

비균일 환경에서 표적 검파를 위한 순서통계에 근거한 일정오경보율 검파기의 성능 해석

正會員 韓 東 錫*

Performance Analysis of CFAR Detectors Based on Order Statistics for Nonhomogeneous Backgrounds

Dong-Seog Han* *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 순서 통계를 이용한 OSCA(order statistics cell averaging) 일정오경보율(constant false alarm rate, CFAR) 검파기를 제안하고, 이것의 성능을 균일 잡음 환경, 클러터 경계 및 다중 표적 환경에서 성능을 해석한다. 그리고 기존의 순서통계에 근거한 일정오경보율 검파기로 알려진 OSGO(order statistics greatest of) 및 OSSO(order statistics smallest of) CFAR 검파기의 성능을 비균일 잡음 환경에서 해석한다. 제안한 OSCA CFAR 검파기의 성능을 OS, OSGO, OSSO CFAR 검파기와 비교한 결과, OSCA CFAR 검파기가 다른 검파기에 비하여 균일 배경 잡음 및 다중 표적 환경에서 우수한 성능을 보였다. 그리고 제안된 검파기는 OS CFAR 검파기의 수행 시간의 1/2 정도의 시간을 요구하여 고속 검파에 상당히 유리함을 보여주었다.

ABSTRACT

In this paper, we first propose a modified OS CFAR detector called the order statistics cell averaging(OSCA) CFAR detector and analyze its performance for a Rayleigh target in homogeneous backgrounds, clutter edges, and multiple target environments. Then, we extend the analysis of the order statistics greatest of(OSGO) and the order statistics smallest of(OSSO) CFAR detectors for a Rayleigh target to nonhomogeneous environments. Computer simulation results show that the OSCA CFAR detector has superior performance to OS, OSGO, and OSSO CFAR detectors in homogeneous and multiple target environments. And the proposed detector shows its robustness for fast detection because it requires half the processing time of the OS CFAR detector.

*경북대학교 공과대학 전자·전기공학부
論文番號:97147-0506
接受日字:1997年 5月 6日

I. 서 론

일정오경보율(CFAR) 검파기는 레이더 반사 신호에서 표적 신호의 존재 여부를 가리기 위한 검파기의 일종이다. CFAR 검파기는 일정 오경보 확률을 유지하면서 검파 확률을 최대화하는 것이 그 목표이다. 가장 일반적인 형태의 CFAR 검파기는 반사된 레이더 신호의 평균 값을 구해 이값보다 큰 것을 표적 신호로 인식하는 방법으로 이러한 종류에는 CA(cell averaging), GO(greatest of), SO(smallest of) CFAR 검파기가 있다. CA CFAR 검파기는 표적의 주위 환경이 균일하여 반사된 신호가 지수 분포를 가지며 통계적으로 표본 데이터는 서로 독립적이고 균일하게 분포된 경우에 최고의 검파 확률을 가지는 검파기로 알려져 있다. 그러나 배경 잡음 환경이 급격히 변화하는 클러스터 경계나 표적 주위에 다른 표적이 같이 존재하는 다중 표적 환경에서는 검파 성능이 급격히 나빠지는 단점을 가진다[1].

Rohling[1]은 그림 1과 같은 구조를 가진 순서 통계를 이용한 새로운 CFAR 검파기인 OS CFAR 검파기를 제안하였다. 이것은 균일 잡음 환경에서는 CA CFAR 검파기보다는 약간의 검파 손실을 가지나 비균일 환경에서는 우수한 성능을 보인다. 그러나 이것은 수신된 데이터를 크기순으로 정렬하는 과정을 필

요로 하므로 상당한 계산량을 요구한다. 계산량을 감소시키고 OS CFAR 검파기의 성능을 유지하기 위한 노력으로 Elias-fuste등은 OSGO CFAR 및 OSSO CFAR 검파기를 제안하였다[2].

본 논문에서는 그림 2에 보인 OSCA CFAR 검파기라는 새로운 검파기를 제안하고 이것의 성능을 균일 환경 및 비균일 환경하에서 해석한다. 그리고 기존에 비균일 환경에서의 성능 해석이 되지 않았던 OSGO와 OSSO CFAR 검파기의 성능을 해석하여 OS, OSCA, OSGO, OSSO CFAR 검파기의 성능을 다양한 잡음 환경에서 비교한다. 또한 제안된 검파기의 계산량을 OS CFAR 검파기와 비교하여 제안된 검파기의 우수성을 보였다.

본 논문은 다음과 같은 구성으로 이루어져 있다. 제1장의 서론에 이어 제2장에서는 CFAR 검파기의 성능 해석에 필요한 일반적인 검파 이론과 함께 기존의 OS CFAR 검파기의 성능에 대하여 다룬다. 그리고 OSCA, OSGO, OSSO CFAR 검파기의 성능 해석에 대하여 제3장, 제4장, 제5장에서 각각 다룬다. 그리고 제6장에서 각 검파기의 계산량을 비교한다. 그리고 제7장에서 전산모의실험 결과와 분석결과를 제시하고, 제8장의 결론을 끝으로 본 논문을 마친다.

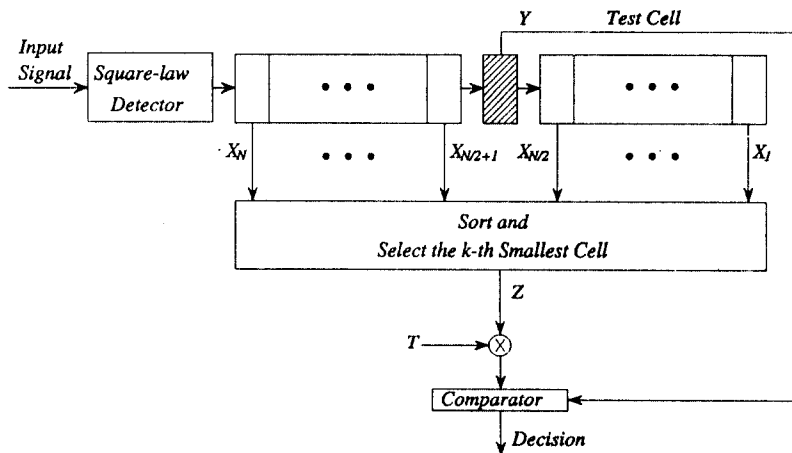


그림 1. OS CFAR 검파기의 블록도.

Fig. 1 Block diagram of the OS CFAR detector.

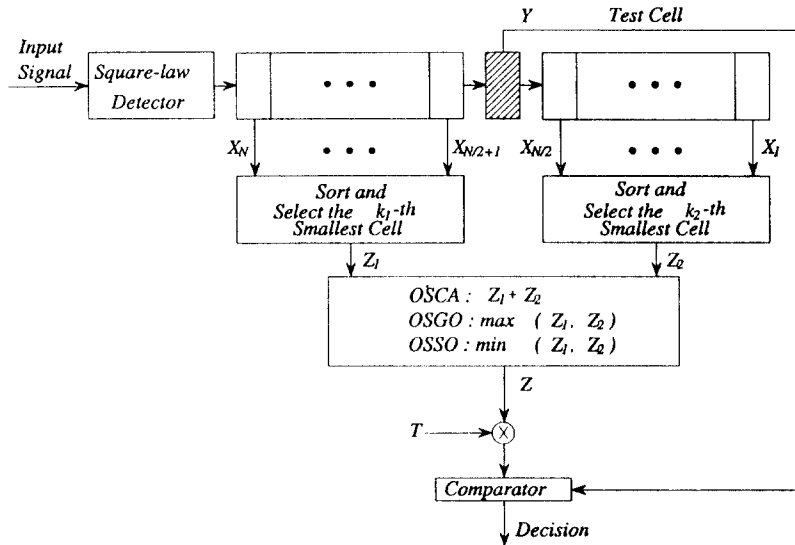


그림 2. 변형된 OS CFAR 검파기의 블록도.
Fig. 2 Block diagram of the modified OS CFAR detector.

II. CFAR 검파기의 해석과 OS CFAR 검파기의 성능

그림 1에 일반적인 CFAR 검파기의 구조를 나타내었다. 먼저 반사된 레이더 신호는 제곱기를 거쳐 시프터 레지스터에 저장된다. 그리고 표본화된 시간이 짧을수록 가까운 거리에서 반사된 신호라고 보면 된다. OS CFAR 검파기에서는 시험셀 Y 에 저장된 데이터가 표적 신호에서 반사된 신호인지를 판단하기 위하여 먼저 Y 에 포함된 배경 잡음 신호의 크기를 예측한다. 그리고 Y 에 저장된 데이터가 예측된 배경 잡음 신호와 어떤 계수의 곱 신호보다 크다면 Y 는 표적에서 반사된 신호로 판단을 하게 된다. 이 때 배경 잡음을 예측하는 방법은 시험셀을 중심으로 좌우에 X_1, \dots, X_N 의 N 개 기준셀의 데이터를 크기대로 정렬한 후 k 번째 작은 셀을 배경 잡음의 크기 Z 로 예측한다. 즉, $X_{(1)} \leq X_{(2)} \leq \dots \leq X_{(k)} \leq \dots \leq X_{(N)}$ 이고 $Z = X_{(k)}$ 가 된다. 여기서 X_1, \dots, X_N 의 N 개의 데이터를 기준창이라 한다. 시험셀 Y 에서 표적의 존재 여부는 $Y \geq TZ$ 인 경우 검파기는 테스트 셀의 위치에 표적이 존재하는 것으로 판단을 하게 된다. 여기서 T 는 어떤 상수로 다음에 설명을 한다.

배경 잡음이 균일한 환경에서 CFAR 검파기의 검파 성능을 분석하기 위하여 제곱기를 거친 반사된 레이더 신호는 다음과 같은 지수 확률밀도함수(pdf)를 가지며 표본간 독립이고 균일 분포(i.i.d)를 가진다.

$$f(x) = 1/(2\lambda) \exp\{-x/(2\lambda)\}, \quad x \geq 0. \quad (1)$$

검파기가 표적이 없다고 판단할 때를 가설 H_0 라고 하고, 이 때 λ 는 총 배경 잡음과 열잡음의 합 전력(μ)과 같다. 표적이 있다고 판단할 경우를 가설 H_1 이라 하고, 이 때 λ 는 표적의 평균 신호대 잡음비(SNR)를 S 라고 할 경우 $\mu(1+S)$ 가 된다. 그리고 표적 신호는 가장 많이 사용되는 Swerling I 모델[1]로 가정하였다.

일반적으로 레이더 신호의 환경은 다음과 같은 세 가지 경우로 나눌 수 있다[1]. N 개의 모든 기준창에 저장된 값이 균일한 잡음 환경에서부터 반사된 신호일 경우, 기준창내의 모든 신호는 동일한 잡음 전력을 가지므로 $\lambda = \mu$ 라고 할 수 있다. 기준창의 일부는 $\lambda = \mu_0$ 인 열잡음에 의한 반사신호이고, 나머지 셀은 클러터 대 열잡음비(CNR)가 C 일 때, $\lambda = \mu_0(1+C)$ 인 클러터와 열잡음에 의해 반사된 신호로 이루어져 배경 잡음 환경이 급격히 변화하는 클러터 경계 환경을 고

러할 수 있다. 그리고 마지막으로 시험셀 주위에 다른 표적 신호가 존재할 경우를 다중 표적 환경이라고 하고, 이러한 간섭 표적에서 반사된 신호를 포함하는 셀의 전력은 $\lambda = \mu(1 + I)$ 가 된다. 여기서, I 는 간섭 표적 대 총 잡음비(INR)를 의미한다. 이 경우 나머지 셀은 균일 잡음이 존재하는 경우로 $\lambda = \mu$ 로 가정한다.

본 논문에서는 일반성을 잃지않으면서 해석을 단순히 하기 위하여 $\lambda = \mu = 1/2$ 로 가정하여 검파기의 성능을 해석하였다. OS CFAR 검파기의 경우 $Z = X_{(k)}$ 이고, 이것의 pdf는 다음과 같다[1, 3].

$$f_k^{OS}(z) = k \binom{N}{k} [1 - F_X(z)]^{N-k} [F_X(z)]^{k-1} f_X(z) \quad (2)$$

$$= k \binom{M}{k} (1 - e^{-z})^{k-1} e^{-(N-k+1)z}$$

여기서 f_X 와 F_X 는 각각 랜덤 변수 X 의 pdf와 누적분포함수(cumulative distribution function, cdf)이다. OS CFAR 검파기의 균일 환경하에서의 오경보율은 다음과 같이 주어진다.

$$P_k^{OS} = E_Z[\Pr\{Y \geq TZ | H_0\}]$$

$$= M_Z[T/(2\mu)] \quad (3)$$

$$= \prod_{i=0}^{k-1} \frac{N-i}{N-i+T}$$

여기서 $M_Z[s] = E[\exp(-Zs)]$ 로 랜덤 변수 Z 의 모멘트 발생함수(moment generating function, mgf)이다. CFAR 검파기의 문턱값을 결정하기 위한 상수 T 는 기준치의 길이 N 과 원하는 오경보율 P_{fa}^{OS} 가 주어진 경우 식(3)을 이용하여 구할 수 있다. 균일 잡음 환경에서 OS CFAR 검파기의 검파확률은 식(3)에서 T 를 $T/(1+S)$ 로 치환하여 구할 수 있다. 검파 확률을 결정하는 또 하나의 척도로 평균 검파 문턱값(average detection threshold, ADT)라는 것이 있으며, 이것은 다음과 같이 정의 된다.

$$ADT = \frac{E(TZ)}{2\mu} = -T \frac{d}{dT} M_Z\left(\frac{T}{2\mu}\right) \Big|_{T=0} \quad (4)$$

ADT는 검파 확률과 직접 연관이 있는 것으로서 ADT가 커질수록 검파 확률은 감소하게 된다[1]. 그러므로 상수 T 를 고정시키고 ADT를 관측하면 CFAR 검파기간의 검파 성능을 대략 비교할 수 있게된다. OS CFAR검파기의 경우 ADT는 다음과 같이 주어진다.

$$ADT_{OS} = T \sum_{k=0}^{N-1} 1/(N-i) \quad (5)$$

클러터 경계와 다중 표적이 존재하는 환경에서의 오 경보 확률을 해석하기 위해서는 N 개의 표본 데이터 중 k 번째 작은 데이터의 pdf가 필요하다. 이것을 구하기 위하여 N 개의 기준셀중 r 개의 셀에는 신호 전력이 $(1+C)/2$ 인 클러터와 열잡음에서 반사된 데이터가 저장 되어있고, 나머지 $N-r$ 개의 셀에는 잡음 전력이 $1/2$ 인 열잡음 신호가 저장된 경우를 고려하자. 이러한 환경에서 Z 의 cdf는 다음과 같다[3].

$$F_Z(z) = \sum_{i=k}^N \sum_{L=\max(0, i-r)}^{\min(i, N-r)} \binom{N-r}{L} \binom{r}{i-L} e^{-(N-r-L)z} \times (1 - e^{-z})^L e^{-(r-i+L)z/(1+C)} [1 - e^{-z/(1+C)}]^{i-L} \quad (6)$$

만약 시험셀에 저장된 데이터가 클러터가 없는 영역에 속해있다면, 오경보확률은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{fa,edge}^{OS} = T \int_0^\infty F_Z(z) e^{-Tz} dz$$

$$= T \sum_{i=k}^N \sum_{L=\max(0, i-r)}^{\min(i, N-r)} \binom{N-r}{L} \binom{r}{i-L} \sum_{j=0}^{i-L} (-1)^j \binom{i-L}{j} B(\alpha, \beta) \quad (7)$$

여기서 $B(\alpha, \beta)$ 는 베타 함수이고 다음과 같다[4].

$\alpha = T + N - r - L + (r - i + j + L)/(1 + C)$, $\beta = L + 1$ 이다. 그런데 시험셀의 데이터가 클러터 영역에서 반사된 데이터인 경우에는 식(7)에서 T 를 $T/(1+C)$ 로 치환하면 $P_{fa,edge}^{OS}$ 를 구할 수 있다.

다중 표적 환경에서 검파확률 P_d^{OS} 는 식(7)에서 T 를 $T/(1+S)$ 로 치환하고, C 를 I 로 치환하면 구할 수 있다. 그리고 이 때 r 은 기준창내에 존재하는 간섭 표적의 갯수가 된다.

III. OSCA CFAR 검파기

시험셀의 왼쪽에 있는 기준창 내의 $N/2$ 개의 데이터 중 그 크기가 k_1 제 작은 데이터와 시험셀 오른쪽에 있는 기준창 내의 $N/2$ 개의 데이터중 그 크기가 k_2 제 작은 데이터의 합을 배경 잡음으로 고려하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Z = Z_1 + Z_2 \quad (8)$$

그러므로 Z의 pdf와 mgf는 각각 다음과 같다.

$$f_z^{OSCA}(z) = \int_0^z f_{z_1}(z-y)f_{z_2}(y) dy, \quad z > 0 \quad (9)$$

$$M_Z(s) = M_{Z_1}(s)M_{Z_2}(s) \quad (10)$$

균일 잡음 환경에서 OSCA CFAR 검파기의 오경 보확률은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{fa}^{OSCA} = M_{Z_1}[T/(2\mu)]M_{Z_2}[T/(2\mu)] \\ = \prod_{i=0}^{k_1-1} \frac{N/2-i}{N/2-i+T} \prod_{j=0}^{k_2-1} \frac{N/2-j}{N/2-j+T} \quad (11)$$

그리고 검파 확률 P_d^{OSCA} 은 식(11)에서 T를 $T/(1+S)$ 로 바꾸면 된다.

OSCA CFAR 검파기의 ADT는 식(4)의 정의에 따라 구하면 다음과 같이 주어진다.

$$ADT_{OSCA} = T \left\{ \sum_{i=0}^{k_1-1} \frac{1}{N/2-i} + \sum_{j=0}^{k_2-1} \frac{1}{N/2-j} \right\} \quad (12)$$

클러스터 경계 환경에서 시험 셀이 클러스터가 없는 곳에 존재한다면 식(7)에서 OSCA 검파기의 검파 확률 $P_{fa, edge}^{OSCA}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$P_{fa}^{OSCA} = P_{fa, edge}^{OS} (k_1, N/2, r_1, T) P_{fa, edge}^{OS} (k_2, N/2, r_2, T) \quad (13)$$

여기서 $P_{fa, edge}^{OS}(k, N, r, T)$ 는 식(7)에서 기준치의 길이가 N, 클러스터에서 반사된 데이터를 저장하고 있는 셀(클러스터 셀)의 갯수가 r, $Z = X(k)$, 그리고 식(11)에서 구한 검파기의 문턱값 T를 의미한다. 식(13)에서 r_1 과 r_2 는 각각 시험셀을 중심으로 왼쪽 기준창과 오른쪽 기준창에 존재하는 클러스터 셀의 갯수를 의미한다. 시험셀이 클러스터 영역 있을 경우, OSCA CFAR 검파기의 검파 확률 $P_{fa, edge}^{OSCA}$ 는 식(13)에서 T를 $T/(1+C)$ 로 치환하면 된다.

다중 표적 환경에서 OSCA CFAR 검파기의 검파 확률은 식(13)에서 T를 $T/(1+S)$ 로 치환하고 C를 I로 치환하면 된다.

IV. OSGO CFAR 검파기

OSGO CFAR 검파기는 시험셀의 왼쪽 및 오른쪽

기준창에서 각각 추출한 기준값 $Z_1 = X(k_1)$ 과 $Z_2 = X(k_2)$ 중 큰 값을 배경 잡음으로 간주한다. 그러므로

$$Z = \max(Z_1, Z_2) \quad (14)$$

이고, Z의 pdf는 다음과 같다.

$$f_z^{OSGO}(z) = f_{z_1}(z)F_{z_1}(z) + f_{z_2}(z)F_{z_2}(z) \quad (15)$$

균일 배경 잡음 환경하에서 OSGO CFAR 검파기의 오경보확률은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{fa}^{OSGO}(z) = \int_0^\infty f_{z_1}(z)F_{z_1}(z)e^{-Tz} dz + \int_0^\infty f_{z_2}(z)F_{z_2}(z)e^{-Tz} dz \\ = k_1 \binom{N/2}{k_1} \sum_{i=k_1}^{N/2} \binom{N/2}{i} B(N-k_1-i+T+1, k_1+i) \\ + k_2 \binom{N/2}{k_2} \sum_{i=k_2}^{N/2} \binom{N/2}{i} B(N-k_2-i+T+1, k_2+i). \quad (16)$$

균일 잡음 환경에서 OSGO 검파기의 검파 확률 P_d^{OSGO} 는 식(16)에서 T를 $T/(1+S)$ 로 치환한 것이 된다.

OSGO CFAR 검파기의 ADT는 다음과 같이 주어진다.

$$ADT_{OSGO} = Tk_1 \binom{N/2}{k_1} \sum_{i=k_1}^{N/2} \binom{N/2}{i} \\ \sum_{j=0}^{k_1+i-1} \frac{1}{N-j} B(N-k_1-i+1, k_1+i) \\ + Tk_2 \binom{N/2}{k_2} \sum_{i=k_2}^{N/2} \binom{N/2}{i} \\ \sum_{j=0}^{k_2+i-1} \frac{1}{N-j} B(N-k_2-i+1, k_2+i) \quad (17)$$

클러스터 경계 환경에서 만약 시험셀이 클러스터가 없는 부분에 존재한다면 OSGO CFAR 검파기의 오경보확률은 식(6)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{fa, edge}^{OSGO} = \int_0^\infty f_{z_1}(z)F_{z_1}(z)e^{-Tz} dz + \int_0^\infty f_{z_2}(z)F_{z_2}(z)e^{-Tz} dz \\ = P_{fa1, edge}^{OSGO} + P_{fa2, edge}^{OSGO} \quad (18)$$

위 식(18)을 정리하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$P_{fa1, edge}^{OSGO} = \sum_{i_1=k_1}^{N/2} \sum_{L_1=\max(0, i_1-r_1)}^{\min(i_1, N/2-r_1)} \binom{N/2-r_1}{L_1} \binom{r_1}{i_1-L_1} \\ \times \sum_{i_2=k_2}^{N/2} \sum_{L_2=\max(0, i_2-r_2)}^{\min(i_2, N/2-r_2)} \binom{N/2-r_2}{L_2} \binom{r_2}{i_2-L_2} \\ \times \left(L_1 \sum_{j=0}^{L_1} (-1)^j \binom{M}{j} B(\alpha+1, \beta) \right)$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{i_1 - L_1}{1+C} \sum_{j=0}^{k_1-1} (-1)^j \binom{M-1}{j} B(\alpha + (1+C)^{-1}, \beta + 1) \\
 & - \left(\frac{N}{2} - r_1 - L_1 + \frac{r_1 - i_1 + L_1}{1+C} \right) \sum_{j=0}^{k_2-1} (-1)^j \binom{M}{j} B(\alpha, \beta + 1) \} \\
 & \quad (19)
 \end{aligned}$$

여기서 $\alpha = N - r_1 - r_2 - L_1 - L_2 + T + (j + r_1 + r_2 - i_1 - i_2 + L_1 + L_2)/(1+C)$, $\beta = L_1 - L_2$, $M = i_1 + i_2 - L_1 - L_2$ 이다. $P_{fa, edge}^{OSCA}(z)$ 는 식(19)에서 i_1 을 i_2 로, r_1 을 r_2 로, k_1 을 k_2 로, L_1 을 L_2 로 바꾸면 된다. 시험셀이 클러터 영역에 존재할 경우에는 식(18)에서 T 가 $T/(1+C)$ 로 바뀌면 된다.

다중 표적이 존재하는 경우에 OSGO CFAR 검파기의 검파 성능 P_d^{OSGO} 은 식(18)에서 T 를 $T/(1+S)$ 로 C 를 I 로 치환한 것과 같다.

V. OSSO CFAR 검파기

OSSO CFAR 검파기는 시험셀의 왼쪽 및 오른쪽 기준창에서 각각 추출한 기준값 $Z_1 = X_{(k_1)}$ 과 $Z_2 = X_{(k_2)}$ 중 작은 값을 배경 잡음으로 간주한다. 그러므로

$$Z = \min(Z_1, Z_2) \quad (20)$$

이고, Z 의 pdf는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 f_Z^{OSGO}(z) &= f_{Z_1}(z)(1 - F_{Z_2}(z)) + f_{Z_2}(z)(1 - F_{Z_1}(z)) \\
 &= f_{Z_1}(z) + f_{Z_2}(z) - f_Z^{OSGO}(z)
 \end{aligned} \quad (21)$$

그러므로 OSSO CFAR 검파기의 오경보확률은 다음과 같다.

$$P_{fa}^{OSSO} = M_{Z_1}[T/(2\mu)] + M_{Z_2}[T/(2\mu)] - P_{fa}^{OSGO} \quad (22)$$

그러므로 균일 배경 환경에서 OSSO CFAR 검파기의 오경보확률은 다음과 같다.

$$P_{fa}^{OSSO} = \sum_{i=0}^{k_1-1} \frac{N/2-i}{N/2-i+T} + \sum_{i=0}^{k_2-1} \frac{N/2-i}{N/2-i+T} - P_{fa}^{OSGO} \quad (23)$$

OSSO CFAR 검파기의 검파 확률 P_d^{OSSO} 는 식(23)에서 T 를 $T/(1+S)$ 로 치환한 것과 같다.

OSSO CFAR 검파기의 ADT는 다음과 같다.

$$ADT_{OSSO} = T \left\{ \sum_{i=0}^{k_1-1} \frac{1}{N/2-i} + \sum_{i=0}^{k_2-1} \frac{1}{N/2-i} \right\} - ADT_{OSGO} \quad (24)$$

클러터 경계 환경에서 표적이 클러터가 없는 부분에 있다면, OSSO CFAR 검파기의 오 경보 확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 P_{fa}^{OSSO} &= P_{fa, edge}^{OS}(k_1, N/2, r_1, T) \\
 &+ P_{fa, edge}^{OS}(k_2, N/2, r_2, T) - P_{fa, edge}^{OSGO}(T)
 \end{aligned} \quad (25)$$

여기서 $P_{fa, edge}^{OSGO}(T)$ 는 식(18)에서 문턱값 T 를 식(23)에서 구한 문턱값으로 치환한 것이다. 시험셀이 클러터 영역에 존재한다면, 식(25)에서 T 는 $T/(1+C)$ 로 치환되어야 한다.

다중 표적 환경에서 OSSO CFAR 검파기의 검파 확률은 식(25)에서 T 를 $T/(1+S)$ 로, C 를 I 로 치환하면 된다.

VI. CFAR 검파기의 계산량

CFAR 검파기가 작동을 시작하여 N 개의 모든 기준창에 레이더 반사 신호가 저장되면, 순서 통계를 이용한 CFAR 검파기에서는 모든 데이터를 크기순으로 배열하여 k -번째 작은 기준셀을 찾을 필요가 있다. 이때 N 개의 데이터를 크기 순으로 정렬하기 위한 소팅에 필요한 최적의 비교 횟수를 $S(N)$ 이라하면 약 $\log_2(N!) + 0.0861[5]$ 정도의 비교 회수를 필요로 한다. 그러므로 OSCA, OSGO, OSSO CFAR 검파기와 같은 변형된 OS CFAR 검파기는 시험셀 왼쪽과 오른쪽의 $N/2$ 개의 셀을 가진 기준창에 대하여 $S(N/2) = \log_2[(N/2)!] + 0.0861$ 번 정도의 비교를 수행하게 된다.

최초 N 개의 데이터에 대한 비교를 수행한 후, 두 번째 새로운 기준창 내의 데이터는 첫 번째 기준창의 데이터와 동일한 반면 단지 새로 입력된 한 개의 데이터와 이전의 기준창을 빠져나간 한 개의 데이터만 차이가난다. 그러므로 새로운 기준창의 데이터를 소팅하는 것은 이전 기준창의 소팅 결과를 이용할 수 있다. 그러므로 최악의 경우 OS CFAR 검파기에서는 새로운 윈도우를 소팅하기 위해서는 $N-1$ 번의 비교가 필요하다. 그러나 변형된 OS CFAR 검파기인 OSCA, OSGO, OSSO CFAR 검파기에서는 시험셀의 왼쪽 또는 오른쪽 $N/2$ 개의 기준창에서 각각 $N/2-1$ 번의 비교가 필요하다. 그리고 이러한 비교는 왼쪽과 오른쪽 기준창을 병렬로 처리할 수가 있으므로 동작

속도를 상당히 높일 수 있는 장점이 있다.

Ⅶ. 검파 성능 비교

본 장에서는 지금까지의 해석 결과를 이용하여 전산 모의 실험을 통하여 순서 통계에 근거한 CFAR 검파기의 성능을 비교하고 각 검파기의 특성을 고찰한다. 본 장의 모의 실험에서는 해석의 편리성을 위하여 $k_1 = k_2$ 로 두었다.

표 1은 $N=24$, $P_{fa} = 10^{-6}$ 인 경우에 k 에 따른 각 검파기의 ADT를 나타낸 것으로서 OS CFAR 검파기는 $k=21$, OSCA 및 OSSO CFAR 검파기는 $k_1 = k_2 = 11$, OSGO CFAR 검파기는 $k_1 = k_2 = 10$ 에서 최소 검파 손실을 가진다. 그리고 OSCA CFAR 검파기의 검파 손실이 최소임을 알 수 있다. 클러터 경계 환경에서 오경보확률을 그림 3에 나타내었다. 여기서 원하는 오경보확률 P_{fa} 은 10^{-6} 이고 기준창의 갯수 $N=24$, $C=10dB$ 인 환경으로 가로축은 클러터가 존재하는 셀의 갯수를 의미한다. 클러터 경계 환경에서 OSGO CFAR 검파기의 오경보확률은 다른 검파기 보다는 조금 우수하고, OSSO CFAR 검파기는 가장 나쁨을 알 수 있다. 표 2~5는 각각 다중 표적 환경에서 OS, OSCA, OSGO, OSSO CFAR 검파기의 검파 성능을 보여주는 것으로서 원하는 오경보확률이 10^{-6} , $1/S=1$, $N=24$ 인 경우에 대한 다중 표적의 갯수에 따른 검파 성능을 보인 것이다. 만약 배경 잡음의 추정을 위하여 간섭 표적 신호를 이용하였다면 검파 확률은 상당히 감소할 것이다. 표 2는 이러한 특성을 보여주는 데, OS CFAR 검파기에서 $k=21$ 인 경우(OS(21)) 간섭 표적이 네 개인 경우 검파 성능이 급격히 감소함을 알 수 있다. 그리고 간섭 표적의 수가 증가 할수록 OS(21)이 OS(18) 보다 성능이 감소함을 알 수 있다. OSCA CFAR 검파기의 성능은 균일 잡음 환경과 다중 표적 환경하에서 순서통계에 근거한 다른 CFAR 검파기보다 우수한 성능을 보임을 알 수 있다. 그리고 다중 표적 환경에서 우수한 성능을 보인다고 알려진 OSGO CFAR 검파기에 비하여 OSCA CFAR 검파기의 성능이 약간 우수함을 알 수 있다. 그리고 OSSO CFAR 검파기는 상당히 열악한 성능을 보임을 알 수 있다. 그 이유는 표 1과 같이 OSSO CFAR 검파기의 ADT 값이 다른 CFAR 검파기에 비하여 상당히

히 크기 때문이다.

균일 잡음 환경에서는 $k_1 = k_2 = 11$ 인 OSCA CFAR 검파기(OSCA(11))가 OS(21) 검파기 보다 우수한 성능을 보임을 알 수 있다. OSCA(9) 검파기의 경우 간섭 표적이 왼쪽 또는 오른쪽 기준창에 세 개까지 존재하여도 우수한 검파 성능을 보임을 알 수 있다. 그리고 OS(21) 검파기 또한 기준창 내에 세 개까지의 간섭 표적이 있어도 우수한 검파 성능을 보이지만 OSCA(9) 검파기의 경우 좌우 기준창에 모두 여섯 개의 간섭 표적이 존재하여도 그 성능은 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 그러므로 배경 잡음의 크기를 예측하기 위하여 사용된 k 번째 작은 셀의 크기는 배경 잡음 환경에 따라 결정되어야 하는 값이다. 실험 결과 OS CFAR 검파기의 경우 $k \approx (N - \text{간섭 표적의 갯수}) \times 0.83$ 인 경우 최적의 성능을 보였다. 그리고 OSCA 및 OSGO CFAR 검파기의 경우 $k_i \approx (N/2 - i \text{ 번째 기준창에 존재하는 간섭 표적의 갯수}) \times 0.9$, $i=1, 2$ 인 경우 최적의 성능을 보였다.

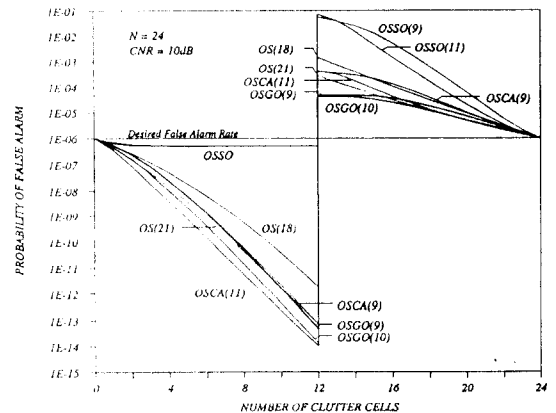


그림 3. 클러터 경계 영역에서의 OS CFAR와 변형된 OS CFAR 검파기의 오경보확률 OS(k)는 $Z = X_{(k)}$ 를 OSCA, OSGO, OSSO(k)는 $Z_1 = Z_2 = X_{(k)}$ 를 의미한다.
Fig. 3 False alarm rate of the OS and the modified OS CFAR detectors in clutter edges. OS(k) represents $Z = X_{(k)}$. OSCA, OSGO, OSSO(k) represent $Z_1 = Z_2 = X_{(k)}$

표 1. 평균 검파 문턱값과 상수 $T(P_{fa} = 10^{-6}, N = 24)$

Table 1. Constant scale factor T and average detection threshold ($P_{fa} = 10^{-6}, N = 24$)

k	OS		OSCA($k=k_s=k_t$)		OSGO($k=k_s=k_t$)		OSSO($k=k_s=k_t$)	
	T	ADT	T	ADT	T	ADT	T	ADT
6			20.0954	26.2532	34.8392	27.9666	95.3873	48.0454
7	129.458	43.5504	14.6134	23.9625	25.5733	25.4636	60.7165	39.1041
8	94.0769	37.1819	11.0227	22.4838	19.4293	23.8532	41.6855	33.8511
9	72.0859	32.9959	8.4742	21.5226	15.0211	22.8221	29.9416	30.5529
10	57.3304	30.0638	6.5402	20.9709	11.6422	22.2671	22.0167	28.4856
11	46.8476	27.9129	4.9687	20.9008	8.8695	22.308	16.2268	27.445
12	39.0635	26.2799	3.5513	22.0414	6.3417	23.9463	11.5555	28.0852
13	33.0755	25.0077						
14	28.3339	23.9985						
15	24.4865	23.1885						
16	21.2983	22.5357						
17	18.6062	22.013						
18	16.2932	21.6041						
19	14.2725	21.3034						
20	12.4762	21.1175						
21	10.8479	21.0735						
22	9.3349	21.2460						
23	7.8736	21.8567						
24	6.3418	23.9463						

표 2. $P_{fa} = 10^{-6}, N = 24, I/S = 1$ 인 경우의 OS CFAR 검파기의 검파확률

Table 2. Detection probability of the OS CFAR detector for $P_{fa} = 10^{-6}, N = 24, I/S = 1$

SNR [dB]	$k=21$ Number of Interfering Targets					$k=18$ Number of Interfering Targets				
	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
6	0.0233	0.0178	0.0131	0.0093	0.0063	0.0216	0.0176	0.0141	0.0110	0.0083
8	0.0706	0.0556	0.0417	0.0292	0.0190	0.0665	0.0560	0.0460	0.0368	0.0285
10	0.1639	0.1352	0.1055	0.0753	0.0462	0.1571	0.1374	0.1175	0.0976	0.0781
12	0.3001	0.2599	0.2135	0.1585	0.0901	0.2915	0.2644	0.2353	0.2041	0.1708
14	0.4553	0.4112	0.3555	0.2792	0.1431	0.4466	0.4173	0.3843	0.3468	0.3036
16	0.6017	0.5614	0.5068	0.4222	0.1917	0.5942	0.5676	0.5367	0.5000	0.4550
18	0.7223	0.6898	0.6437	0.5650	0.2271	0.7164	0.6952	0.6699	0.6389	0.5991
20	0.8128	0.7888	0.7536	0.6892	0.2485	0.8086	0.7930	0.7741	0.7504	0.7191
22	0.8767	0.8600	0.8348	0.7866	0.2598	0.8738	0.8630	0.8497	0.8327	0.8099
24	0.9200	0.9088	0.8916	0.8576	0.2652	0.9181	0.9108	0.9018	0.8903	0.8745
26	0.9487	0.9412	0.9298	0.9069	0.2676	0.9474	0.9426	0.9367	0.9290	0.9184
28	0.9672	0.9624	0.9550	0.9398	0.2687	0.9664	0.9633	0.9595	0.9545	0.9476
30	0.9792	0.9761	0.9713	0.9615	0.2691	0.9787	0.9767	0.9742	0.9710	0.9665

표 3. $P_{fa} = 10^{-6}, N = 24, I/S = 1$ 인 경우의 OSCA CFAR 검파기의 검파확률

Table 3. Detection probability of the OSCA CFAR detector for $P_{fa} = 10^{-6}, N = 24, I/S = 1$

SNR [dB]	$k_s=k_t=9$ Number of Interfering Targets (Leading Window, Lagging Window)										
	(0,0)	(0,0)	(1,0)	(1,1)	(2,0)	(2,1)	(2,2)	(3,0)	(3,1)	(3,2)	(3,3)
6	0.0239	0.0218	0.0177	0.0144	0.0137	0.0111	0.0086	0.0100	0.0081	0.0063	0.0046
8	0.0719	0.0670	0.0561	0.0471	0.0446	0.0374	0.0297	0.0327	0.0274	0.0217	0.0159
10	0.1660	0.1579	0.1376	0.1198	0.1136	0.0990	0.0817	0.0852	0.0742	0.0613	0.0460

12	0.3029	0.2927	0.2646	0.2392	0.2284	0.2064	0.1782	0.1788	0.1616	0.1395	0.1092
14	0.4581	0.4478	0.4174	0.3891	0.3753	0.3498	0.3145	0.3095	0.2885	0.2594	0.2139
16	0.6041	0.5952	0.5677	0.5415	0.5274	0.5030	0.4673	0.4576	0.4365	0.4055	0.3518
18	0.7242	0.7173	0.6953	0.6739	0.6618	0.6415	0.6106	0.5991	0.5808	0.5528	0.5005
20	0.8142	0.8092	0.7930	0.7772	0.7678	0.7524	0.7285	0.7178	0.7035	0.6811	0.6367
22	0.8777	0.8743	0.8630	0.8519	0.8451	0.8342	0.8169	0.8084	0.7980	0.7814	0.7475
24	0.9207	0.9184	0.9108	0.9033	0.8987	0.8913	0.8794	0.8731	0.8659	0.8544	0.8301
26	0.9491	0.9476	0.9426	0.9377	0.9346	0.9297	0.9218	0.9174	0.9126	0.9048	0.8882
28	0.9675	0.9666	0.9633	0.9601	0.9581	0.9549	0.9498	0.9468	0.9437	0.9386	0.9275
30	0.9794	0.9787	0.9767	0.9746	0.9733	0.9713	0.9679	0.9660	0.9640	0.9607	0.9535

표 4. $P_{fa} = 10^{-6}, N = 24, I/S = 1$ 인 경우의 OSGO CFAR 검파기의 검파확률

Table 4. Detection probability of the OSGO CFAR detector for $P_{fa} = 10^{-6}, N = 24, I/S = 1$

SNR [dB]	$k_s=k_t=9$ Number of Interfering Targets (Lagging Window, Lagging Window)										
	(0,0)	(0,0)	(1,0)	(1,1)	(2,0)	(2,1)	(2,2)	(3,0)	(3,1)	(3,2)	(3,3)
6	0.0209	0.0195	0.0157	0.0128	0.0118	0.0098	0.0076	0.0083	0.0069	0.0055	0.0040
8	0.0643	0.0608	0.0503	0.0423	0.0385	0.0330	0.0263	0.0264	0.0231	0.0188	0.0139
10	0.1521	0.1461	0.1254	0.1096	0.0993	0.0886	0.0735	0.0686	0.0625	0.0534	0.0402
12	0.2841	0.2760	0.2463	0.2232	0.2042	0.1886	0.1634	0.1461	0.1379	0.1232	0.0969
14	0.4380	0.4296	0.3962	0.3700	0.3442	0.3265	0.2945	0.2608	0.2519	0.2338	0.1939
16	0.5861	0.5786	0.5474	0.5229	0.4953	0.4787	0.4459	0.4003	0.3922	0.3739	0.3262
18	0.7098	0.7039	0.6785	0.6583	0.6336	0.6200	0.5913	0.5431	0.5367	0.5209	0.4738
20	0.8037	0.7994	0.7804	0.7653	0.7456	0.7354	0.7130	0.6703	0.6655	0.6533	0.6130
22	0.8704	0.8674	0.8540	0.8434	0.8290	0.8218	0.8055	0.7719	0.7686	0.7597	0.7286
24	0.9158	0.9138	0.9048	0.8975	0.8876	0.8827	0.8715	0.8470	0.8447	0.8386	0.8162
26	0.9459	0.9445	0.9386	0.9338	0.9272	0.9239	0.9164	0.8995	0.8980	0.8940	0.8786
28	0.9654	0.9646	0.9607	0.9576	0.9532	0.9512	0.9462	0.9349	0.9340	0.9313	0.9210
30	0.9780	0.9775	0.9750	0.9730	0.9702	0.9688	0.9657	0.9582	0.9576	0.9559	0.9492

표 5. $P_{fa} = 10^{-6}, N = 24, I/S = 1$ 인 경우의 OSSO CFAR 검파기의 검파확률

Table 5. Detection probability of the OSSO CFAR detector for $P_{fa} = 10^{-6}, N = 24, I/S = 1$

SNR [dB]	$k_s=k_t=9$ Number of Interfering Targets (Leading Window, Lagging Window)										
	(0,0)	(0,0)	(1,0)	(1,1)	(2,0)	(2,1)	(2,2)	(3,0)	(3,1)	(3,2)	(3,3)
6	0.0113	0.0081	0.0067	0.0052	0.0057	0.0042	0.0031	0.0052	0.0036	0.0025	0.0017
8	0.0391	0.0297	0.0251	0.0200	0.0218	0.0163	0.0122	0.0197	0.0139	0.0096	0.0066
10	0.1050	0.0850	0.0740	0.0612	0.0658	0.0514	0.0398	0.0604	0.0447	0.0317	0.0221
12	0.2184	0.1875	0.1688	0.1460	0.1540	0.1269	0.1031	0.1439	0.1131	0.0847	0.0611
14	0.3662	0.3296	0.3057	0.2752	0.2858	0.2481	0.2119	0.2717	0.2271	0.1813	0.1380
16	0.5204	0.4850	0.4606	0.4284	0.4394	0.3981	0.3557	0.4238	0.3734	0.3168	0.2564
18	0.6569	0.6273	0.6061	0.5773	0.5871	0.5493	0.5085	0.5727	0.5254	0.4685	0.4017
20	0.7645	0.7421	0.7256	0.7028	0.7105	0.6800	0.6459	0.6988	0.6600	0.6109	0.5490
22	0.8430	0.8271	0.8151	0.7985	0.8041	0.7816	0.7557	0.7955	0.7664	0.7283	0.6778
24	0.8974	0.8865	0.8783	0.8668	0.8706	0.8549	0.8365	0.8646	0.8441	0.8167	0.7790
26	0.9337	0.9266	0.9211	0.9134	0.9159	0.9053	0.8929	0.9119	0.8980	0.8791	0.8526
28	0.9576	0.9529	0.9493	0.9443	0.9460	0.9390	0.9307	0.9433	0.9341	0.9216	0.9036
30	0.9730	0.9700	0.9677	0.9644	0.9655	0.9610	0.9556	0.9638	0.9578	0.9496	0.9378

Ⅷ. 결 론

본 논문에서는 순서 통계에 근거한 CFAR 검파기 인 OS, OSCA, OSGO, OSSO CFAR 검파기의 성능을 균일 배경 잡음 환경, 클러터 경계 환경, 다중 표적 환경에서 해석하였다. 검파 성능 해석 결과 본 논문에서 제안한 OSCA CFAR 검파기는 균일 배경 잡음 환경에서 OS CFAR 검파기보다 우수한 성능을 보인다. 다중 표적 환경에서는 시험셀의 왼쪽 및 오른쪽 기준창에 존재하는 간섭 표적의 갯수가 각각 $N/2-k_1$, $N/2-k_2$ 보다 많지 않으면 OS CFAR 검파기 보다 우수한 성능을 보인다. 클러터 경계 환경에서는 OSGO CFAR 검파기가 가장 우수한 성능을 보이지만 균일 배경 잡음 및 다중 경로 환경에서 OSCA CFAR 검파기 보다 나쁜 성능을 보인다. 그리고 OSSO CFAR 검파기는 가장 열악한 검파 성능을 보인다. 그리고 본 논문에서는 계산량의 관점에서 OS CFAR 검파기와 변형된 OS CFAR 검파기를 비교하였다. 비교 결과 변형된 OS CFAR 검파기는 병렬 처리 기법을 사용하면 OS CFAR 검파기의 계산량을 반이하로 줄일 수 있음을 보였다. 그러므로 본 논문에서 제안한 OSCA CFAR 검파기는 계산 시간을 기존의 OS CFAR 검파기보다 반으로 줄이고 성능을 향상시킨 검파기라고 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. H. Rohling, "Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, AES-19, pp. 608-621, July 1983.
2. A. R. Elias-fuste, M. G. Mercado, and E. R. Davo, "Analysis of some modified ordered statistic CFAR: OSGO and OSSO CFAR," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, AES-26, pp. 197-202, Jan. 1990.
3. P. P. Gandhi and S. A. Kassam, "Analysis of CFAR processors in nonhomogeneous background," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, AES-24, pp. 427-445, July 1988.
4. I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of In-*

tegrals, Series, and Products, corrected and enlarged edition." New York: Academic Press, 1980.

5. D. E. Knuth, *The Art of Computer Programming, vol. 3, Sorting and Searching*, MA: Addison-Wesley, 1973.



韓 東 錫(Dong-Seog Han) 정회원

1966년 2월 10일생

1987년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)

1989년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)

1993년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사)

1989년 10월~1996년 8월: 삼성전자(주) 기술총괄 신호처리연구소 선임연구원

1996년 8월~현재: 경북대학교 공과대학 전자·전기공학부 전임강사

※주관심분야: 디지털 통신 시스템, 디지털 신호처리, 검파이론