

# 해상환경에서 실측된 도플러 레이더 신호 기반 CA-CFAR와 K-분포 CFAR 탐지성능 비교

## Performance Comparison of CA-CFAR and K-Distribution-Based CFAR Using Measured Doppler Radar Signals in Maritime Environments

김 동 섭 · 안 성 진 · 정 인 화

Dong-Seob Kim · Sung-Jin Ahn · In-Hwa Jung

### 요 약

본 논문에서는 해상환경에서 실측된 CW 및 FMCW 도플러 레이더 데이터를 이용하여 해상 클러터의 통계적 특성을 분석하고, K-분포 기반 CFAR 탐지 기법을 CA-CFAR와 비교 분석하였다. 실측 도플러 전력 분포는 heavy-tail 특성을 보였으며, 적합도 검정 결과 K-분포가 지수 분포 대비 약 11 % 우수한 적합도를 나타냈다. 탐지성능 비교 결과, K-CFAR는 오경보율을 CA-CFAR 대비 약 28~34 % 감소시키는 반면 검출확률은 CW에서 약 28 %, FMCW에서 약 2 % 감소하였으며, FMCW 환경에서 성능 저하가 최소화되어 효과적임을 확인하였다.

### Abstract

This study analyzes the statistical characteristics of maritime clutter using measured CW and FMCW Doppler radar data and compares the detection performance of K-distribution-based CFAR with that of conventional CA-CFAR. The measured Doppler power distribution exhibited heavy-tailed characteristics, and goodness-of-fit tests showed that the K-distribution provided approximately 11 % better fit than the exponential distribution. Performance comparison results indicated that K-CFAR reduced the false alarm rate by approximately 28~34 % compared to CA-CFAR, whereas the detection probability decreased by approximately 28 % in CW environments and 2% in FMCW environments. In FMCW environments, the performance degradation was minimized, confirming its effectiveness.

Key words: Maritime Clutter, Doppler Radar, K-Distribution, CFAR Detection, False Alarm Rate

### I. 서 론

도플러 레이더는 표적의 상대 속도 정보를 직접적으로 제공할 수 있어 해상 감시 및 시험평가, 무인기 탐지 등 다양한 분야에서 핵심적인 역할을 수행하고 있다<sup>[1]</sup>. 특히

해상환경에서는 표적의 이동 속도와 방향에 따른 도플러 특성이 탐지성능을 좌우하는 중요한 요소로 작용한다<sup>[2]</sup>. 그러나 해상환경은 파정(crest), 백파(whitecaps), 선박 항적(wake) 등 다양한 산란체로 인해 클러터 특성이 시공간적으로 크게 변동하며, 이로 인해 도플러 전력 분포가 비

국방과학연구소 6연구원(6 Research Institute, Agency for Defense Development)

· Manuscript received January 28, 2026 ; Revised February 9, 2026 ; Accepted March 16, 2026. (ID No. 20260128-004)

· Corresponding Author: Dong-Seob Kim (e-mail: dongsup29@add.re.kr)

정상적인 통계 특성을 나타내는 경우가 많다<sup>[1][3]-[5]</sup>.

이는 레이더 신호처리 단계에서 오경보율(false alarm rate)을 증가시키는 주요 요인이다<sup>[3][4]</sup>. 특히 평균 전력 기반의 임계치 형성 방식은 클러터 분포의 heavy-tail 특성을 충분히 반영하지 못할 경우, 일부 프레임에서 과도한 오경보를 유발할 수 있다<sup>[1]</sup>. 따라서 해상환경에서의 안정적인 표적 탐지를 위해서는 클러터의 특성을 보다 정밀하게 반영할 수 있는 탐지 기법이 요구된다.

일정 오경보율 유지를 위한 CFAR(constant false alarm rate) 기법은 레이더 탐지 분야에서 널리 활용되고 있다. 그중 CA-CFAR(cell-averaging CFAR)는 구현이 간단하고 계산 복잡도가 낮아 다양한 응용 환경에서 사용된다<sup>[3]</sup>. 그러나 CA-CFAR는 참조 셀(reference cell) 전력이 지수 분포를 따른다는 가정을 기반으로 임계치를 형성하므로, 해상환경과 같이 클러터 전력 분포가 heavy-tail 특성을 보이는 경우에는 오경보 억제 성능에 한계를 가질 수 있다<sup>[4][5]</sup>. 이러한 한계를 보완하기 위해 K-분포, Weibull 분포 등 다양한 통계 모델을 활용한 CFAR 기법들이 제안되어 왔다<sup>[1][6]</sup>. 특히 K-분포는 해상 클러터와 같이 산란 강도의 변동성이 큰 환경에서 전력 분포의 꼬리 특성을 효과적으로 표현할 수 있는 모델로 알려져 있다<sup>[1][5][7]</sup>. 이를 기반으로 한 K-분포 기반 CFAR(K-CFAR)는 해상 클러터 환경에서 이론적 우수성이 보고되어 왔다<sup>[7]-[9]</sup>.

그러나 기존 연구의 상당수는 시뮬레이션 데이터 또는 제한적인 실험 환경에 기반하고 있다. 실제 해상시험 환경에서 장시간 수집된 도플러 레이더 실측 데이터를 이용하여 K-CFAR의 탐지 특성을 체계적으로 분석한 사례는 상대적으로 부족하다<sup>[10][11]</sup>. 또한 CW(continuous wave) 및 FMCW(frequency modulated continuous wave) 파형을 동일 조건에서 비교하거나, 실측 표적의 운동 정보와 도플러 주파수 간 물리적 일관성을 검증한 연구는 제한적이다.

본 논문에서는 실측 해상 도플러 레이더 데이터를 이용하여 K-분포 기반 CFAR의 적용 타당성을 정량적으로 검증한다. 이를 위해 분포 적합도 검정, ROC(receiver operating characteristic) 기반 탐지성능 분석, 형상 파라미터 민감도 분석을 함께 수행한다.

논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 해상시험 환

경과 실측 데이터 획득 과정, 도플러 신호처리 및 DTI(Doppler time intensity)/RD(range-Doppler) map 생성 방법을 설명한다. III 장에서는 해상 클러터의 통계적 특성 분석, K-분포 기반 모델링, CFAR 처리 구조를 제시한다. IV 장에서는 임계치 형성 특성 및 CW/FMCW 탐지성능을 비교한다. 마지막으로 V 장에서는 연구 결과를 요약하고 향후 연구 방향을 제시한다.

## II. 해상시험 및 실측 데이터 개요

### 2-1 해상시험 환경 및 데이터 획득

사용된 도플러 레이더 데이터는 실제 해상환경에서 획득된 실측 I/Q 복소(baseband) 신호로 구성된다. 시험은 동해 연안 및 근해 해역에서 수행되었으며, 파정, 백파, 선박 항적 등 해면 상태 변화와 표적 기동이 동시에 존재하는 조건에서 진행되었다. 또한, 도플러 성분 및 클러터 변동성이 충분히 포함되도록 연속 계측을 실시하였다.

실측 데이터는 단일 레이더 장비에 구성된 총 16개 채널 중, 8개의 송신채널(Tx)과 8개의 수신채널(Rx)을 갖는 구조에서 획득되었다. 채널 1~4는 CW 신호, 채널 5~8은 FMCW 신호에 해당한다. 각 수신 채널은 I 신호와 Q 신호 두 개의 스트림으로 분리되어 저장되므로, 원시 데이터는 총 16개 스트림( $I_1 \sim Q_1, \dots, I_8 \sim Q_8$ )으로 관리된다. 원시 바이너리 프레임은 128 bytes의 고정 길이 헤더와 I/Q 샘플 블록으로 구성되며, 헤더에는 프레임 번호 및 시간 정보 등 채널 간 동기화를 위한 메타데이터가 포함된다.

원시 데이터 처리 과정에서는 프레임 헤더의 동기 마커를 기반으로 프레임 경계를 식별하고, 각 스트림에서 추출된 프레임 번호를 비교하여 모든 스트림에 공통으로 존재하는 프레임만을 선택하는 방식으로 채널 간 동기화를 수행하였다. 이 방식은 파일 단위가 아닌 프레임 단위의 정합을 수행하므로, 스트림 간 파일 분할 경계가 상이하더라도 시간 정렬의 일관성을 확보할 수 있다.

동기화된 데이터는 채널별로 I 신호와 Q 신호를 결합하여 복소수 신호로 재구성한 후 [fast-time]-[채널]-[프레임]으로 구성된 데이터 큐브(data cube) 형태로 저장하였다. 처리 효율과 저장 관리의 용이성을 고려하여 데이터

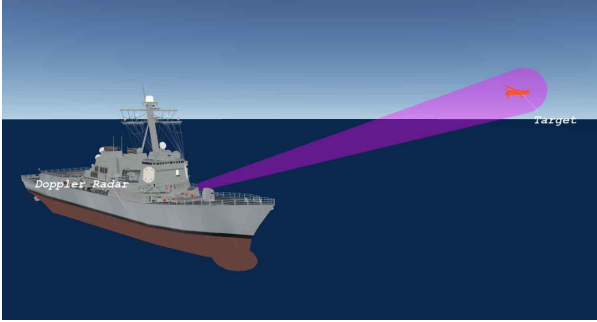


그림 1. 해상시험 시나리오 및 데이터 획득 개념도  
Fig. 1. Conceptual illustration of maritime test scenario and data acquisition setup.

큐브는 일정 프레임 단위로 분할 저장하였으며, 후속 분석에서는 이를 연속적으로 결합하여 하나의 시간 구간으로 구성하였다. 또한 아날로그-디지털 변환기(ADC)의 스케일에 따른 영향을 제거하기 위해 로딩된 신호를 ADC의 최대 출력값으로 정규화하여 채널 간 전력 비교가 동일한 기준에서 이루어지도록 하였다.

해상시험 시나리오의 개념적 구성은 그림 1에 나타내었다. 그림 1은 해상시험 환경에서 레이더, 표적, 해상 클러터 간의 기하학적 관계와 데이터 획득 구성을 개념적으로 도시한 것으로, 3차원 기반 시뮬레이션 환경(SIMDIS, simulation dissemination and integration system)에서 선박과 표적이 해상에 배치된 구조를 간략히 표현한다.

이는 이후 제시되는 도플러 성분의 부호 해석과 시간-도플러 분석 결과에 대한 물리적 직관을 제공한다. 시험 조건과 데이터 구성의 주요 항목은 표 1에 요약하였다. 이와 함께 시험에 사용된 선박 탑재형 레이더 시스템의 주요 사양은 표 2에 정리하였으며, 탐지성능 해석에 활용된 표적의 기본 특성과 ground truth 정의는 표 3에 제시하였다.

### 2-2 도플러 신호처리 및 DTI/RD Map 생성

원시 데이터는 프레임 단위로 저장되며, 각 프레임 길이가  $T_{sweep}$ 은 40 ms이다. 따라서 총  $N_{frame}$ 개의 프레임을 사용하는 분석 구간의 관측 시간은 식 (1)로 정의된다.

$$T_{obs} = N_{frame} \times T_{sweep} \quad (1)$$

예를 들어, 4,000 프레임을 사용할 경우  $T_{obs}$ 는 160초가

표 1. 해상시험 데이터 구성 및 신호처리 파라미터 요약  
Table 1. Summary of maritime test data configuration and signal processing parameters.

Parameter	Description
Test environment	East Sea coastal and offshore region
Radar waveform	CW (Channel 1~4), FMCW (Channel 5~8)
Data format	I/Q complex signal, 16 streams
Frame length	40 ms
Sampling frequency	1 MHz
FFT length	$N_{FFT}=10,000$ (decimation factor D=4)
Window function	Hann window, no overlap
Channel combination	Non-coherent power summation
Frames per file	1,000

표 2. 레이더 시스템 사양  
Table 2. Overview of shipborne radar system parameters.

Parameter	Description
Platform type	Shipborne radar system
Frequency band	X-band
Bandwidth (B)	CW: single frequency/FMCW: 50 MHz
Antenna gain	Approximately 40 dBi
FMCW chirp time ( $T_c$ )	40 ms (same as frame length)
FMCW chirp slope	$S=B/T_c$ (linear frequency sweep)

표 3. 표적 특성 요약  
Table 3. Summary of target characteristics.

Parameter	Description
Target type	Small jet-powered UAV target
Observed radial velocity	Approximately 50~140 m/s
Operational altitude	Tens of meters to several kilometers
Ground truth	Manually verified using DTI and RD map analysis

된다. 이후 제시되는 장시간 DTI는 이 관측 구간을 기준으로 구성된다.

데이터 큐브에서 추출한 채널별 복소 신호  $x_k[n, m]$ (채

널  $k$ , 프레임  $m$ )에 대해 주파수 분석의 안정성을 확보하기 위한 DC 성분 제거 및 진폭 정규화 등을 선택적으로 적용하였다. 또한 장시간 프레임 누적 분석에서 연산량을 절감하고 주파수 축 표현을 단순화하기 위해 데시메이션 계수  $D$ 는 4를 적용하였다. 데시메이션 과정에서는 FIR(finite impulse response) decimator를 사용하였으며, 저역통과 필터를 선행하여 aliasing을 억제하였다. 데시메이션 이후 FFT 길이는 식 (2)와 같이 설정되며( $N$ : 프레임 당 샘플 수), 이후 시간-주파수 분석은  $N_{FFT}$ 를 기반으로 수행하였다.

$$N_{FFT} = \left\lfloor \frac{N}{D} \right\rfloor \quad (2)$$

도플러 성분의 시간 변화를 관찰하기 위해 STFT (short-time Fourier transform) 기반의 시간-주파수 해석을 사용하였다. 프레임 전체를 시간 축으로 배열한 신호에 대해 Hann 윈도우  $w[n]$ 을 적용하고, 연산 효율을 고려하여, 오버랩 없이(noverlap=0) 스펙트로그램을 계산하였다. STFT는 식 (3)으로 정의되며, 전력 스펙트럼은  $|X(\ell, f)|^2$ 로 계산된다.

$$X(\ell, f) = \sum_{n=0}^{N_{FFT}-1} x[n + \ell] w[n] e^{-j2\pi f n} \quad (3)$$

CW 채널의 경우 4개 채널 1~4에서 얻어진 전력 스펙트럼을 비코히어런트 방식으로 합산하여 단일 도플러 스펙트럼으로 식 (4)와 같이 구성하였다. 또한, FMCW 채널도 동일하게 4개 채널 5~8의 전력을 합산하여 식 (5)와 같이 나타내었다.

$$P_{CW}(t, f) = \sum_{k=1}^4 |X_k(t, f)|^2 \quad (4)$$

$$P_{FMCW}(t, f) = \sum_{k=5}^8 |X_k(t, f)|^2 \quad (5)$$

이와 같은 다채널 전력 합산은 단일 채널에서 발생할 수 있는 페이딩 또는 순간 저하의 영향을 완화하고, 장시간 DTI에서 표적 및 클러터 추적의 안정성을 향상시키는 효과가 있다.

DTI는 시간-도플러 평면에서의 전력 분포로 정의되며,

앞에서 계산한  $P_{CW}(t, f)$ ,  $P_{FMCW}(t, f)$ 를 dB 스케일로 변환하여 식 (6)과 같이 표현하였다.

$$DTI(t, f) = 10 \log_{10}(P(t, f)) \quad (6)$$

또한 도플러 주파수  $f_d$ 는 레이다 반송 주파수  $f_c$  및 파장  $\lambda$ 에 대해 식 (7)과 같은 관계를 갖는다.

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} = \frac{2v_r f_c}{c} \quad (7)$$

여기서  $v_r$ 은 레이다 시선 방향 방사속도,  $c$ 는 광속이다. 이를 통해 도플러 주파수 축을 방사속도 축으로 변환할 수 있다.

그림 2는 실측 데이터로부터 생성된 CW 채널의 DTI 결과를 나타낸다. CW 신호는 거리 분해 능력이 존재하지 않기 때문에 해상환경에서 발생하는 클러터와 표적 성분이 동일 도플러 축상에 중첩되어 나타나며, 특정 도플러 성분의 시간적 변동 특성을 관찰하는 데 유용하다. 이러한 특성으로 인해 CW DTI는 장시간 관측 구간에서 도플러 성분의 안정성 및 환경 변화에 따른 변동성을 직관적으로 확인할 수 있다.

그림 3은 동일한 관측 구간에 대해 FMCW 채널에서 생성된 DTI 결과를 나타낸다. 거리 FFT를 통한 거리 분해 효과로 인해 정지 또는 저속 클러터 성분이 상대적으로

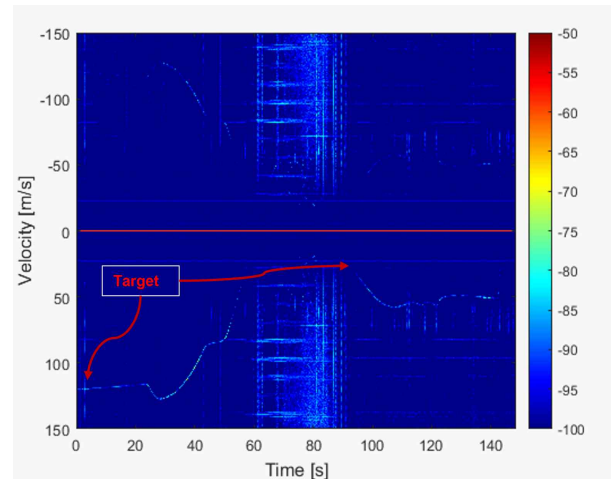


그림 2. CW 채널 DTI 결과(관측구간 4,000 프레임, 160s)  
Fig. 2. DTI Obtained from the CW channel (observation interval 4,000 frames, 160s).

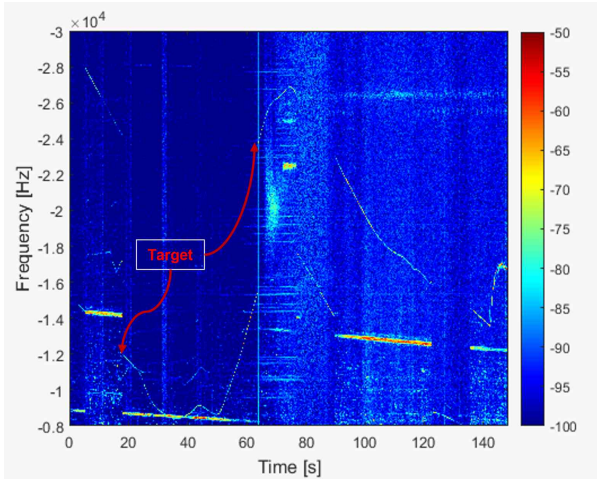


그림 3. FMCW 채널 DTI 결과(관측구간 4,000 프레임, 160s)  
 Fig. 3. DTI Obtained from the FMCW channel (observation interval 4,000 frames, 160s).

로 억제되며, 표적에 기인한 도플러 성분이 시간 축을 따라 보다 명확한 궤적으로 관측된다. 이는 FMCW 신호가 CW 신호에 비해 클러터 환경에서 표적 도플러 성분을 분리·강조하는 데 유리함을 보여주며, 이후 RD Map 및 CFAR 기반 탐지성능 분석의 물리적 근거로 활용된다.

FMCW 신호의 경우 beat 주파수  $f_b$ 는 거리 성분과 도플러 성분의 합으로 나타나며, 일반적으로 식 (8)과 같이 나타난다.

$$f_b \approx f_r + f_d \rightarrow f_r = \frac{2RB}{cT_{sweep}} \quad (8)$$

여기서  $B$ 는 송신 대역폭,  $R$ 은 표적까지의 거리,  $c$ 는 광속이다. 도플러 성분이 추정되면 beat 주파수로부터 거리 성분을 분리하여 표적의 방사속도와 슬랜트 거리를 산출할 수 있다. 또한 표적과 클러터의 분포를 2차원으로 확인하기 위해 거리 FFT 이후 도플러 FFT를 수행하여 RD map을 구성하였다. 그림 4는 해상환경에서 획득한 도플러 레이더 데이터로부터 생성된 RD Map을 나타낸다.

이상의 처리 과정을 통해 얻어진 프레임별 도플러 전력 벡터는 III~IV장에서 CFAR 임계치 형성과 탐지성능 비교를 위한 입력 데이터로 사용된다. 동일한 전처리 조건, FFT 설정 및 채널 결합 방식을 유지한 상태에서 CA-CFAR와 K-CFAR를 각각 적용함으로써, 임계치 형성

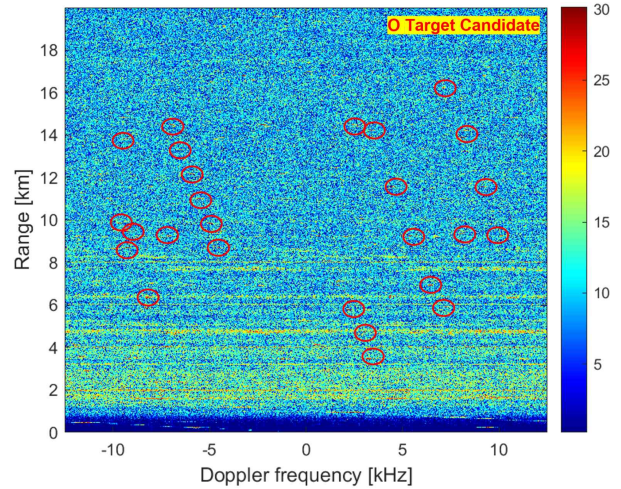


그림 4. 해상환경에서 획득한 도플러 레이더 신호의 거리-도플러 맵(도플러 주파수 약  $\pm 3 \sim 10$  kHz 구간은 표적 방사속도 50~140 m/s에 대응)

Fig. 4. Range-Doppler Map of measured Doppler radar signals in a maritime environment (the Doppler frequency band of approximately  $\pm 3 \sim 10$  kHz corresponds to target radial velocities of 50~140 m/s).

특성의 차이와 이에 따른 오경보율 및 검출확률을 정량적으로 비교·분석한다.

### III. 해상 클러터 특성 및 K-분포 기반 CFAR

#### 3-1 해상 도플러 클러터의 통계적 특성

해상환경에서 관측되는 도플러 클러터는 해면을 구성하는 다수 산란체의 복합적인 운동에 의해 형성된다<sup>[1],[3]</sup>. 이로 인해 클러터 전력의 평균과 분산은 시간에 따라 지속적으로 변동하며, 도플러 영역에서는 중심 주파수 주변으로 에너지가 확산되는 특성을 보인다. 특히 해면 상태 변화가 큰 경우, 도플러 스펙트럼의 확산 폭이 비정상적으로 증가하는 경향이 관찰된다<sup>[2]</sup>.

II장에서 기술한 바와 같이, 도플러 전력 스펙트럼은 STFT를 통해 산출되며, 각 시간 프레임  $m$ 에 대해 도플러 주파수  $f_i$ 의 전력값  $P(m, f_i)$ 로 표현된다. 이때 특정 도플러 구간(예: 저도플러 클러터 영역)에서 추출된 전력 샘플 집합을  $\{z_1, z_2, \dots, z_N\}$ 은 클러터의 통계적 특성을 나타내는 확률 변수로 간주된다. 이상적인 열잡음 환경에서는

이러한 전력 샘플이 지수 분포(exponential distribution)를 따르며, 확률밀도함수(PDF, probability density function)는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$p(z) = \frac{1}{\mu} e^{-z/\mu}, \quad z \geq 0 \tag{9}$$

여기서  $\mu$ 는 평균 전력을 의미한다. 그러나 실측 해상 클러터 데이터의 히스토그램 및 경험적 누적분포함수(ECDF, empirical cumulative distribution function)를 분석한 결과, 평균 전력 대비 큰 값을 갖는 샘플이 지수 분포 예측보다 상대적으로 빈번하게 발생하는 heavy-tail 특성이 관찰된다[14],[5].

그림 5는 32,977개의 해상 클러터 전력 샘플(평균  $2.49 \times 10^{-7}$ )에 대해 지수 분포와 고정  $\nu=1.5$ 의 K-분포를 비교한 결과를 나타낸다. 평균 근처 전력 구간에서는 지수 분포의 밀도가 상대적으로 크게 나타나는 반면, 고전력 꼬리 영역에서는 K-분포가 더 큰 확률밀도를 보여 실측 데이터의 heavy-tail 특성을 보다 잘 반영함을 확인하였다.

그림 6은 실측 도플러 전력의 ECDF를 나타낸다. ECDF는 계단형 구조를 보이며, 이는 특정 전력 구간에 샘플이 집중되는 경향이 존재함을 의미한다. 실측 결과에

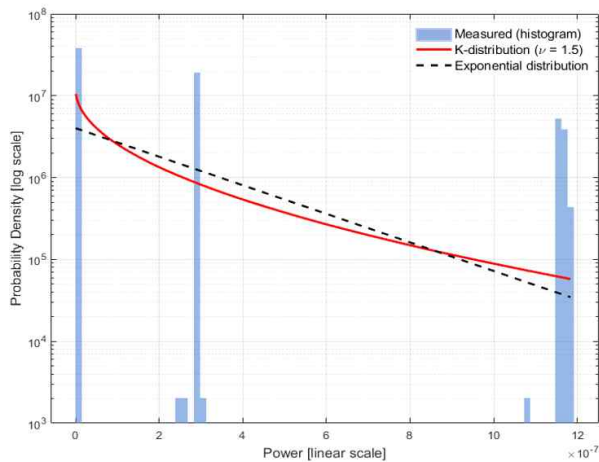


그림 5. 실측 도플러 전력 분포 비교(해상 클러터 전력 32,977개 샘플기반 분석)  
Fig. 5. Comparison of measured Doppler power distributions (analysis based on 32,977 maritime-clutter power samples).

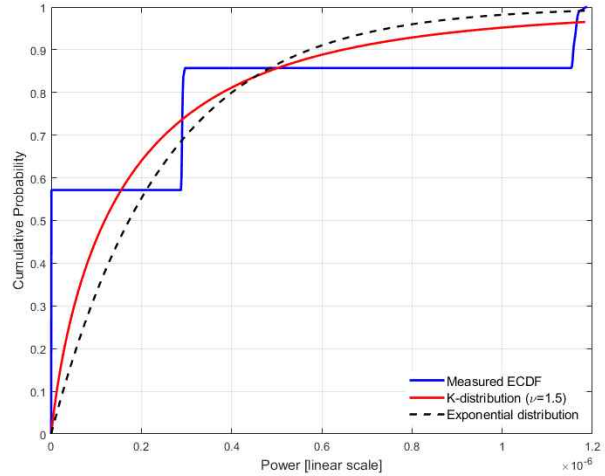


그림 6. 실측 도플러 클러터 전력의 ECDF와 통계모델 기반 CDF(지수 분포 및 K-분포) 비교(해상 클러터 전력 32,977개 샘플기반 분석)  
Fig. 6. Comparison of measured ECDF and model-based CDFs (exponential and K-distribution) (analysis based on 32,977 maritime-clutter power samples).

따르면 전체 샘플의 약 57%는 평균 대비 매우 낮은 전력 영역에 분포하며, 약 29%는 평균 근처, 약 13%는 평균 대비 수 배 이상의 고전력 영역에 위치한다. 이러한 분포 특성은 해상 클러터 전력이 시간에 따라 균일하게 변화하지 않음을 시사한다. 또한 고전력 영역에서 K-분포 기반 CDF는 지수 분포 대비보다 완만하게 수렴하는 경향을 보여, 실측 데이터의 heavy-tail 특성을 보다 효과적으로 반영함을 확인할 수 있다.

이와 같은 분포 특성을 정량적으로 검증하기 위해, 실측 해상 클러터 전력 데이터(N=32,977)에 대해 K-S(Kol-

표 4. 해상 클러터 전력 분포에 대한 적합도 검정 결과  
Table 4. Results of goodness of fit test for maritime clutter power distribution.

Test method	Exponential distribution	K-distribution	Improvement
K-S statistic	0.5711	0.5709	0.04 %
K-S p-value	<0.001	<0.001	
A-D statistic	$1.12 \times 10^5$	$9.99 \times 10^4$	10.8 %
A-D p-value	<0.001	<0.001	

mogorov-Smirnov) 검정 및 A-D(Anderson-Darling) 검정을 수행하였다. 표 4는 지수 분포와 K-분포( $\nu=1.5$ )에 대한 적합도 검정 결과를 요약한 것이다.

검정 결과, 두 분포 모두 귀무가설이 유의수준  $\alpha=0.05$ 에서 기각되었다( $p<0.001$ ). 이는 대용량 샘플에서 통계적 검정력이 매우 높아 미세한 분포 편차에도 귀무가설이 기각되는 현상으로, 실측 클러스터가 단일 이론 분포로 완전히 설명되기 어려움을 의미한다. 그러나 상대적 비교 관점에서 K-분포는 지수 분포 대비 더 나은 적합도를 나타냈다. K-S 검정 통계량은 지수 분포 0.5711에서 K-분포 0.5709로 소폭 감소하였으며, 특히 분포의 꼬리 영역에서 민감한 A-D 검정에서는 지수 분포  $1.12 \times 10^5$ 에서 K-분포  $9.99 \times 10^4$ 으로 약 11 % 감소하여 K-분포가 실측 데이터의 heavy-tail 특성을 보다 효과적으로 반영함을 확인하였다.

따라서 절대적인 적합도 통과 여부보다는 동일 조건 하 두 분포 모델 간의 상대적 적합도를 비교하는 관점에서 검정 결과를 해석하였다.

### 3-2 K-분포 기반 해상 클러스터 모델링

해상 클러스터의 통계적 특성을 표현하기 위한 모델로 K-분포(K-distribution)가 널리 사용된다<sup>[1]</sup>. K-분포는 느리게 변하는 스케일 성분(texture)과 빠르게 변하는 가우시안 성분(speckle)의 결합으로 해석 가능한 compound-Gaussian 계열 모델로, 실측 해상 클러스터에서 관찰되는 강한 전력 변동성과 heavy-tail 특성을 효과적으로 반영할 수 있다<sup>[5][7]</sup>.

도플러 전력  $z \geq 0$ 에 대해 다음의 K-분포 확률밀도함수를 식 (10)과 같이 사용하였다.

$$p(z; \nu, b) = \frac{2b}{\Gamma(\nu)} (\sqrt{bz})^{\nu-1} K_{\nu-1}(2\sqrt{bz}) \quad (10)$$

여기서  $\nu$ 는 형상(shape) 파라미터로 분포의 꼬리 두께(클러스터 변동성)를 결정하며,  $K_{\nu-1}(\cdot)$ 는 2종 수정 베셀 함수이다. 일반적으로  $\nu$ 가 작을수록 heavy-tail 특성이 강해지고,  $\nu$ 가 커질수록 지수 분포에 가까워지는 경향을 보인다<sup>[1]</sup>.

실측 데이터에서  $\nu$ 를 프레임별로 추정하는 접근도 가능하나<sup>[7],[12]</sup>, K-CFAR의 구현 단순화와 결과 재현성 확보를 위해  $\nu$ 를 고정 튜닝 파라미터로 설정하였다. 대신, 해

상환경에서 시간에 따라 변화하는 평균 전력 수준은 CFAR 참조 셀로부터 추정된 국부 평균 전력  $\mu(m)$ 로 반영하여 프레임별 스케일 변화를 적응적으로 보정하였다.

이러한 접근에서 K-분포의 꼬리 특성( $\nu$ )은 해상환경 전반에 대해 고정된 특성으로 간주하되, 시간에 따른 전력 수준 변화는 참조 셀 평균으로 추적하는 방식으로 해석할 수 있다. 그림 5 및 그림 6에서 확인된 바와 같이, 고정  $\nu=1.5$  기반 K-분포는 실측 데이터의 통계적 특성, 특히 고전력 영역의 heavy-tail 특성을 지수 분포 대비 효과적으로 표현할 수 있다.

### 3-3 K-분포 기반 CFAR 처리 구조

CFAR 탐지는 시험 셀(CUT, cell under test)의 전력과 주변 참조 셀로부터 형성한 임계치를 비교하여 표적 여부를 결정하는 방식으로 구성된다. 그림 7은 CFAR 윈도우 구조를 나타낸다. 시험 셀을 중심으로 양측에 가드 셀(guard cell)을 배치하여 표적 에너지가 참조 통계에 포함되는 것을 방지하고, 가드 셀 외곽의 참조 셀을 이용해 클러스터 통계를 추정한다.

도플러 빈 인덱스  $i$ 에서 시험 셀 전력을  $z_i$ 로 정의할 때, 참조 셀 집합은 식 (11)과 같이 구성된다.

$$Z_{ref}(i) = \{z_i - N_{ref} - N_{guard}, \dots, z_i - N_{guard} - 1, z_i + N_{guard} + 1, \dots, z_i + N_{guard} + N_{ref}\} \quad (11)$$

여기서  $N_{guard}$ 는 가드 셀 개수(한쪽),  $N_{ref}$ 는 참조 셀 개수(한쪽)이며, CW 및 FMCW 모두에 대해 동일한 윈도우 파라미터를 적용하였다(표 5).

CA-CFAR는 참조 셀 전력의 산술 평균으로 국부 잡음/클러스터 전력을 추정하고, 목표 오경보율  $P_{FA}$ 를 만족하는 스케일 계수  $\alpha_{CA}$ 를 곱하여 임계치를 형성한다<sup>[3]</sup>(식 (12)).

$$\hat{\mu}(i) = \frac{1}{2N_{ref}} \sum_{z \in Z_{ref}(i)} z, T_{CA}(i) = \alpha_{CA} \hat{\mu}(i) \quad (12)$$

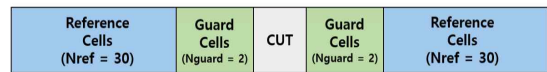


그림 7. CFAR 처리 윈도우 구조  
Fig. 7. CFAR processing window structure.

표 5. CFAR 처리 파라미터

Table 5. CFAR processing parameters.

Parameter	Description
Reference cells	$N_{\text{ref}}=30$ (per side)
Guard cells	$N_{\text{guard}}=2$ (per side)
Window size	65 cells
Target false alarm probability	$4 \times 10^{-4}$
CA-CFAR scaling factor ( $a_{CA}$ )	Numerically calculated
K-CFAR shape parameter ( $\nu$ )	Fixed value
K-CFAR scaling factor ( $a_K$ )	Numerically calculated using inverse CDF
Reference cell mean $\hat{u}(i)$	Local clutter power estimation
Input data	Doppler power spectrum from Section II

지수 분포 가정하에서  $a_{CA}$ 는 목표 오경보율  $P_{FA}$ 와 참조 셀 총 개수  $2N_{\text{ref}}$ 를 고려하여 결정되며<sup>[3]</sup> 표준 CA-CFAR 공식을 사용하였다. 시험 셀 전력  $z_i$ 가 임계치  $T_{CA}(i)$ 를 초과하면 표적으로 판단한다.

K-CFAR는 클러스터 분포의 heavy-tail 특성을 반영하기 위해 K-분포 기반 임계치를 사용한다. 형상 파라미터  $\nu$ 를 고정하고, 평균이 1로 정규화된(mean-normalized) K-분포에서 목표 오경보율을 만족하는 임계 스케일  $a_K$ 를 수치적으로 산출하였다(식 (13)).

$$\alpha_K = F^{-1}(1 - P_{FA}; \nu) \quad (13)$$

여기서  $F(\cdot)$ 는 평균 정규화된 K-분포의 누적분포함수(CDF)이며,  $a_K$ 는 일반적으로 해석적 닫힌형 해가 존재하지 않으므로 수치 해법(근 찾기)을 이용해 계산하였다.

최종 임계치는 CA-CFAR와 동일하게 참조 셀 평균  $\hat{u}(i)$ 로 스케일링하여 식 (14)와 같이 형성된다.

$$T_K(i) = \alpha_K \hat{\mu}(i) \quad (14)$$

즉, 참조 셀 평균  $\hat{u}(i)$ 는 국부 전력 수준(스케일)을 추정하고,  $a_K$ 는 K-분포의 꼬리 특성( $\nu$ )과 목표  $P_{FA}$ 를 반영하는 비선형 계수로 작동한다.  $\nu$ 가 작을수록 heavy-tail이 강해지는 특성을 가지므로 동일  $P_{FA}$ 에서  $a_K$ 가 증가하는 경

향이 있으며, 이는 해상환경에서 오경보 억제에 유리하게 작용할 수 있다<sup>[1]</sup>.

CA-CFAR와 K-CFAR 모두에 대해 동일한 입력 데이터와  $N_{\text{ref}}$ ,  $N_{\text{guard}}$ ,  $P_{FA}$ 를 적용하였다. 따라서 IV장에서 제시되는 성능 차이는 입력/윈도우 조건이 아닌 임계치 형성 방식(지수 분포 기반 vs K-분포 기반)의 차이, 구체적으로는 스케일 계수  $a_{CA}$ 와  $a_K$ 의 차이에서 기인하도록 구성하였다. 표 5는 CFAR 처리 파라미터를 요약한 것이다.

## IV. 탐지성능 분석 및 실측 결과

### 4-1 임계치 형성 및 클러스터 억제 특성

동일한 목표 오경보율  $P_{FA}=4 \times 10^{-4}$  조건에서 CA-CFAR와 K-CFAR의 임계치 형성 특성을 비교한다. 그림 8은 CW 및 FMCW 신호에 대해 실측 도플러 전력 스펙트럼 상에 CA-CFAR와 K-CFAR 임계치를 함께 도시한 결과를 나타낸다.

CA-CFAR는 참조 셀 평균  $\hat{u}(i)$ 에 지수 분포 기반 스케

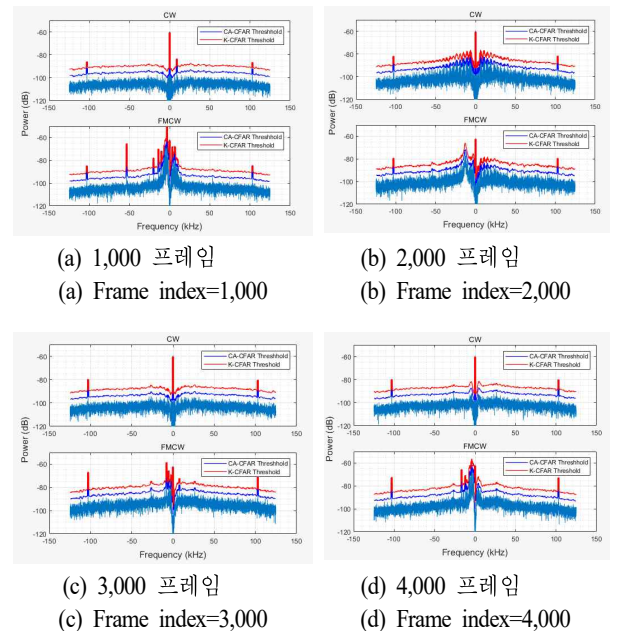


그림 8. 프레임별 CFAR 임계치 형성 비교

Fig. 8. Comparison of CFAR threshold formation across different frames.

일 계수  $a_{CA}$ 를 곱하여 임계치를 형성하며, K-CFAR는 동일한 참조 셀 평균에 K-분포 기반 스케일 계수  $a_K$ 를 적용한다. III장에서 확인한 바와 같이, K-분포는 고전력 영역에서 지수 분포 대비 높은 확률밀도를 가지므로, 동일한  $P_{FA}$ 를 만족하기 위해  $a_K$ 는  $a_{CA}$ 보다 큰 값을 갖는 경향이 있다. 이는 K-CFAR의 임계치가 CA-CFAR 대비 상대적으로 높게 형성됨을 의미한다.

그림 8에서 관찰되는 바와 같이, K-CFAR 임계치(빨간색 선)는 CA-CFAR(파란색 선) 임계치 대비 전반적으로 높은 수준을 유지한다. 특히 참조 셀 평균 전력이 높은 구간, 즉 클러터가 강하게 분포하는 영역에서 이러한 경향이 두드러지게 나타난다. 이는 K-CFAR가 클러터의 heavy-tail 특성을 고려하여 보다 보수적으로 임계치를 설정함을 의미하며, 실제 결과에서 확인된 오경보율 특성과 일관된 경향을 보인다.

두 기법 모두 참조 셀 평균  $\hat{u}(i)$ 를 사용하므로 국부 클러터 전력 수준에 적응적으로 반응한다. 그러나 임계치 계수의 차이로 인해, 동일한 클러터 환경에서도 K-CFAR는 CA-CFAR 대비 더 높은 임계치를 형성하여 오경보 억제에 보다 보수적으로 작동한다.

표적 신호 전력이 클러터 전력 대비 충분히 확보되지 않는 경우, K-CFAR의 보수적인 임계치 형성으로 인해 일부 표적 성분이 억제되어 검출확률이 감소할 수 있다. 그러나 해상환경과 같이 클러터가 비균질하게 분포하는 조건에서는, K-CFAR가 클러터 텍스처 변동성을 반영하여 임계치를 적응적으로 조정함으로써 CA-CFAR 대비 안정적인 오경보율 제어 특성을 나타낸다.

#### 4-2 CW 및 FMCW 탐지성능 비교

해상 실측 도플러 레이다 데이터에 대해 CA-CFAR와 K-CFAR의 탐지성능을 비교하였다. 비교의 목적은 목표 오경보율( $P_{FA}=4 \times 10^{-4}$ ) 달성 여부 자체보다는, 해상 클러터 환경에서 두 CFAR 기법이 보이는 상대적인 오경보 제어 특성과 검출 성능 간의 trade-off를 분석하는 데 있다.

표 6은 CW 및 FMCW 신호에 대해 CA-CFAR와 K-CFAR를 적용했을 때 검출확률( $P_d$ )과 실제 오경보율( $P_{FA}$ )을 요약한 결과이다.

표 6. CW/FMCW 탐지성능 비교

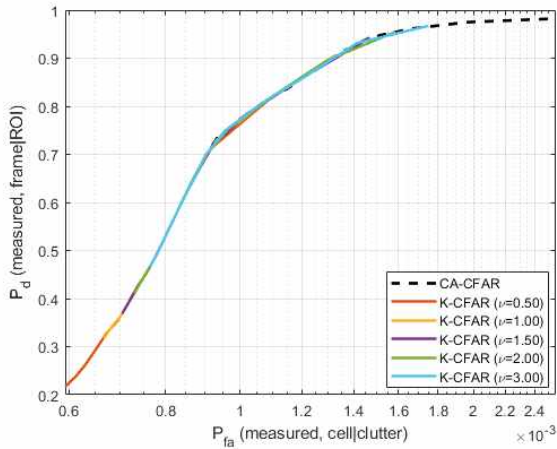
Table 6. Comparison of CW/FMCW detection performance.

Waveform	CFAR method	Detection probability ( $P_d$ )	False alarm rate ( $P_{FA}$ )
CW	CA-CFAR	0.906	$1.323 \times 10^{-3}$
	K-CFAR	0.649	$8.690 \times 10^{-4}$
FMCW	CA-CFAR	0.998	$2.044 \times 10^{-3}$
	K-CFAR	0.980	$1.475 \times 10^{-3}$

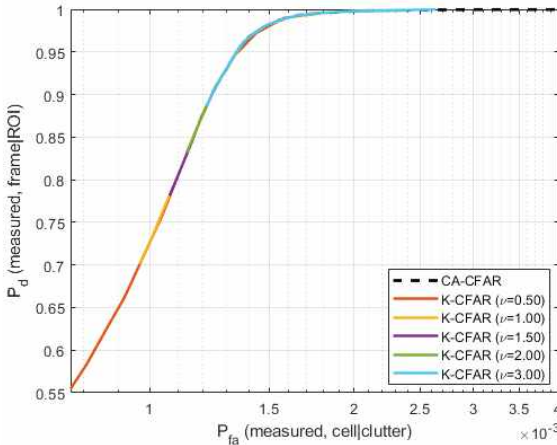
CW 신호의 경우, CA-CFAR는 높은 검출확률( $P_d=0.906$ )을 유지한 반면, 실제 오경보율은  $1.323 \times 10^{-3}$ 으로 목표값의 약 3.3배에 달하였다. 반면 K-CFAR는 실제 오경보율을  $8.690 \times 10^{-4}$  수준으로 상대적으로 낮게 유지한 대신, 검출확률은  $P_d=0.649$ 로 약 28.4 % 감소하였다. 이는 거리 분해능 부재로 모든 거리의 클러터가 단일 도플러 빈에 중첩되어 참조 셀 내 전력 변동성이 FMCW 환경 대비 현저히 증가하기 때문이다. K-CFAR는 고정된 형상 파라미터  $\nu$ 로 임계치를 형성하므로 참조 셀 간 클러터 변동이 큰 CW 환경에서는 보다 보수적인 임계치를 설정하게 되어 검출확률이 감소한다. 반면, CA-CFAR는 산술평균 기반 추정 구조로 인해 참조 셀 전력의 국부 변동이 임계치에 미치는 영향에 상대적으로 작아 보다 안정적인 임계치를 형성한다.

FMCW 신호의 경우, CA-CFAR는 매우 높은 검출확률( $P_d=0.998$ )을 나타냈으나 실제 오경보율은  $2.044 \times 10^{-3}$ 으로 목표값의 약 5.1배에 달하였다. K-CFAR는 검출확률이  $P_d=0.980$ 로 약 1.8 % 감소하는 데 그친 반면, 실제 오경보율은  $1.475 \times 10^{-3}$ 으로 CA-CFAR 대비 약 28 % 감소하였다. 이는 거리-도플러 분리가 가능한 FMCW 환경에서 K-CFAR의 오경보 제어 특성이 보다 효과적으로 나타남을 의미한다.

탐지성능 비교 결과, 두 CFAR 기법 모두 설정된 목표 오경보율( $P_{FA}=4 \times 10^{-4}$ )을 만족하지는 못하였으며, 이는 해상 클러터의 시공간적 비정상성, 제한된 참조 셀( $N_{ref}=30$ )로 인한 통계적 추정 오차, 실측 환경에서의 heavy-tail 특성이 이론모델 가정보다 더 강하게 나타남에 기인한 것으로 해석된다. 하지만, 동일한 실측 데이터, 참조 셀 구조 및 목표  $P_{FA}$  조건하에서 K-CFAR는 CA-CFAR 대비 실



(a) CW 도플러 레이다 신호  
(a) CW Doppler radar signal



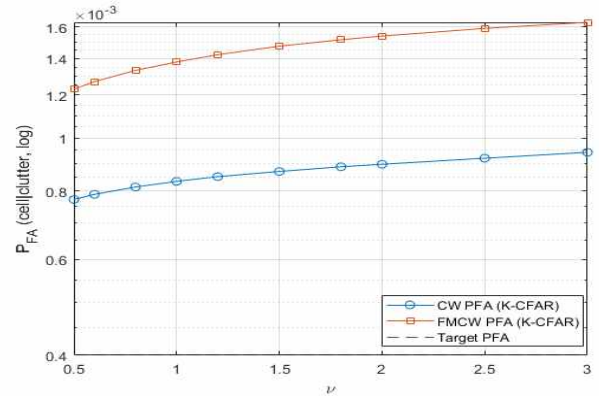
(b) FMCW 도플러 레이다 신호  
(b) FMCW Doppler radar signal

그림 9. CA-CFAR와 K-CFAR의 ROC 곡선 비교  
Fig. 9. ROC curves of CA-CFAR and K-CFAR.

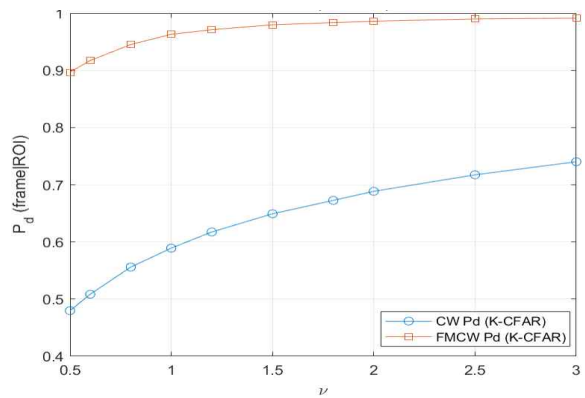
제 오경보율을 약 28~34 % 감소시켜 heavy-tail 해상 클러터 환경에서 상대적 오경보 제어 성능의 유효성을 확인하였다.

K-CFAR 임계치는 CA-CFAR 대비 전반적으로 높은 수준을 유지하며, 이러한 임계치 형성 차이는 표 6에 제시된 검출확률 및 오경보율 결과와 정량적으로 일관된 경향을 보인다.

단일 동작점 비교의 한계를 보완하기 위해 임계치 스케일 계수를 변화시키며 ROC 특성을 추가로 분석하였다.



(a) 오경보율  
(a) Probability of false alarm



(b) 검출확률  
(b) Detection probability

그림 10. K-분포 형상 파라미터  $\nu$  변화에 따른 탐지성능 변화  
Fig. 10. Detection performance versus the shape parameter  $\nu$  of the K-distribution.

그림 9의 ROC 곡선은 표 6에 제시된 단일 동작점 결과가 전체 오경보율 영역에서도 일관되게 유지됨을 보여주며, K-CFAR의 동작점이 CA-CFAR 대비 낮은  $P_{FA}$  영역에 위치함을 확인할 수 있다.

또한 K-분포 형상 파라미터  $\nu$  변화에 따른 탐지성능 민감도를 분석하였다. 그림 10은  $\nu \in [0.5, 3.0]$  범위에서 검출확률과 실제 오경보율의 변화를 나타낸 결과로,  $\nu$  값 증가에 따라 두 지표가 동시에 증가하는 경향을 보였다. 이는  $\nu$  값이 커질수록 K-분포가 지수 분포에 근접하여 임계치 형성이 덜 보수적으로 변하기 때문이다. 특히  $\nu < 1.0$  구간에서는 과도한 검출확률 손실이 관찰되었으며, 반대로

$\nu > 2.0$  영역에서는 오경보 억제 효과가 점진적으로 감소하는 경향이 확인되었다.

본 연구의  $\nu=1.5$ 는 CW 및 FMCW 환경 모두에서 검출 확률과 오경보율 간의 균형적인 절충점에 해당하며, 표 4의 분포 적합도 검정 결과와도 일관된 특성을 보인다.

종합하면, CA-CFAR는 CW 및 FMCW 신호 모두에서 높은 검출확률을 유지하는 반면, 실제 오경보율이 목표값의 3.3~5.1 배 수준으로 크게 증가하는 경향을 보였다. 반면 K-CFAR는 검출확률 감소(CW: 약 28 %, FMCW: 약 2%)를 감수하는 대신, 실제 오경보율을 CA-CFAR 대비 약 28~34 % 감소시키는 특성이 나타났으며, 해상 실측 환경에서는 응용 목적에 따른  $P_d$ - $P_{FA}$  trade-off를 고려한 CFAR 기법 선택이 중요함을 시사한다.

## V. 결 론

본 논문에서는 해상환경에서 실측된 CW 및 FMCW 도플러 레이더 데이터를 기반으로 해상 클러터의 통계적 특성을 분석하고, K-분포 기반 CFAR의 탐지성능을 CA-CFAR와 비교·분석하였다. 실측 도플러 전력 분포 분석 결과, 해상 클러터는 heavy-tail 특성을 보였으며, 이는 지수 분포 대비 실측 데이터를 보다 효과적으로 반영함을 적합도 검정(A~D 통계량 약 11 % 개선)을 통해 확인하였다.

분포 적합도 및 임계치 형성 특성 분석 결과, K-분포 기반 임계치 형성은 해상 클러터 환경에서 CA-CFAR 대비 보다 보수적인 오경보 제어 특성을 나타냈다. 이러한 임계치 형성 차이는 실제 탐지성능에도 직접적인 영향을 미치며, 동일한 조건에서도 두 CFAR 기법 간 상이한 탐지 특성이 형성됨을 실측 데이터를 통해 확인하였다.

탐지성능 비교 결과, K-CFAR는 오경보율을 CA-CFAR 대비 약 28~34 % 감소시키는 반면, 검출확률 감소(CW: 약 28 %, FMCW: 약 2%)가 동반되는 trade-off가 관찰되었다. 특히 거리 분해능이 없는 CW 신호 환경에서는 이러한 특성이 보다 뚜렷하게 나타났으며, 거리-도플러 분리가 가능한 FMCW 환경에서는 분포 기반 CFAR 기법의 효과가 보다 명확하게 관찰되었다.

또한 ROC 분석 및 형상 파라미터( $\nu \in [0.5, 3.0]$ ) 민감도

분석을 통해, K-CFAR의 탐지성능이 파라미터 선택에 따라 유의미하게 변화함을 확인하였다. 이는 해상 실측 환경에서 CFAR 기법 적용 시, 고정된 파라미터 설정이 아닌 운용 환경을 고려한 신중한 파라미터 선택이 필요함을 시사한다.

종합하면, K-CFAR의 성능 우수성을 일반화하기보다는, 해상 실측 도플러 환경에서 K-분포 기반 CFAR 기법의 적용 특성과 한계를 실증적으로 분석하는 데 의의가 있다. 제시된 결과는 해상 레이더 응용에서 CFAR 기법 선택 시 절대적인 성능 지표보다는 오경보 억제와 검출 성능 간의 trade-off를 고려한 성능 해석이 중요함을 시사하며, 실측 데이터 기반 검증의 필요성을 강조한다.

향후 연구에서는 해상환경 변화에 따른 클러터 통계 특성을 반영한 적응형 분포 기반 CFAR 기법과 다양한 해역 및 장시간 실측 데이터를 활용한 일반화 검증을 수행할 예정이다.

## References

- [1] K. Ward, R. Tough, and S. Watts, *Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance*, 2nd ed. London, IET, 2013.
- [2] Y. Zhou, Y. Cui, X. Xu, J. Suo, and X. Liu, "Small-floating target detection in sea clutter via visual feature classifying in the time-Doppler spectra," *arXiv preprint arXiv: 2009.04185*, Sep. 2020.
- [3] S. Watts, "The performance of cell-averaging CFAR systems in sea clutter," in *Record of the IEEE 2000 International Radar Conference*[Cat. No. 00CH37037], Alexandria, VA, Feb. 2000.
- [4] C. Cao, Y. Zhao, "The improved constant false alarm rate detector based on multi-frame integration for fluctuating target detection in heavy-tailed clutter," *IET Signal Processing*, vol. 17, no. 3, p. e12145, Feb. 2023.
- [5] K. J. Sangston, F. Gini, and M. S. Greco, "Coherent radar target detection in heavy-tailed compound-Gaussian clutter," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, no. 1, pp. 64-77, Jan. 2012.
- [6] X. Wang, Y. Li, and N. Zhang, "A robust constant false

- alarm rate detector based on the Bayesian estimator for the non-homogeneous Weibull clutter in HFSWR," *Digital Signal Processing*, vol. 106, p. 102831, Nov. 2020.
- [7] F. Gini, M. V. Greco, "Suboptimum approach to adaptive coherent radar detection in compound-Gaussian clutter," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, no. 3, pp. 1095-1104, Jul. 1999.
- [8] M. M. Al-dabaa, E. Laslo, A. A. Emran, A. Yahya, and A. Aboshosha, "Multiple targets CFAR detection performance based on an intelligent clustering algorithm in K-distribution sea clutter," *Sensors*, vol. 25, no. 8, p. 2613, Apr. 2025.
- [9] S. Erfanian, V. T. Vakili, "Introducing excision switching-CFAR in K distributed sea clutter," *Signal Processing*, vol. 89, no. 6, pp. 1023-1031, Jun. 2009.
- [10] J. S. Fowdur, M. Baum, and F. Heymann, "Real-world marine radar datasets for evaluating target tracking methods," *Sensors*, vol. 21, no. 14, p. 4641, Jul. 2021.
- [11] S. H. Jin, K. M. Lee, S. K. Woo, Y. J. Kim, J. B. Kwon, and H. R. Kim, et al., "Maritime target image generation and detection in a sea clutter environment at high grazing angle," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 5, pp. 407-417, May 2019.
- [12] D. R. Iskander, A. M. Zoubir, "Estimating the parameters of the K-distribution using the ML method," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 32, no. 3, pp. 1141-1147, Jul. 1996.

김 동 섭 [국방과학연구소/연구원]

<https://orcid.org/0009-0004-6707-8192>



2024년 2월: 한양대학교 전기전자컴퓨터 공학과 (공학석사)

2018년 6월~2024년 9월: 대한민국 공군  
2024년 10월~현재: 국방과학연구소 6연구  
원 연구원

[주 관심분야] 레이더 및 신호처리

정 인 화 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1819-9380>



1999년 2월: 창원대학교 제어계측공학과 (공학사)

2001년 2월: 창원대학교 제어계측공학과 (공학석사)

2004년~2005년: 한국전자통신연구원

2006년 7월~현재: 국방과학연구소 6연구  
원 책임연구원

[주 관심분야] 무선통신이론 및 시스템, 통신신호 처리, 레이더 및 신호처리

안 성 진 [국방과학연구소/연구원]

<https://orcid.org/0009-0000-4325-6346>



2023년 2월: 광운대학교 전자융합공학과 (공학사)

2025년 2월: 광운대학교 전자융합공학과 (공학석사)

2025년 4월~현재: 국방과학연구소 6연구  
원 연구원

[주 관심분야] 레이더 및 신호처리, 전자

파 수치해석