Journal of the KIMST, Vol. 21, No. 2, pp. 141-146, 2018
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2018.21.2.141

Technical Paper | 센서 · 신호처리 부문

GMTI 시스템 개발을 위한 CFAR 임계치 최적화

김소연[*,1)] · 윤상호[1)] · 신현익[1)]

[1)] 국방과학연구소 제3기술연구본부

Demonstration of Optimizing the CFAR Threshold for Development of GMTI System

So-Yeon Kim[*,1)] · Sang-Ho Yoon[1)] · Hyun-Ik Shin[1)]

[1)] *The 3rd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 25 September 2017 / Revised 6 February 2018 / Accepted 9 March 2018)

ABSTRACT

The Ground Moving Target Indication(GMTI) technique can detect the moving targets on land using its Doppler returns. Also, the GMTI system can work in night regardless of the weather condition because it is an active sensor that uses the electromagnetic waves as its source. In order to develop the GMTI system, Constant False Alarm Rate(CFAR) threshold optimization is important because the main performances like detection probability, false alarm rate and Minimum Detectable Velocity(MDV) are related deeply with CFAR threshold. These key variables are used to calculate CFAR threshold and then trade-off between the variables is performed. In this paper, CFAR threshold optimization procedures are introduced, and the optimization results are demonstrated.

Key Words : GMTI(지상이동표적지시기), Radar(레이다), Target(표적), Detection(탐지), Moving Target(이동 표적)

1. 서 론

네트워크 중심의 현대전에서 정보의 중요성이 부각되며 감시정찰체계에 대한 필요성이 증대되고 있다. 정보 수집, 감시 및 정찰에 대한 능력을 향상시키기 위한 플랫폼 중에서도 무인기가 주목 받고 있고[1], 날씨 및 주·야간에 영향을 적게 받으며 독립적으로 데이터를 획득할 수 있는 항공기 탑재 레이다 응용 기술의 활용도가 증가하고 있다[2]. 그중에서 GMTI는 레이다 기술의 일종으로 1970년대 미국의 Defense Advanced Research Projects Agency(DARPA)와 Stand Off Target Acquisition System(SOTAS)으로부터 발전되어 현재의 기술 수준이 되었다. GMTI는 지상의 차량, 전차 등의 금속성 이동 물체를 탐지하고, 해당 표적의 속도와 위치 정보를 획득하는 것을 목적으로 하며, 1985년 Joint STARS와 같은 유인기에 탑재된 것을 시작으로 레이다 기술이 발전함에 따라 Global Hawk와 같은 무인기에 탑재되어 운용되고 있다. GMTI는 지상의 이동표적을 탐지하기 위하여 하늘이 아닌 지표면을 향해 전자

* Corresponding author, E-mail: soyeonkim@add.re.kr

파를 방사하므로 지표면에서 반사된 오경보가 상대적으로 많다. 그러므로 적절한 오경보 수준을 유지하면서 높은 탐지 확률로 표적을 검출하는 것이 중요하다. 이를 위해서는 CFAR 검출기의 임계치를 최적화 하는 것이 필수적이다.

본 논문에서는 GMTI 시스템 개발을 목적으로 CFAR 임계치를 산출하는 과정에 대해 기술하고, 탐지 규격을 만족하는 최적의 CFAR 임계치를 획득하고자 한다.

2. CFAR 임계치 산출 과정

GMTI 시스템 개발을 위한 CFAR 임계치 최적화에 앞서 임계치를 산출하는 방법에 대해서 기술하도록 하겠다.

Fig. 1은 GMTI의 신호처리 과정이다. 일반적으로 레이다 시스템의 탐지 규격은 탐지 확률, 오경보 확률, 탐지하고자 하는 표적의 RCS로 정의된다. 이렇게 설정한 탐지 규격(탐지 확률, 오경보 확률)은 Fig. 1의 도플러 필터 뱅크(DFB, Doppler Filter Bank), CFAR, 클러스터링(Clustering), 이진누적기(M out of N binary integrator)의 처리 과정 후에 충족되어야 하는 최종 수치로서 탐지 확률 P_d와 오경보 확율 P_{fa}에 해당한다. 대부분 이진누적기 출력 단에서의 탐지 확률과 오경보 확률로 GMTI 규격이 정해지며 DFB부터 마지막 단계까지 각 단계에서 신호처리를 수행할 때마다 탐지 확률과 오경보 확률은 달라진다.

Range-Doppler 도메인에서 표적을 검출하는 과정은 CFAR 단에서 이루어지므로 실질적으로 CFAR 임계치가 필요한 단계는 CFAR 과정이다. 다만 탐지 확률과 오경보 확률이 이진누적기의 출력단에서 규격으로 정의되므로 단계마다 변화되는 탐지 및 오경보 확률을 거꾸로 계산하여 최종적으로 CFAR 임계치를 계산하여야 한다.

Fig. 2는 CFAR 임계치를 산출하기 위한 과정으로 설정한 레이다 시스템의 탐지 규격에서 이진누적기와 클러스터링, 도플러 필터 뱅크 처리를 거쳐 CFAR 임계치를 계산하기까지 단계마다 변화하는 탐지 확률과 오경보 확률을 나타낸다. P_d와 P_{fa}는 사용자 요구 조건에 맞도록 설정한 탐지 확률과 오경보 확률이고, P_{dCPI}, P_{faCPI}는 이진누적기 입력 탐지 확률과 오경보 확률이며, P_{faDFB}는 클러스터링 오경보 확률, P_{far}는 DFB 단위 셀(Cell)당 오경보 확률이다.

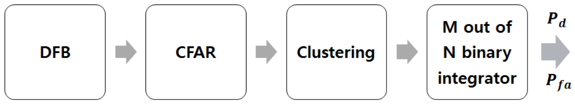

Fig. 1. GMTI signal processing diagram

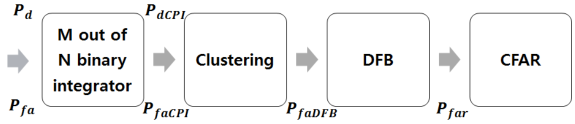

Fig. 2. The calculation process of CFAR threshold

이진누적 기법은 N번의 탐지에서 적어도 M번의 표적 탐지 여부를 판단하는 방법으로 펄스도플러 레이다에 널리 사용되며[3,4], N과 M에 의해 레이더 신호 탐지에서 요구되는 오경보 확률 및 탐지확률이 결정된다. 이진누적기를 사용했을 때의 Pd와 Pfa는 다음의 식으로 구할 수 있다[5]. 식 (1)은 N번 탐지 중 적어도 M번 탐지가 이루어져 표적을 탐지할 확률이고, 식 (2)는 N번 탐지 중 적어도 M번 오경보가 발생하여 오경보를 표적으로 탐지할 확률이다.

$$P_d = \sum_{m=M}^{N} \binom{N}{m} P_{dCPI}^{m} (1 - P_{dCPI})^{N-m} \tag{1}$$

$$P_{fa} = \sum_{m=M}^{N} \binom{N}{m} P_{faCPI}^{m} (1 - P_{faCPI})^{N-m} \tag{2}$$

클러스터링은 오경보를 줄이기 위해서 표적으로 검출되는 셀의 개수가 표적의 최소 크기보다 작은 경우에는 표적에서 제외하는 과정이다. 잡음에 의해 오경보가 발생할 수 있기 때문에 클러스터링 단계에서는 도플러 방향에서 연속으로 두 번 탐지되어야 표적으로 간주 한다. 클러스터링 단계에서 오경보 확률은 식 (3)과 같으며, 탐지 확률은 클러스터링 과정에서는 변하지 않는다.

$$P_{faCPI} = (P_{faDFB})^2 \tag{3}$$

도플러 필터 뱅크는, Coherent Processing Interval(CPI) 동안 N개의 펄스를 누적하여 Discrete Fourier Transform (DFT)를 수행함으로써 N개의 인접한 협대역 필터를 구성하여 처리하는 방법이다[6]. 도플러 필터 뱅크 처리는 표적의 속도 성분 추출을 가능하게 하고, 표적과

클러터를 효과적으로 구분하여 표적 검출 성능을 향상시킬 수 있다.

표적 탐지는 각 도플러 필터마다 거리방향으로 수행하므로 전체 도플러 필터에서 오경보가 발생하지 않을 확률(1-P_{faDFB})은 거리-도플러셀 확률이라고 하며, 식 (4)의 CFAR 처리 후 오경보 확률로부터 계산된다. 식에서 D는 탐지에 사용되는 도플러 필터 개수이다.

$$(1-P_{faDFB})=(1-P_{far})^{D} \tag{4}$$

다음으로 GMTI 신호처리 과정에서 표적을 판별하기 위해서는 CFAR 검출기가 사용된다. CFAR 검출기는 Neyman-Pearson 검출 이론에 기반을 두고 있으며, 테스트하고자 하는 셀(Test cell)의 주변셀(Reference cell)로부터 잡음의 평균 파워를 추정하여 그 값을 통해 얻어지는 임계치(CFAR 상수)와 테스트 셀을 비교하여 표적 신호의 유무를 판단하는 것이다.

Fig. 3은 CFAR에서 사용되는 슬라이딩 윈도우이다. 가운데 셀이 표적의 존재 여부를 검사하게 되는 테스트셀이고, 주변셀은 테스트셀을 검사하는데 사용되는 임계치를 계산하는 셀이다. 테스트셀 좌우로는 표적의 정보가 포함될 가능성이 있기 때문에 주변셀에 포함시키지 않아야 제대로 된 임계치를 산출할 수 있다. 이렇게 임계치 계산에서 제외시키는 셀을 가드셀이라고 부르며 가드셀은 탐지하고자 하는 표적의 크기와 비례하여 셀의 개수를 설정하여야 한다.

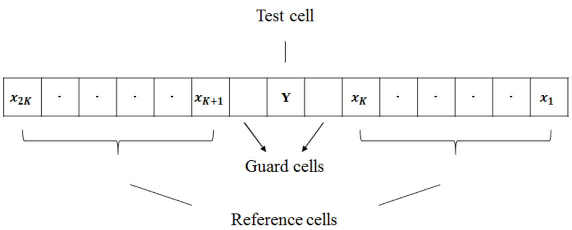

Fig. 3. Definition of the test cell, guard cells and reference cells for CA and GO CFAR[7]

CFAR 임계치를 계산하기 위해서는 앞선 과정에서 산출한 탐지(P_{dCPI}) 및 오경보 확률(P_{far})이 필요하다. 임계치는 테스트 셀의 오경보 확률을 일정하게 유지시키도록 주변 클러터 상태에 따라 적응적으로 결정되며, 잡음의 파워를 추정할 때 사용되는 알고리즘의 종류에 따라 검출기의 특성이 달라진다. CFAR 검출기의 최적의 성능을 위해서는 수신 신호에 대한 가정을 실제 환경과 유사하게 하는 것이 중요하다. 다양한 알고리즘 중 Cell Average-CFAR(CA-CFAR) 검출기는 균질한 잡음배경에서 최적의 성능을 보인다. 그러나 CA-CFAR 검출기는 클러터 특성이 변하는 부분에서 오경보 확률이 증가하고, 또 다른 목표물이 가까이 존재하여 간섭으로 작용하는 경우에 검출 확률이 감소하는 문제점이 있다. 이러한 불균질 잡음 배경에서의 CA-CFAR 검출기 문제점을 해결하기 위해 여러 가지 형태의 CFAR 검출기들이 제안되었다. 그 중 Greatest Of-CFAR(GO-CFAR)는 양쪽의 셀 집합의 평균을 비교하여 값이 큰 쪽을 선택하여 임계치를 계산하는 것이다[8]. GO-CFAR는 클러터 경계 환경에서 오경보 확률을 낮추는 장점을 보이지만 표적이 여러 개이거나 간섭 신호가 특정 윈도우에서 강하게 나타날 때에는 오히려 CA-CFAR보다 성능이 저하되는 단점이 있다. 본 연구에서는 CA-CFAR와 GO-CFAR 모두에 대한 CFAR 임계치를 산출하였고 사용된 식은 각각 다음과 같다.

CA-CFAR 임계치는 식 (5)로부터 계산되며[9] K는 주변셀의 개수이고 임계치 계산에 필요한 T_{CA}는 식 (6)으로부터 계산할 수 있다. 식 (7)은 클러스터링 후의 탐지 확률로써 P_{dCPI}에 해당한다. 계산에 필요한 SNR을 구하는 식은 식 (8)과 같다.

$$TH_{CA}=T_{CA}\times\sum_{i=1}^{2K}x_i^2 \tag{5}$$

$$T_{CA}=(P_{far})^{-1/(2K)}-1 \tag{6}$$

$$P_{dCPI}=\left[1+\frac{T_{CA}}{1+SNR}\right]^{-2N} \tag{7}$$

$$SNR=\frac{\log P_{fa}}{\log P_d}-1 \tag{8}$$

GO-CFAR 임계치는 다음 식 (9)로부터 계산되며 K는 주변셀의 개수이다.

$$TH_{GO}=T_{GO}\times\max\left(\sum_{i=1}^{K}x_i^2,\ \sum_{i=K+1}^{2K}x_i^2\right) \tag{9}$$

$$P_{far}=2(1+T_{GO})^{-K}\ldots \\ -2\sum_{i=0}^{K-1}\frac{(K-1-i)!}{i!(K-1)!}(2+T_{GO})^{-(K+i)} \tag{10}$$

$$P_{dCPI} = 2(1+\frac{T_{GO}}{1+SNR})^{-K} \cdots - 2\sum_{i=0}^{K-1} \frac{(K-1-i)!}{i!(K-1)!}(2+\frac{T_{GO}}{1+SNR})^{-(K+i)} \quad (11)$$

3. CFAR 임계치 최적화 결과

앞서 기술한 CFAR 임계치를 산출하는 방법을 이용하여 탐지에 적용되는 DFB 수를 결정하고 탐지 확률과 오경보 확률로부터 실제 CFAR 임계치를 다음과 같이 계산하였다. 먼저, 설정한(누적기 출력) 탐지 확률과 오경보 확률로부터 이진누적기에 입력되는 탐지 확률과 오경보 확률을 산출하였다. 탐지 확률 75 %로부터 계산된 누적기 입력 탐지 확률은 54.37 %이고, 결과는 Fig. 4와 같다. 설정한 오경보 확률은 10^{-5}이며, Fig. 5로부터 계산된 누적기 입력 오경보 확률은 $1.292*10^{-3}$이다. 다음 거리-도플러셀 확률을 산출하는 과정에서 탐지 확률은 영향을 받지 않아 이전 단계와 동일한 탐지 확률을 가지므로 본 단계에서는 오경보 확률에 대해서만 계산을 수행하였고 그 결과는 Fig. 6과 같다. 탐지에 적용되는 DFB 수는 64개이며 오경보 확률은 $2.021*10^{-5}$로 계산되었다. 다음으로 표적 탐지에 실제 적용되는 수치인 CFAR 임계치를 앞서 언급한 식으로부터 계산하였다. CFAR 임계치는 CA-CFAR와

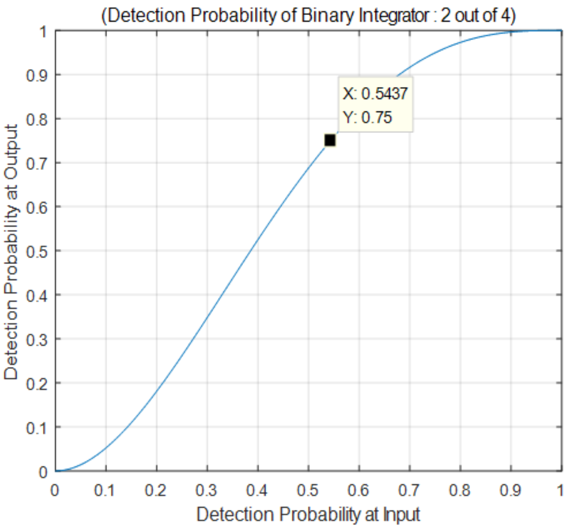

Fig. 4. The input detection probability of 2 out of 4 detector

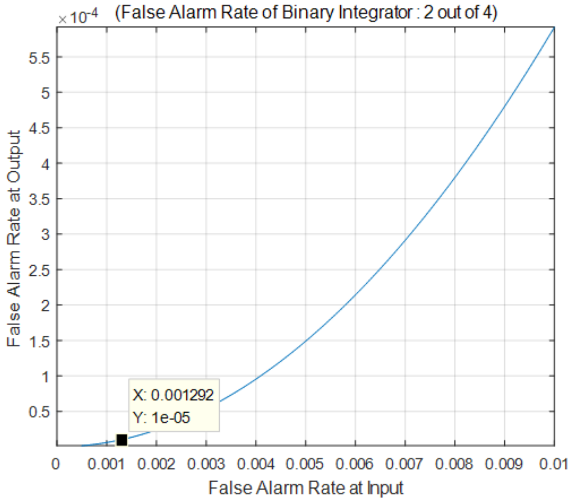

Fig. 5. The input false alarm rate of 2 out of 4 detector

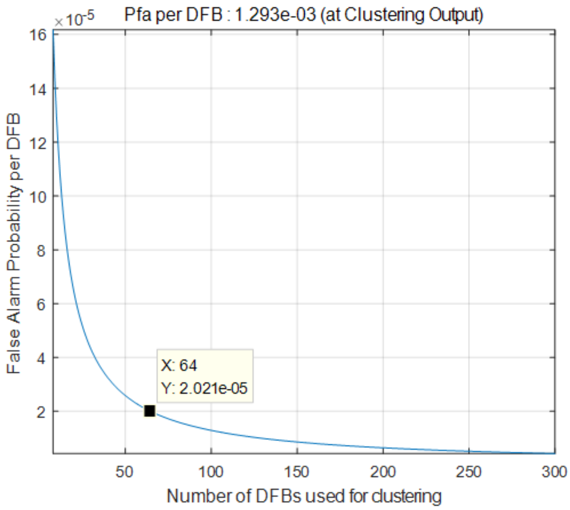

Fig. 6. The false alarm rate per DFB

GO-CFAR 두 가지에 대하여 계산하였고, 해당하는 값은 각각 0.4018, 0.7276이다. 실제 GMTI 운용 시에는 사용자의 선택으로 둘 중 한 가지를 선택할 수 있다.

더불어 마지막 단계의 탐지 확률과 오경보 확률로부터 Fig. 7과 같이 SNR을 계산할 수 있는데 만약 SNR이 충분하지 않을 때에는 앞선 확률을 조정해야 한다. GMTI 체계 설계에서는 설정한 탐지거리에서 최대 성능을 만족하기 위해 펄스폭, 누적펄스, PRF 등을 다르게 하여 여러 개의 swath를 구성하고 탐지 거리

에 따라 swath를 선택적으로 사용한다. SNR에 따른 탐지 성능을 만족하는지 확인하기 위하여 swath별 탐지 커버리지를 Fig. 8과 같이 작성하였다. 산출한 CFAR 임계치 값을 적용하였을 때 해당 탐지거리에서 SNR이 충분한지 확인하기 위해서는 Fig. 8에서 각 swath의 SNR이 해당 threshold보다 높은 위치에 있어야 한다.

Table 1은 앞서 기술한 탐지확률과 오경보 확률, CA-CFAR, GO-CFAR 임계치 등을 정리한 것이다.

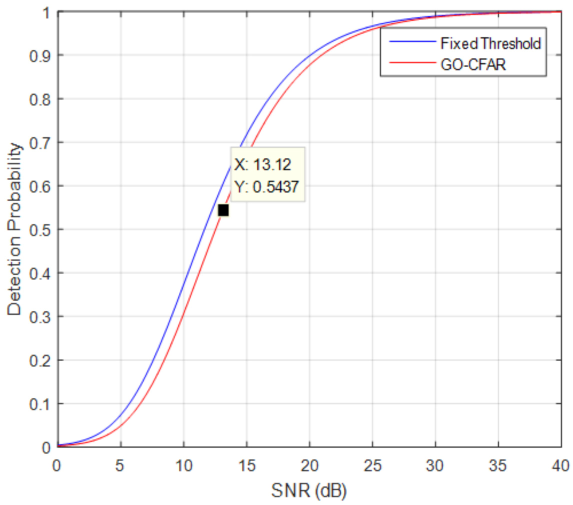

Fig. 7. The detection probability and SNR

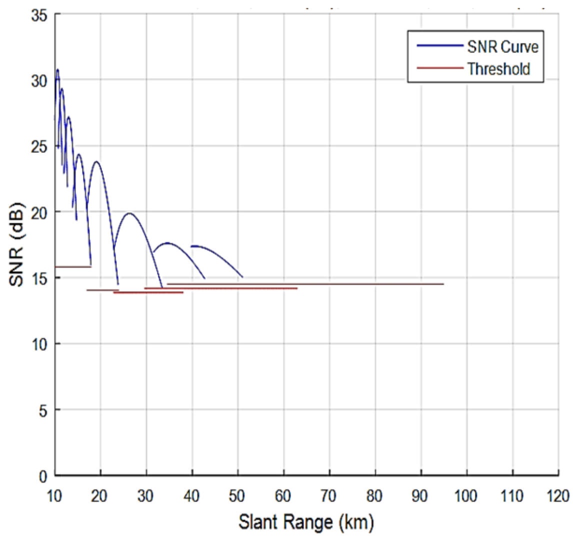

Fig. 8. Range coverage

Table 1. Summary of parameter value

Parameter		Value
Pulse width		60 μs
Number of pulses integrated		64
PRF (Hz)		940
		1,180
		1,420
		1,660
Number of DFBs used for clustering		64
T_{CA}		0.4018
T_{GO}		0.7276
Required SNR (dB)		13.12
Detection probability & false alarm rate	P_{faDFB}	$2.021*10^{-5}$
	P_{dCPI} & P_{far}	54.37 % $1.292*10^{-3}$
	P_d & P_{fa}	75 % 10^{-5}

4. 결과 검증

계산한 CFAR 임계치가 맞는지 검증하기 위해 정규분포를 따르는 노이즈 데이터를 임의로 생성하여 표적 검출을 수행하였다. 이 때 검출된 표적 개수와 기대하는 표적 개수를 비교하여 설정한 오경보 확률을 만족하는지 확인하였다. 시뮬레이션을 위한 입력 데이터 구조는 Fig. 9와 같다. 64*3689 크기의 4개 burst를 6세트로 가정하고, 총 25개의 revisit을 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 25개 revisit에 대해 기대하는 오경보 개수는 총 2,862인데, CA-CFAR와 GO-CFAR에서 각각 2,797과 2,792개의 표적이 검출되었다(Table 2). 설정한 확률 대비 약 2 %의 오차가 발생하였으며, 이로부터 실제 데이터를 획득하여 GMTI 신호처리를 수행한다면 탐지 및 오경보 확률이 설계치와 비슷하게 나타날 것으로 예측할 수 있다.

Table 2. Verification results

Methods	Revisit												Sum	Expected value	error
	1	2	3	4	5	6	⋯	21	22	23	24	25			
GO-CFAR	104	105	119	101	128	117	⋯	103	97	104	96	115	2,792	2,862	-2.4 %
CA-CFAR	104	107	121	103	122	116	⋯	112	117	95	104	109	2,797		-2.2 %

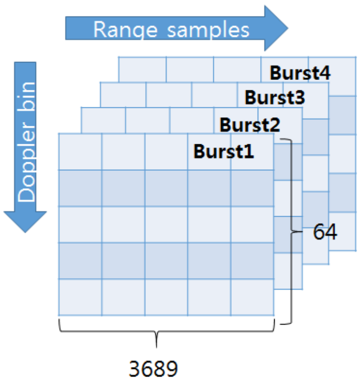

Fig. 9. Data structure for simulation

5. 결 론

본 논문에서는 GMTI 시스템 개발을 위한 CFAR 임계치 최적화에 대해 기술하였다. CFAR 임계치를 산출하기 위한 주요 변수는 탐지에 적용되는 DFB 수, 탐지 확률, 오경보 확률이며 CFAR 알고리즘에 따라서도 CFAR 임계치는 달라진다. 또한 본 논문에서는 실제 CFAR 임계치 계산에 대한 예제를 제시하였고 시뮬레이션을 통해 이에 대한 검증을 수행하였다.

CFAR 임계치 최적화 과정은 GMTI 시스템 개발에서 필수적인 요소로서 GMTI 시스템 성능에 직접적인 영향을 준다. 따라서 본 논문에서 기술한 체계적이고 합리적인 CFAR 임계치 산출은 시스템 신뢰성 확보에 크게 도움이 될 것이다.

References

[1] B. Himed and M. Soumekh, “Synthetic Aperture Radar-Moving Target Indicator Processing of Multi-Channel Airborne Radar Measurement Data,” Proc. Inst. Elect. Eng. Radar Sonar Navig., Vol. 153, No. 6, pp. 532-543, Dec., 2006.

[2] S. Y. Kim, S. H. Yoon, H. I. Shin and J. H. Youn, “Airborne GMTI Data Processing and Analysis,” KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 227-228, June. 8, 2017.

[3] M. A. Weiner, “Integration of Fluctuating Targets,” IEEE Transactions on AES, Vol. 27, No. 1, pp. 11-17, 1991.

[4] Y. Norouzi et al., “Optimization of Binary Integrators for Decentralized Detection,” IET Radar Sonar Navigation, Vol. 2, No. 1, pp. 42-50, 2008.

[5] H. I. Shin, B. T. Jeon, C. G. Hwang and C. Kim, “Analysis for Azimuth Accuracy of Binary Integrator,” KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 1025-1025, June. 3, 2011.

[6] M. I. Skolnik, “Introduction to RADAR Systems (Third Edition),” Mc Graw Hill Education, India, p. 784, 2001.

[7] H. Rohling, “Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situations,” IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-19, No. 4, pp. 608-621, 1983.

[8] V. G. Hansen, “Detectability Loss Due to Greatest of Selection In a Cell-Averaging CFAR,” IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AS-16, pp. 115-118, 1980.

[9] P. P. Gandhi and Kassam, S. A., “Analysis of CFAR Processors in Nonhomogeneous Background,” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. 24, No. 4, pp. 428-445, 1988.