의 확률을 VI CFAR와 비교하였다.

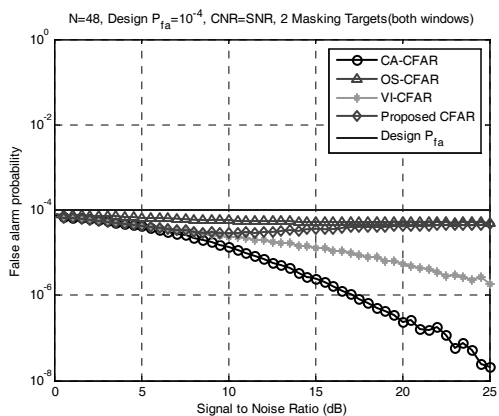


그림 10. 테스트 셀의 양 쪽에 간섭신호가 존재할 경우의 오경보 확률 비교
Fig. 10. Detection probability when the interfering targets are included in both side of window.

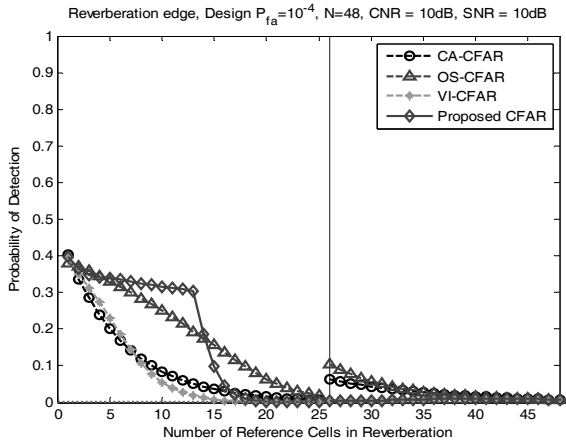


그림 11. 클러터 경계에서 검출 확률
Fig. 11. Detection probability in the clutter edge.

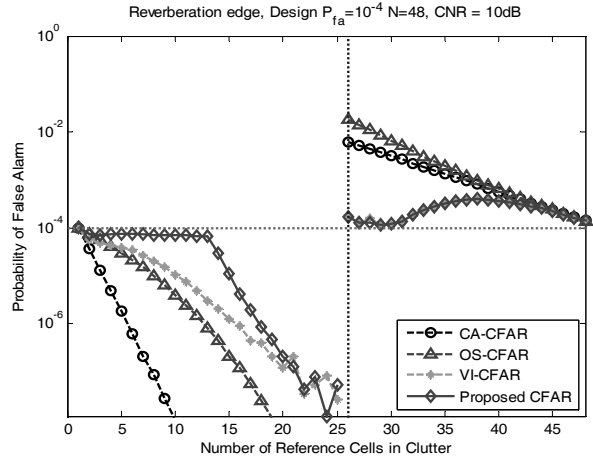


그림 12. 클러터 경계에서 오경보 확률
Fig. 12. False alarm probability in the clutter edge.

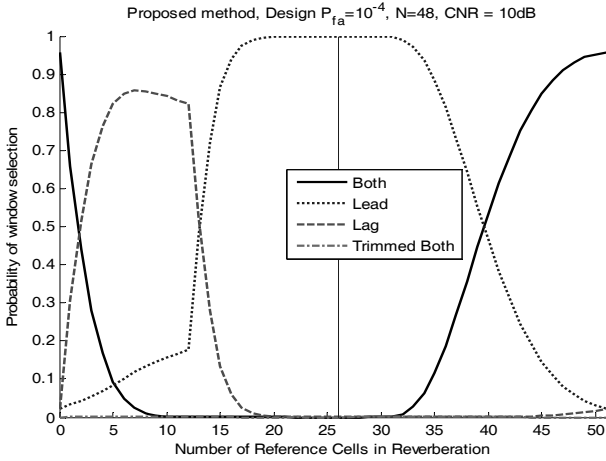


그림 13. 제안된 방법의 클러터 경계에서 윈도우 선택 확률
Fig. 13. Window selection probability of the proposed method in the clutter edge.

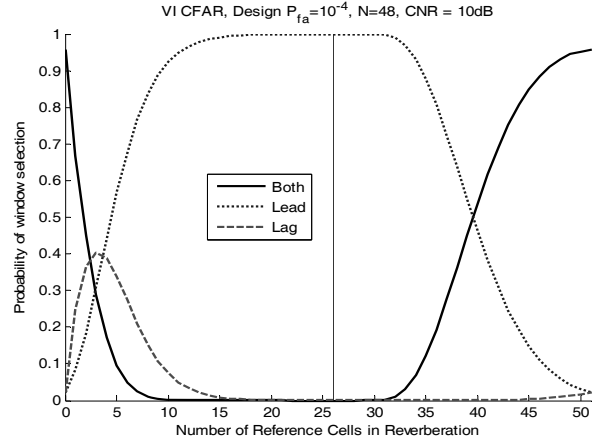


그림 14. VI CFAR의 클러터 경계에서 윈도우 선택 확률
Fig. 14. Window selection probability of the VI CFAR in the clutter edge.

클러터 경계가 sub-window에 나타나기 이전($L=12$)에도 VI CFAR가 잡음의 파워 값이 큰 쪽인 leading 윈도우를 사용하여 잡음을 추정하는 것과 달리 제안된 방법에서는 lagging 윈도우가 테스트 셀과 통계적 특성이 유사하다고 판단하여 잡음 추정에 사용되는 것을 알 수 있다. 이로 인해 검출 확률 및 오경보 확률이 불필요하게 낮아지지 않게 된다.

VI. 결 론

본 논문에서는 다양한 비균질 잡음환경에 대처하기 위해 TM CFAR와 sub-window를 사용하여 VI CFAR에서 발생할 수 있는 두 가지 문제를 해결함으로써 향상된

성능을 보이는 VI CFAR를 제안하였다. 제안된 방법은 검출 확률 및 오경보 확률 측면에서 VI CFAR에 비해 좋은 성능을 보이며 OS CFAR, CA CFAR 등의 단일 CFAR 검출기에 비하여 비균질 환경에 잘 대처할 수 있었다. 따라서, 본 논문에서 제안하는 향상된 VI CFAR 알고리즘은 소나 시스템과 같은 복잡한 잡음 환경에서 목표물의 탐지 성능을 향상시키기 위한 효과적인 방법을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Alberto Leon-Garcia, "Probability statistics and random processes for electrical engineering third

- edition," *Pearson*, pp.453-466, 2008.
- [2] P.P.Gandhi, "Analysis of CFAR processors in nonhomogeneous background," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol.24, No.4, pp.427-445, July1988.
- [3] Rohling, H., "Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol 19, No. 4, pp.608-621, July 1983.
- [4] T.-T.V.Cao, "Constant false alarm rate algorithm based on test cell information," *IET Radar Sonar Navig*, Vol.2, No.3, pp.200-213, June 2008.
- [5] El Mashade, M.B., "Detection performance of the trimmed-mean CFAR processor with noncoherent integration," *Radar, Sonar, and Navigation, IEE proceedings*, Vol. 142, No.1, pp.18-24, Feb 1995.
- [6] Ritcey, J.A, "Performance analysis of the censored mean-level detector," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 22, No. 4, pp.443-454, July 1986.
- [7] Finn, H.M, "A CFAR design for a window spanning two clutter fields," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol 22, No. 2, pp.155-169, Mar 1986.
- [8] 홍성원, 한동석, "다중 수중 표적 환경에 강인한 OSR CFAR 알고리즘," 전자공학회논문지, 제 48 권 TC편, 제4호, 47-52쪽, 2011년 4월
- [9] R.Srinivasan, "Robust radar detection using ensemble CFAR processing," *Radar, Sonar and Navigation, IEE proceedings*, Vol 147, No. 6, pp.291-297, Dec 2000.
- [10] M.E.Smith, P.K.Varshney, "Intelligent CFAR processor based on data variability," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol.36, No.3, pp.837-847, July 2000.
- [11] M.E.Smith, "Application of the Variability Index(VI) statistic to radar CFAR processing," *Doctor's thesis*, Syracuse University, Aug 1997.

저 자 소 개



신 종 우(학생회원)
 2010년 부산대학교 전자전기
 공학부 학사 졸업.
 2012년 부산대학교 전자전기
 공학과 석사 졸업.
 2012년~현재 부산대학교 전자
 전기공학과 박사과정.
 <주관심분야 : 레이더 및 소나 시스템, 통신 신호
 처리, 스마트 안테나>



이 동 훈(학생회원)
 1994년 경북대학교 전자전기공학
 과 학사 졸업.
 1996년 경북대학교 전자전기공학
 과 석사 졸업.
 1996년~현재 국방과학연구소 선
 임연구원.
 <주관심분야 : 통신 신호처리, 멀티미디어 시스
 템, 소나시스템>



김 완 진(정회원)
 2005년 부산대학교 전자전기통신
 공학부 학사 졸업.
 2007년 부산대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 2011년 부산대학교 전자전기공학
 과 박사 졸업.
 2011년~현재 국방과학연구소 선임연구원.
 <주관심분야 : 적응신호처리, 레이더 및 소나시스
 템, 디지털통신, RFID, OFDM>



김 형 남(정회원)- 교신저자
 1993년 포항공과대학교 전자전기
 공학과 학사 졸업.
 1995년 포항공과대학교 전자전기
 공학과 석사 졸업.
 2000년 포항공과대학교 전자전기
 공학과 박사 졸업.
 2000년 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부
 박사후 연구원.
 2003년 한국전자통신연구원 무선방송연구소
 선임 연구원.
 2007년 부산대학교 전자공학과 조교수.
 2012년 부산대학교 전자전기공학부 부교수.
 2012년~현재 부산대학교 전자공학과 교수.
 <주관심분야 : 적응신호처리, 레이더 및 소나시스
 템, 생체신호처리, 디지털TV, 디지털통신, OFDM
 시스템, RFID, 멀티미디어 시스템>



도 대 원(정회원)
 1996년 포항공과대학교 전자전기
 공학과 학사 졸업.
 1998년 포항공과대학교 전자전기
 공학과 석사 졸업.
 2003년 포항공과대학교 전자전기
 공학과 박사 졸업.
 2003년 LG전자기술원 모바일멀티미디어연구소
 선임연구원.
 2007년~현재 국방과학연구소 선임연구원.
 <주관심분야 : 통신 신호처리, 멀티미디어 신호처
 리, 레이더 및 소나시스템>