

효율적인 CFAR 알고리즘 연구

A Study of Efficient CFAR Algorithm

신 상 진

Sang-Jin Shin

요 약

본 논문에서는 CA-CFAR 알고리즘을 보완한 효율적인 CFAR 알고리즘을 제시한다. 레이더 수신기에 유입되는 신호는 열잡음뿐만 아니라, 클러터 및 다중표적 신호가 존재하며, 시스템 내부에서 발견되는 하모닉 성분도 존재하여 기존에 널리 알려진 CA-CFAR로는 표적 탐지 성능을 보장할 수 없다. 이를 보완하기 위한 OS-CFAR나 ML-CFAR 등이 연구되었지만, 제시하는 CFAR 알고리즘은 OS-CFAR나 ML-CFAR에 비해 적은 계산량으로 레이더 신호처리에 적용시킬 수 있다. 제시하는 CFAR 알고리즘의 문턱치와 오경보율의 관계식을 유도하고, SNR 관점과 ADT 관점에서 CFAR 손실을 분석하였다.

Abstract

This paper proposes a new efficient CFAR algorithm. The structure of the proposed CFAR is relatively simple as compared with the OS-CFAR or ML-CFAR which are considered to deal with the nonhomogeneous environment such as clutter and multiple targets. The proposed algorithm is effectively applied to the radar signal processor with reduced computation burden. The relationship between the threshold and PFA of the proposed CFAR is derived analytically. The CFAR loss of the proposed CFAR algorithm is compared with CA-CFAR and OS-CFAR based on both SNR and ADT(Average Detection Threshold).

Key words: CFAR, Threshold, PFA

I. 서 론

레이더 수신신호의 대부분은 시공간영역에서 잡음신호가 표적 신호보다 많은 영역을 차지하고 있고, 표적 신호가 일반적으로 잡음 신호레벨보다 높아서 오경보율(probability of false alarm)을 기반으로 표적을 탐지한다. 이러한 표적 탐지 알고리즘은 잡음 신호 세기가 일정 신호레벨인 문턱치보다 크면 무조건 표적 신호라고 판단하게 되므로, 표적 신호가 아닌 것을 표적 신호로 오인할 확률이 존재하게 된다. 일반적으로 잡음의 신호레벨이 시간에 따라 변화하지 않을 경우는 문턱치를 일정한 상수 값으

로 유지할 수 있으나, 그렇지 않을 경우는 문턱치를 오경보율에 맞게 변화시켜야 하며, 이러한 문턱치를 계산해 내는 CFAR 알고리즘이 여러 문헌^{[1]-[3]}을 통하여 연구되어 왔다. 이러한 문턱치를 찾는 기법으로 널리 알려진 CA-CFAR^[1]는 균일한 노이즈 환경에서 사용할 수 있으며, 오경보율과 문턱치 사이의 관계식을 사용하여 쉽게 문턱치를 구할 수 있다. 그러나 클러터에 의한 비균일한 노이즈 환경이나 다수 표적이 존재하는 상황에서는 그 성능을 보장할 수 없으므로 이를 보완하기 위한 OS-CFAR^[2]가 제시되었다. 이러한 문턱치를 사용한 CFAR 알고리즘은 상수 값으로 문턱치로 사용한 경우에 비해 표적 탐지

방위산업기술지원센터(국방과학연구소 부설)(Technical Support Center for National Defense Industry of Agency for Defense Development)

· Manuscript received April 7, 2014 ; Revised August 14, 2014 ; Accepted August 18, 2014. (ID No. 20140407-036)

· Corresponding Author: Sang-Jin Shin (e-mail: radarsjs@add.re.kr)

효과가 감소하게 되며, 이를 CFAR 손실^[4]이라고 한다. 이러한 CFAR 손실을 감소시키기 위해 OS-CFAR보다 손실이 작은 ML-CFAR^[3]가 제시되었다. 그러나 ML-CFAR는 문턱치와 오경보율 간의 관계식이 수치해석적인 방법으로 구해야 하는 불편한 점이 있다. 레이더 신호처리 결과는 지면의 반사로 레이더 수신기에 유입되는 클러터^[5] 및 다중 표적 신호뿐만 아니라, 레이더 시스템 내부에 존재하는 하모닉 성분까지도 존재하게 되어 균일한 상태라고 가정하기 어려우므로 CA-CFAR를 시스템에 그대로 적용시키기는 적합하지 않다. 본 논문에서는 비균일한 환경하에서 OS-CFAR보다 적은 계산량으로 표적을 탐지할 수 있는 CFAR 알고리즘을 제시한다. 또한, 대표적인 CA-CFAR와 본 논문에서 제시한 CFAR 알고리즘에 대한 유도과정을 비교하고, CFAR 손실에 대한 분석 결과를 CA-CFAR 및 OS-CFAR와 비교한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 레이더 표적 신호 및 널리 알려진 CA-CFAR 알고리즘을 설명한다. 3장에서는 본 논문에서 제시하는 CFAR 알고리즘을 설명하고, 특성을 분석한다.

II. 레이더 신호와 CA-CFAR

그림 1은 레이더의 신호처리기에서 표적 신호를 탐지하기 위한 탐지절차를 나타낸다.

그림 1에서 불규칙변수 r 의 확률 밀도 함수는 다음과 같다.

$$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2+A^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{rA}{\sigma^2}\right) \quad (1)$$

$$I_0\left(\frac{rA}{\sigma^2}\right) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} e^{\frac{rA}{\sigma^2} \cos(\theta-\theta_s)} d\theta \quad (2)$$

여기서 I_0 는 zero order의 modified Bessel function이고, $f(r)$ 은 Rice probability density function이 된다. A 는 표적 신호의 크기이고, σ 는 잡음의 표준편차이다. 만일 표적 신호가 없다면 $A=0$ 가 되고, $I_0(0)=1$ 이어서

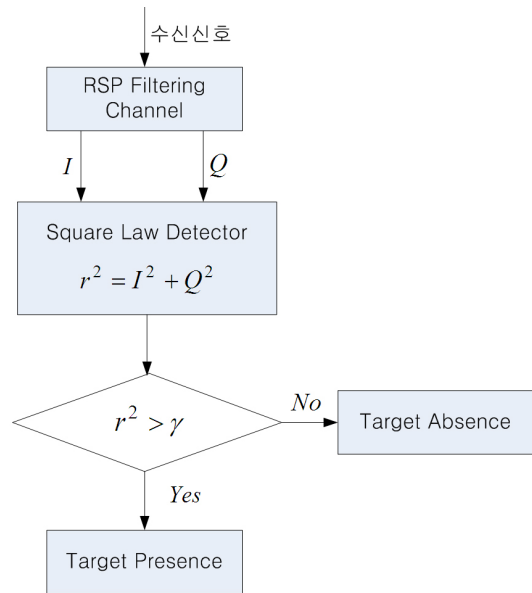


그림 1. 표적 신호 탐지 절차
Fig. 1. Flow chart of target signal detection.

$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}$ 인 Rayleigh 분포가 된다.

식 (1)에서 불규칙 변수 r 을 다음과 같이 치환한다.

$$z_k \triangleq \frac{1}{2} x_k^2, \quad x_k = \frac{r_k}{\sigma}, \quad \frac{A^2}{\sigma^2} \triangleq \tilde{d} \quad (3)$$

식 (3)을 사용하면 z_k 의 확률 밀도 함수 $f(z_k)$ 는 다음과 같다.

$$f(z_k) = e^{-\left(z_k + \frac{\tilde{d}}{2}\right)} I_0\left(\sqrt{2z_k \tilde{d}}\right) \quad (4)$$

표적의 RCS(Radar Cross Section)가 변화하여 Swerling case I 또는 II로 모델링된다면 식 (4)는 표적 신호의 크기 A 에 대한 조건 확률 밀도 함수 $f(z_k | A_k)$ 가 된다. A_k 를 Rayleigh 분포로 모델링하고, 조건 확률 밀도 함수 $f(z_k | A_k)$ 를 적분하여 $f(z_k)$ 를 구하면 식 (6)과 같다. 자세한 유도과정은 APPENDIX에 수록하였다.

$$f(z_k) = \int_0^\infty f(z_k | A_k) f(A_k) dA_k$$

$$= \int_0^{\infty} e^{-\left(z_k + \frac{A_k^2}{2\sigma^2}\right)} I_0\left(\sqrt{\frac{2z_k A_k^2}{\sigma^2}}\right) \frac{A_k^2}{A_0^2} e^{-\frac{A_k^2}{2A_0^2}} dA_k \quad (5)$$

$$= \frac{1}{1+d} e^{-\frac{1}{1+d}z_k}, \quad \frac{A_0^2}{\sigma^2} \triangleq d \quad (6)$$

여기서 d 는 신호대잡음비이다. 문턱치 γ 가 주어질 때 탐지될 확률 P_D 는 다음과 같다.

$$P_D = \int_{\gamma}^{\infty} f(z_k) dz_k = e^{-\frac{\gamma}{1+d}} \quad (7)$$

그림 2에서와 같이 셀의 합을 다음과 같이 y 라고 하면 y 의 확률 밀도 함수는 식 (8)과 같이 된다.

$$y = \sum_{k=1}^N z_k$$

$$f(y) = \frac{y^{N-1}}{(N-1)!} e^{-y} \quad (8)$$

$\gamma = \alpha \frac{y}{N}$ 로 하여 계산하고, 여기서 α 는 P_{FA} 에 의해 정해지는 값이다. γ 는 불규칙 변수가 되므로 식 (7)의 P_D 를 다시 구하면 식 (9)와 같다.

$$P_D(d) = \int_0^{\infty} P_D(d|\gamma) f(y) dy$$

$$= \left(1 + \frac{\alpha}{N(1+d)}\right)^{-N} \quad (9)$$

P_D 는 d, N, α 의 함수가 되며, $P_D(d, \alpha, N)$ 으로 표현한다. P_{FA} 는 $d=0$ 일 때이므로 P_{FA} 를 N 과 α 의 함수인 $P_{FA}(\alpha, N)$ 으로 표현하면 다음과 같다.

$$P_{FA}(\alpha, N) = \left(1 + \frac{\alpha}{N}\right)^{-N} \quad (10)$$

또한 N 을 무한대로 보낼 경우, 식 (9)와 식 (10)으로부터 다음 식 (11)을 얻는다.

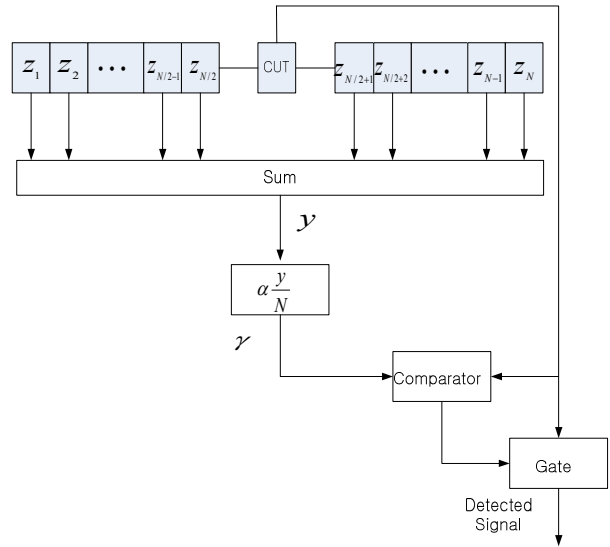


그림 2. CA-CFAR 절차
Fig. 2. CA-CFAR procedure.

$$P_D = P_{FA} \frac{1}{1+d} \quad (11)$$

이 식은 표적 신호의 크기가 Rayleigh 분포를 갖고, 문턱치를 불규칙 변수가 아닌 상수 값으로 사용했을 때 결과와 동일하다. $P_D(d, \alpha, N)$ 와 $P_{FA}(\alpha, N)$ 식에서 α 를 소거하면 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$d = \frac{P_D^{1/N} P_{FA}^{1/N} - 1}{1 - P_D^{1/N}} \quad (12)$$

위 식에서 N 을 무한대로 접근시킨 극한값을 구해 보면 아래 식 (13)과 같이 CFAR 손실을 구할 수 있다.

$$\lim_{N \rightarrow \infty} d = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\left(\frac{P_D}{P_{FA}}\right)^{1/N} - 1}{1 - P_D^{1/N}} = \frac{\ln\left(\frac{P_{FA}}{P_D}\right)}{\ln(P_D)} \quad (13)$$

예를 들어 $P_D = 0.9$ 이고, $P_{FA} = 10^{-6}$ 이며, $N = 32$ 일 때 식 (12)에서는 $d(N) = 162.7$ 이고, 식 (13)에서는 $d(\infty) = 130.1$ 이 된다. 식 (13)을 사용하여 CFAR 손실을 구해 보면 다음과 같다.

$$\frac{d(N)}{d(\infty)} = \frac{\left(\frac{P_D}{P_{FA}}\right)^{1/N} - 1}{1 - P_D^{1/N}} \cdot \frac{\ln(P_{FA}/P_D)}{\ln(P_D)} \quad (14)$$

ADT(Average Detection Threshold^[6]) 관점에서 CFAR 손실을 구하면 다음과 같다.

$$\gamma = K_0 y, \quad K_0 = \frac{\alpha}{N} \quad (15)$$

$$E[\gamma] = K_0 E[y] \quad (16)$$

$$E[y] = \int y \cdot \frac{y^{N-1}}{(N-1)!} e^{-y} dy = N \quad (17)$$

위 식들로부터 CA-CFAR의 ADT는 $K_0 \cdot N$ 이 된다.

III. Proposed CFAR

레이더 수신기에 유입되는 신호는 열잡음만 아니라, 클러터 및 다중 표적 신호등이 들어온다. 또한, 이러한 신호들의 신호처리 결과에서는 레이더 시스템 내부에 존재하는 하모닉 성분들도 나타나서 표적탐지의 성능을 감소시키게 되므로 CA-CFAR 알고리즘을 체계 시스템 적용에 그대로 사용할 수 없다. 본 장에서는 두 개의 셀 중에 신호의 크기가 작은 셀의 값을 선택하여 더해가는 방식의 CFAR를 제시한다. 또한, 이러한 CFAR 특성을 확률적으로 분석하여 기존 CFAR 알고리즘과 비교해 본다.

본 논문에서 제시하는 CFAR 알고리즘을 그림 3에 나타내었다. 그림 3과 같이 두 개의 z_k ($k=1,2,\dots,N$) 중에서 작은 값을 갖는 z_k 를 선택하여 이를 z_k' 이라 하고, z_k' 을 모두 더한 값을 y 라 하면 불규칙 변수 y 는 다음과 같다.

$$y = \sum_{i=1}^{\bar{N}} z_i' \quad (18)$$

여기서 \bar{N} 은 그림 3에서 선택된 작은 값들의 개수이며, 그림 2에서, N 과의 관계는 $\bar{N} = N/2$ 이다.

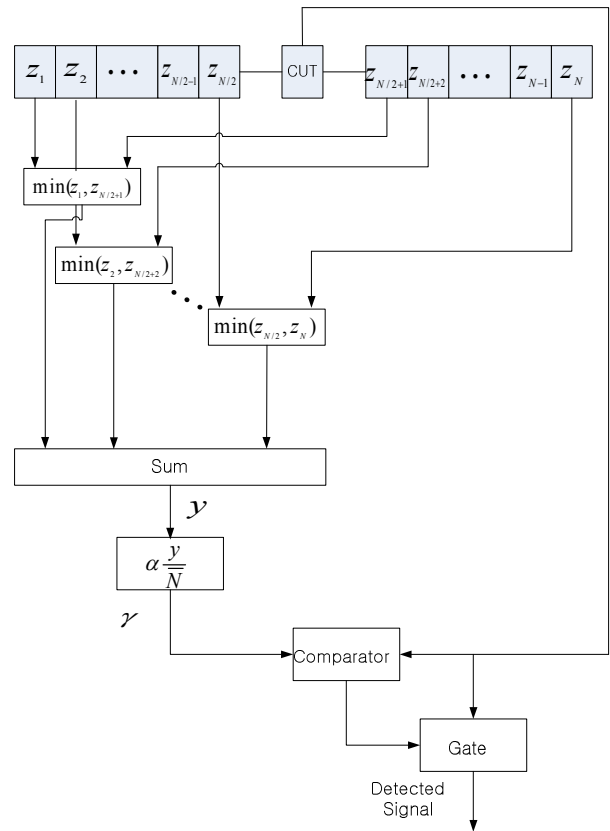


그림 3. Proposed CFAR 절차
Fig. 3. Proposed CFAR procedure.

식 (19)와 같은 order statistics^[7]로부터 제시된 CFAR의 경우는 $n = 2$ 일 경우이고, 두 개 중 작은 것을 선택하는 것이므로 식 (19)는 식 (20)과 같다.

$$f_k(z') = \frac{n!}{(k-1)!(n-k)!} F_x^{k-1}(z') [1 - F_x(z')]^{n-k} f_x(z') \quad (19)$$

$$f(z') = \frac{2!}{1!} F_x^0(z') [1 - F_x(z')]^1 f_x(z') \quad (20)$$

위 식에서 z' 은 두 셀의 작은 값을 의미하고, z' 의 확률 밀도 함수는 다음과 같다.

$$f(z') = 2 \left[1 - \int_0^{z'} e^{-\left(\xi + \frac{\bar{d}}{2}\right)} I_0(\sqrt{2\bar{d}} \sqrt{\xi}) d\xi \right] \cdot e^{-\left(z' + \frac{\bar{d}}{2}\right)} I_0(\sqrt{2\bar{d}} \sqrt{z'}) \quad (21)$$

A 가 불규칙 변수로써 Rayleigh 분포를 한다고 가정하면 식 (21)은 다음과 같이 변형된다.

$$f(z_k') = \int_0^\infty f(z_k' | A_k) f(A_k) dA_k$$

$$= \int_0^\infty 2 \left[1 - \int_0^{z_k'} e^{-\xi + \frac{d}{2}} I_0(\sqrt{2d}\sqrt{\xi}) d\xi \right] \cdot e^{-\left(\frac{z_k'+d}{2}\right)} I_0(\sqrt{2d}\sqrt{z'}) \cdot \frac{A_k}{A_0^2} e^{-\frac{A_k^2}{2A_0^2}} dA_k \quad (22)$$

균일한 노이즈의 경우 $A_k = 0$ 이고, 이 경우는 식 (23)과 같이 된다.

$$f(z') = 2 \left[1 - \int_0^{z'} e^{-\xi} d\xi \right] \cdot e^{-z'} = 2e^{-2z'} \quad (23)$$

y 의 확률 밀도 함수는 $f(z')$ 의 convolution으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\underbrace{f(z') * f(z') * \dots * f(z')}_{\bar{N}} \triangleq f(y) \quad (24)$$

$$f(y) = 2^{\bar{N}} e^{-2x} \frac{x^{\bar{N}-1}}{(\bar{N}-1)!} \quad (25)$$

본 논문에서 제시된 CFAR 경우, y 의 확률 밀도 함수는 Erlang density function^[8]이 된다. 표적 신호가 탐지될 확률 P_D 는 문턱치 γ 가 주어질 때 다음과 같다.

$$P_D(d) = \int_0^\infty P_D(d|\gamma) f(y) dy = 2^{\bar{N}} \left(2 + \frac{\alpha}{\bar{N}(1+d)} \right)^{-\bar{N}} \quad (26)$$

P_{FA} 는 $d=0$ 일 때이므로 다음 식 (27)과 같다.

$$P_{FA} = 2^{\bar{N}} \left(2 + \frac{\alpha}{\bar{N}} \right)^{-\bar{N}} \quad (27)$$

\bar{N} 을 무한대로 보내고 식 (26)과 식 (27)에서 α 를 소거하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$P_D = P_{FA}^{1+d} \quad (28)$$

식 (28)은 CA-CFAR에서 구한 식 (11)의 것과 같다. 식 (26)과 식 (27)에서 α 를 소거하면 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$d = \frac{P_D^{1/\bar{N}} - 1}{P_{FA}^{1/\bar{N}} - 1} \quad (29)$$

위 식 (29)도 CA-CFAR에서 구한 식 (12)와 같은 결과이지만, 식 (29)에서 \bar{N} 은 CA-CFAR에서 reference cell 개수의 1/2배와 같다. 본 논문에서 제시된 CFAR 알고리즘의 손실을 ADT 관점에서 구하면 다음과 같다.

$$\gamma = K_0 y, \quad K_0 = \frac{\alpha}{\bar{N}} \quad (30)$$

$$E[\gamma] = K_0 E[y] \quad (31)$$

$$E[y] = \int_0^\infty y \cdot 2^{\bar{N}} \cdot \frac{y^{\bar{N}-1}}{(\bar{N}-1)!} e^{-2y} dy = \frac{\bar{N}}{2} \quad (32)$$

위 식들로부터 본 논문에서 제시된 CFAR의 ADT는 $K_0 \cdot \bar{N} / 2$ 이 된다. 표 1에서 표 3까지는 reference cell의 개수 N 을 8에서 32까지 변화시켜가면서 ADT를 구한 것이다. 이때 사용된 오경보율은 $P_{FA} = 1 \times 10^{-6}$ 이다. 예를 들어 표 1의 CA-CFAR에서 $N=8$ 일 때 ADT는 표 2의 제시된 CFAR에서 $N=16$ 일 때와 동일하다. 표 2에서 제시된 CFAR의 ADT는 표 3에서 OS-CFAR의 ADT와 유사함을 볼 수 있다. 표 3에서 OS-CFAR 결과는 reference cell을 큰 값에서 작은 값으로 정렬한 후에 중앙값의 셀을 기준으로 문턱치를 구한 것이다. OS-CFAR 알고리즘을 사용하기 위해서는 reference cell의 신호크기를 큰 숫자부터 작은 숫자까지 순차정렬을 해야 하는데, 가장 일반적으로 사용되는 순차정렬 알고리즘은 거품 정렬(bubble sort)이다. 표 4는 reference cell의 개수가 N 개일 때 OS-CFAR와 본 논문에서 제시한 CFAR 알고리즘의 계산량을 비교기(comparator)의 사용 숫자로 나타낸 것이다. 거품 정렬에서 비교기를 사용할 때마다 메모리 교환까지 수행하게 되면 OS-CFAR의 계산량은 더욱 증가하게 된다. 본 논문에서

표 1. CA-CFAR ADT

Table 1. CA-CFAR ADT.

N	8	12	16	20	24	28	32
ADT	36.98	25.94	21.94	19.90	18.67	17.86	17.27

표 2. 본 논문에서 제시된 CFAR ADT

Table 2. Proposed CFAR ADT.

N	8	12	16	20	24	28	32
ADT	122.49	54.0	36.98	29.81	25.94	23.55	21.94

표 3. OS-CFAR ADT

Table 3. OS-CFAR ADT.

N	8	12	16	20	24	28	32
ADT	124.4	54.9	37.5	30.2	26.3	23.85	22.16

표 4. 제안한 CFAR와 OS-CFAR 비교기 사용량

Table 4. Proposed CFAR & OS-CFAR comparator burden.

제안한 CFAR	$N/2$
OS-CFAR	$N(N-1)/2$

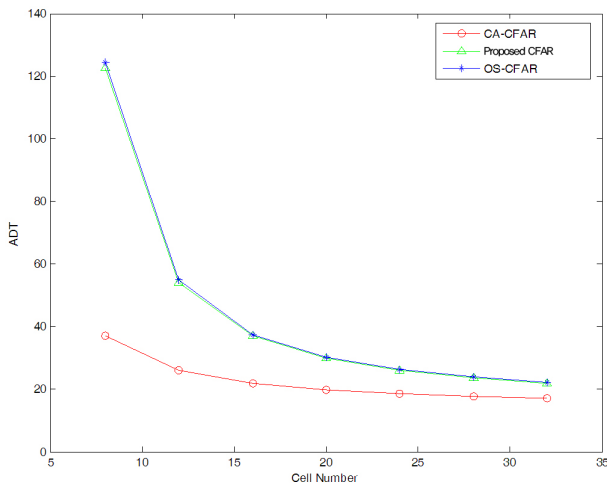


그림 4. 셀 개수와 ADT 관계

Fig. 4. Relation between the cell number and ADT.

제시한 CFAR 알고리즘은 OS-CFAR보다 적은 계산량으로 구현할 수 있는 장점이 있다.

참고적으로 그림 4는 표 1~3까지의 결과를 그래프로 도시한 것이다. 그림 4로부터 30개 이상의 reference cell을 사용한다면 본 논문에서 제시한 CFAR 알고리즘이 CA-

CFAR에 비하여 크게 손실이 발생하지 않게 된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 클러터 및 다중 표적 신호 등 비균일한 환경하에서 효율적인 CFAR 알고리즘을 제시하였다. 제시한 CFAR 알고리즘은 그 구조가 단순하여 시스템에 적용시키기가 용이하며, 제시한 CFAR의 탐지확률과 오경보율, 그리고 문턱치와의 관계식을 구하였다. 또한, 제시된 CFAR의 손실을 신호대잡음비 및 ADT 관점에서 분석하였다. ADT 관점에서 보면 제시된 CFAR 알고리즘은 OS-CFAR와 유사한 값을 갖는다. 본 논문에서 제시된 CFAR 알고리즘은 reference cell이 30개 이상일 경우에는 CA-CFAR와 유사한 ADT를 가지면서 클러터 및 다중표적 환경에서 표적을 탐지할 수 있다.

APPENDIX

참고문헌 [9]로부터 다음과 같은 수학 공식을 사용할 수 있다.

$$\int_0^\infty t^{\mu-1} I_\nu(\alpha t) e^{-p^2 t^2} dt = \frac{\Gamma\left(\frac{\mu+\nu}{2}\right) \left(\frac{\alpha}{2p}\right)^\nu}{2p^\mu \Gamma(\nu+1)} e^{\frac{\alpha^2}{4p^2}} {}_1F_1\left(\frac{\nu-\mu}{2}+1, \nu+1; -\frac{\alpha^2}{4p^2}\right) \quad (A-1)$$

여기서 $\Gamma(x)$ 는 gamma function이고, ${}_1F_1(a, c; z)$ 는 confluent hypergeometric function^[10]이다. Swerling case I이나 II의 경우, 표적의 신호 A_k 는 식 (A-2)와 같은 Rayleigh 분포를 갖는다.

$$f(A_k) = \frac{A_k}{A_0^2} e^{-\frac{A_k^2}{2A_0^2}} \quad (A-2)$$

$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2+A^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{rA}{\sigma^2}\right)$ 에서 $\sigma=1$ 으로 가정하여 레이다에 수신된 표적의 신호 $f(r|A_k)$ 는 다음 식과 같다.

$$f(r | A_k) = re^{-\frac{r^2+A_k^2}{2}} I_0(rA_k) \quad (A-3)$$

여기서 표적의 신호 A_k 에 관계없는 수신신호 $f(r)$ 은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} f(r) &= \int_0^\infty f(r | A_k) f(A_k) dA_k \\ &= \int_0^\infty re^{-\frac{r^2+A_k^2}{2}} I_0(rA_k) \frac{A_k}{A_0^2} e^{-\frac{A_k^2}{2A_0^2}} dA_k \\ &= re^{-\frac{r^2}{2}} \int_0^\infty \frac{A_k}{A_0^2} e^{-\frac{1+(1+A_0^2)A_k^2}{2A_0^2}} I_0(rA_k) dA_k \end{aligned} \quad (A-4)$$

위 식은 식 (A-1)에서 $t = A_k, \mu = 2, \nu = 0, \alpha = r,$
 $p = \sqrt{\frac{1+A_0^2}{2A_0^2}}$ 인 경우이므로 식 (A-4)를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} &re^{-\frac{r^2}{2}} \int_0^\infty \frac{A_k}{A_0^2} e^{-\frac{1+(1+A_0^2)A_k^2}{2A_0^2}} I_0(rA_k) dA_k \\ &= \frac{\Gamma(1) \left(\frac{\alpha}{2p}\right)^0}{2 \left(\sqrt{\frac{1+A_0^2}{2A_0^2}}\right)^2 \Gamma(1)} e^{-\frac{r^2}{4 \frac{1+A_0^2}{2A_0^2}}} \cdot {}_1F_1\left(0, 1; -\frac{A_0^2 r^2}{2(1+A_0^2)}\right) \\ &= \frac{1}{\frac{1+A_0^2}{A_0^2}} e^{-\frac{A_0^2 r^2}{2(1+A_0^2)}} \cdot {}_1F_1\left(0, 1; -\frac{A_0^2 r^2}{2(1+A_0^2)}\right) \end{aligned} \quad (A-5)$$

여기서 ${}_1F_1(a, c; z) = 1 + \frac{az}{c} + \frac{a(a+1)z^2}{2!c(c+1)} + \dots$ 으로 전개되며, ${}_1F_1\left(0, 1; -\frac{A_0^2 r^2}{2(1+A_0^2)}\right) = 1$ 이 된다. 식 (A-5)를 정리하면 다음과 같은 $f(r)$ 의 해석적 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} f(r) &= re^{-\frac{r^2}{2}} \frac{1}{A_0^2} \int_0^\infty A_k e^{-\frac{1+(1+A_0^2)A_k^2}{2A_0^2}} I_0(rA_k) dA_k \\ &= re^{-\frac{r^2}{2}} \frac{1}{A_0^2} \left[\frac{A_0^2}{1+A_0^2} e^{-\frac{A_0^2}{2(1+A_0^2)} r^2} \right] \\ &= \frac{1}{1+A_0^2} re^{-\frac{1}{2(1+A_0^2)} r^2} \end{aligned} \quad (A-6)$$

References

- [1] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using Matlab*, CRC Press, 2000.
- [2] S. Blake, "OS-CFAR theory for multiple targets and non-uniform clutter", *IEEE Transactions on AES*, vol. 24, no. 6, 1988.
- [3] R. Ravid, N. Levanon, "Maximum-likelihood CFAR for Weibull background", *IEE Proceedings-F*, vol. 139, no. 3, 1992.
- [4] N. Levanon, *Radar Principles*, John Wiley & Sons, 1988.
- [5] R. B. Robert, "The Weibull distribution applied to the ground clutter backscatter coefficient", *Technical Report, Research and Engineering Directorate, U. S. AMC*, 1969.
- [6] P. P. Gandhi, S. A. Kassam, "Analysis of CFAR processors in nonhomogeneous background", *IEEE Trans. on AES*, vol. 24, no 4, 1988.
- [7] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Process*, McGraw-Hill, 1991.
- [8] A. Populios, *Probability & Statistics*, Prentice Hall, 1990.
- [9] G. N. Watson, *Theory of Bessel Functions*, Cambridge University Press, London and NewYork, 1944.
- [10] H. Cohen, *Mathematics for Scientists & Engineers*, Prentice Hall, 1992.

신 상 진



1989년~1995년: 한양대학교 제어계측공학과 (공학사)

1996년~1998년: 한양대학교 제어계측공학과 유도제어연구실 (공학석사)

1998년~2002년: 한양대학교 제어계측공학과 유도제어연구실 (공학박사)

2003년~2004년: K1 기술연구소 선임연

구원

2005년~2013년: 국방과학연구소 선임연구원

2014년~현재: 방위산업기술지원센터(국방과학연구소 부설) 선임연구원

[주 관심분야] 표적 추적필터, 레이더 신호처리 알고리즘, 레이더 파형 및 시스템 설계