

수신 신호의 첨도 값 기반 재밍 검출 기법

이희수*, 오왕록^o

Jamming Detection Algorithm Using the Kurtosis of the Received Signal

Huisoo Lee*, Wangrok Oh^o

요약

첨도 (kurtosis)는 확률분포의 꼬리가 두꺼운 정도를 나타내는 값으로 편차가 클수록 큰 값을 가지며 가우시안 분포의 경우 첨도 값이 3이다. 본 논문에서는 수신 신호의 첨도 값 측정을 통해 재밍 신호 존재 여부를 판별하는 기법을 제안하고 해당 검출 기법의 성능을 분석하였다. 또한 제안하는 기법에서 사용할 재밍 신호에 따른 최적의 임계값을 도출하였다. 제안하는 재밍 검출 기법은 다양한 유형의 재밍 신호 검출이 가능할 뿐만 아니라 수신 신호 전력 밀도 보다 낮은 재밍 신호도 검출 가능한 장점이 있다.

Key Words : communication system, CW jamming, partial band jamming, detection, kurtosis

ABSTRACT

The kurtosis is a good measure on the tail thickness of probability distributions and it has a large value when the deviation of probability distribution is large. On the other hand, it is well-known that the kurtosis of Gaussian distribution is 3. In this paper we propose jamming signal detection schemes based on kurtosis measuring. In addition, we propose optimized threshold for various jamming signals. The proposed scheme can detect various jamming signal under low jamming-to-signal power ratio.

1. 서론

군 통신시스템은 전시 및 평시에 상황을 공유하고 원활한 지휘통제를 수행하는 데 필수적인 무기체계이다. 전시에는 상대국의 통신시스템을 무력화하기 위하여 간섭 신호를 송출하는데 이러한 환경에서도 안정적인 통신 링크를 유지하기 위해 군 통신시스템은 재밍 (Jamming)에 대응할 수 있어야 한다.

재밍에 대응하기 위해 재밍 검출이 선행되어야 하며 재밍 검출에 대한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다. GPS (Global Positioning System)와 같은 대역 확산 수신기에서 재밍 검출¹⁾ 및 시간 영역 노치 필터

링에 대한 연구가 진행되었고 주파수 영역에서 톤 재밍, 부분 부분대역 재밍에 대하여 수신 신호의 전력 스펙트럼 밀도(PSD, Power Spectral Density) 보다 큰 신호를 검출하여 재밍 유무를 판단하는 기법이 널리 사용되고 있으며²⁻⁴⁾ 최근 TSVD (Truncated Singular Value Decomposition)를 활용한 검출 기법⁵⁾이 제안되었다.

본 논문에서는 수신 신호의 첨도 (Kurtosis) 값 측정을 통해 재밍 신호 존재 여부를 판별하는 기법을 제안한다. 첨도는 확률분포의 꼬리가 두꺼운 정도를 나타내는 지표로 확률분포의 편차가 클수록 큰 값을 나타내는 특징이 있다. 제안하는 재밍 검출 기법은 수신

* First Author : Agency For Defense Development, leehuisoo@add.re.kr, 정회원

^o Corresponding Author : Dept. of Information Communications Eng., Chungnam National University, kingrock@cnu.ac.kr, 종신회원
 논문번호 : 202301-007-A-RE, Received January 16, 2023; Revised March 14, 2023; Accepted March 20, 2023

신호의 확률분포 변화에 따른 침도 값 변화를 통해 재밍 유무를 판단하므로 수신 신호의 전력 스펙트럼 밀도 보다 낮은 재밍 신호 검출이 가능할 뿐만 아니라 톤 (continuous wave) 재밍, 부분 대역 (partial band) 재밍 및 전 대역 (full band) 재밍 검출이 가능한 장점이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서 연구 배경 및 본 논문에서 고려하는 시스템 모델을 논하고 III 장에서 가산성 백색 가우시안 잡음 (AWGN, Additive White Gaussian Channel) 채널을 통과한 BPSK (Binary Phase Shift Keying) 변조 신호의 신호 대 잡음비 (SNR, Signal to Noise Ratio)에 따른 침도 값을 확인하고 재밍 신호 유무에 따른 침도 값 변화를 관찰하여 재밍 유무를 판단할 수 있는 기법을 제안한다. 그리고 IV장에서 제안하는 재밍 검출 기법의 검출 성능을 분석하고 V장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

일반적으로 통신시스템의 프리앰블 (preamble) 또는 파일럿 (pilot) 신호의 경우 실제 동작하는 SNR 영역보다 낮은 영역에서도 동기 획득 및 유지가 가능하도록 BPSK 변조 방식이 사용된다. 본 논문에서는 통신시스템에서 프리앰블 또는 파일럿 신호에 주로 사용되는 BPSK 변조 신호가 AWGN 채널을 통과한 후 수신된 신호의 침도 값과 재밍 신호가 존재할 경우 수신 신호의 침도 값을 비교하여 재밍 유무를 판단하는 기법을 제안한다.

본 논문에서 고려한 BPSK 변조 방식의 통신시스템 구조는 그림 1과 같고

여기에서 $x(t)$ 는 BPSK 변조 신호이고 $n(t)$ 는 평균이 '0' 양측 대역 (double sideband) 전력 밀도가 σ^2 인 AWGN 이고 $J(t)$ 는 재밍 신호이다. 수신 신호 $y(t)$ 는 식 (1)과 같다.

$$y(t) = x(t) + J(t) + n(t) \quad (1)$$

기존의 재밍 검출 기법^[2]은 수신 신호 $y(t)$ 를 FFT (Fast Fourier Transform) 수행 후 수신 신호의 주파

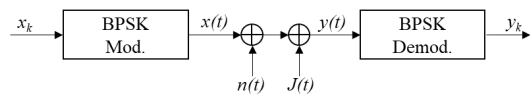


그림 1. 시스템 블록다이어그램
Fig. 1. System block diagram

수 성분을 임계값과 비교하여 재밍 유무를 판단한다. 이러한 재밍 검출 기법은 재밍 신호가 수신 신호의 수신 전력과 같거나 낮은 전력의 재밍 신호 검출이 제한적이다.

III. 제안하는 기법

침도 (Kurtosis)는 식 (2)와 같이 정의되며

$$R = \frac{m_4}{(m_2)^2} \quad (2)$$

여기에서 m_n 은 랜덤 변수 (random variable)의 n 차 모멘트 (n -th moment)이다. 침도는 랜덤 변수의 분포를 나타내는 척도로 가우시안 (Gaussian) 분포를 갖는 신호의 침도는 '3'이다^[6].

BPSK 변조 신호가 AWGN 채널을 통과한 후 수신된 신호로부터 도출된 결정변수 (decision variable)를 y_k 라 하면 해당 랜덤 변수의 확률밀도함수 (PDF, Probability Density Function), $f(v)$ 는 아래 식 (3)과 같다.

$$f(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(v \pm \eta)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

여기에서 η 는 비트당 수신 에너지이다. 랜덤 변수, y_k 의 특성함수 (characteristic function)는 식 (4)와 같고

$$\Phi(s) = \exp\left\{\pm \eta s + \frac{1}{2} \sigma^2 s^2\right\} \quad (4)$$

이를 활용하여 도출한 랜덤 변수, y_k 의 2차 4차 모멘트는 식 (5), (6)과 같다.

$$\Phi''(s=0) = m_2 = \eta^2 + \sigma^2 \quad (5)$$

$$\Phi''''(s=0) = m_4 = \eta^4 + 6\sigma^2\eta^2 + 3\sigma^4 \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 통해 BPSK 변조 신호가 AWGN 채널을 통과하였을 경우 y_k 의 침도를 구할 수 있으며 그 결과는 식 (7)과 같다.

$$R = \frac{m_4}{(m_2)^2} \quad (7)$$

$$= \frac{\eta^4 + 6\sigma^2\eta^2 + 3\sigma^4}{(\eta^2 + \sigma^2)^2}$$

여기에서 SNR을 $\gamma = \eta^2/\sigma^2$ 라 정의하면 침도, R 은 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$R = \frac{\gamma^2 + 6\gamma + 3}{\gamma^2 + 2\gamma + 1} \quad (8)$$

식 (8)에서 확인할 수 있는 바와 같이 SNR이 감소함에 따라 침도, R 은 ‘3’으로 수렴하고 SNR이 커질수록 침도, R 은 ‘1’로 수렴한다.

재밍 신호는 신호의 특성에 따라 크게 톤 재밍, 부분 대역 재밍 및 전 대역 재밍으로 분류할 수 있고 톤 재밍 신호, $J(t)$ 는 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$J(t) = A \cos(2\pi f_i t + \theta) \quad (9)$$

여기에서 A 는 톤 재밍 신호의 크기, f_i 는 톤 재밍 신호의 중심주파수 그리고 θ 는 톤 재밍 신호의 위상이다. 톤 재밍 신호, $J(t)$ 의 크기 확률밀도함수, $f_J(j)$ 는 식 (10)과 같고 위상 확률밀도함수, $f_\theta(\theta)$ 는 식 (11)과 같다.

$$f_J(j) = \frac{1}{\pi \sqrt{A^2 - j^2}}, \quad -A < j < A \quad (10)$$

$$f_\theta(\theta) = 1/2\pi, \quad -\pi < \theta < \pi \quad (11)$$

확률밀도함수 $f_J(j)$ 와 $f_\theta(\theta)$ 의 랜덤 변수 J 와 θ 는 독립으로 톤 재밍 신호, $J(t)$ 의 확률밀도함수는 식 (12)와 같다.

$$f_{J,\theta}(j, \theta) = f_J(j) f_\theta(\theta) \quad (12)$$

톤 재밍 신호가 AWGN 채널을 통과한 후 수신된 신호로부터 도출된 결정변수를 C 라 정의하면 해당 랜덤 변수의 확률밀도함수, $f_C(c)$ 는 식 (13)과 같고 여기에서 $He_{2k}(x)$ 는 식 (14)와 같다.

$$f_C(c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{c^2}{2\sigma^2}} \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(k!)^2} \left(\frac{A}{2\sigma} \right)^{2k} He_{2k} \left(\frac{c}{\sigma} \right) \right) \quad (13)$$

$$He_{2k}(x) = \sum_{m=0}^k \frac{(-1)^m}{2^m} \frac{(2k)!}{m!(2k-2m)!} x^{2k-2m} \quad (14)$$

식 (12)의 확률밀도함수, $f_C(c)$ 의 2차, 4차 모멘트는 식 (15), (16)과 같으며^{6,7)}

$$m_2^j = \sigma^2 + A^2/2 \quad (15)$$

$$m_4^j = 3(\sigma^4 + A^2\sigma^2 + A^4/8) \quad (16)$$

이를 통해 톤 재밍 신호가 AWGN 채널을 통과한 후 수신된 신호에 대한 결정변수, C 의 침도를 구할 수 있으며 그 결과는 식 (17)과 같다.

$$R_j = \frac{m_4^j}{(m_2^j)^2} = \frac{3(\sigma^4 + A^2\sigma^2 + A^4/8)}{(\sigma^2 + A^2/2)^2} \quad (17)$$

여기에서 재밍 대 잡음비 (JNR, Jamming-Noise Ratio), $\gamma' = A^2/\sigma^2$ 라 정의하면 침도, R_j 는 식 (18)과 같이 표현할 수 있다.

$$R_j = \frac{3(1 + \gamma' + \gamma'^2/8)}{1 + \gamma' + \gamma'^2/4} \quad (18)$$

식 (18)에서 확인할 수 있는 바와 같이 JNR이 감소함에 따라 침도, R_j 은 ‘3’으로 수렴하고 JNR이 커질수록 침도, R_j 은 ‘1.5’로 수렴한다.

식 (8)과 식 (18)을 통해 AWGN 채널을 통과한 신호의 확률분포 차이로 SNR과 JNR이 커질수록 침도 값이 다른 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. BPSK 변조 신호와 재밍 신호가 AWGN 채널을 통해 동시에 수신된 경우에 대응되는 결정변수의 침도 값 분포는 전산 실험을 통해 확인하였다.

재밍 신호의 유형이 식 (9)와 같은 톤 재밍 환경에서의 수신 신호, $y(t)$ 의 재밍 대 신호비 (JSR, Jamming to Signal Ratio) 및 SNR에 따른 침도 값 분포는 그림 2와 같다. 그림 2에서 확인할 수 있는 바와 같이 재밍 신호가 없는 경우 침도 값은 SNR이 감소함에 따라 ‘3’으로 수렴하고 SNR이 커질수록 ‘1’로 수렴함을 확인할 수 있다. 반면 톤 재밍 신호가 있는

경우 고려한 모든 JSR에서 SNR이 커짐에 따라 ‘1.7’로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이는 식 (18)에서는 도출한 첨도, R_j 는 수신 신호에 톤 재밍 신호와 AWGN 만 존재하는 상황에서 JNR이 커짐에 따라 ‘1.5’로 수렴하지만 그림 2의 결과는 톤 재밍 신호와 AWGN 뿐만 아니라 BPSK 변조신호 까지 함께 수신한 신호의 첨도이기 때문이다. 이러한 첨도의 분포를 통해 통신시스템이 동작하는 SNR이 5 dB 이상일 경우 수신 신호의 첨도 값을 활용하여 톤 재밍 신호 검출이 가능함을 확인할 수 있다.

부분 대역 재밍과 전 대역 재밍은 식 (19)와 같이 송신 신호의 대역폭, BW_s 과 재밍 신호의 대역폭, BW_j 의 비로 구분할 수 있으며

$$\rho = \frac{BW_j}{BW_s} \tag{19}$$

전대역 재밍은 $\rho = 1$ 이며 부분 대역 재밍은 $\rho < 1$ 인 경우로 정의할 수 있다.

재밍 신호가 부분 대역 재밍과 전 대역 환경에서의 수신 신호, $y(t)$ 의 각 ρ 에 따른 첨도 값 분포는 그림 3과 같다. 그림 3에서 확인할 수 있는 바와 같이 부분 대역 재밍 및 전대역 재밍 환경에서의 첨도 값 분포는 그림 2의 톤 재밍 환경에서의 첨도 값 분포와 유사하며 SNR이 커질수록 고려한 모든 JSR에서 첨도 값이 ‘1.7’ 이상의 값으로 수렴한다.

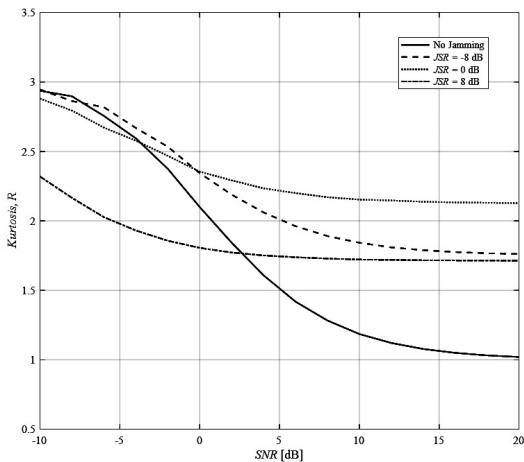


그림 2. 신호 대 잡음비에 따른 첨도 분포
Fig. 2. Kurtosis distribution versus SNR

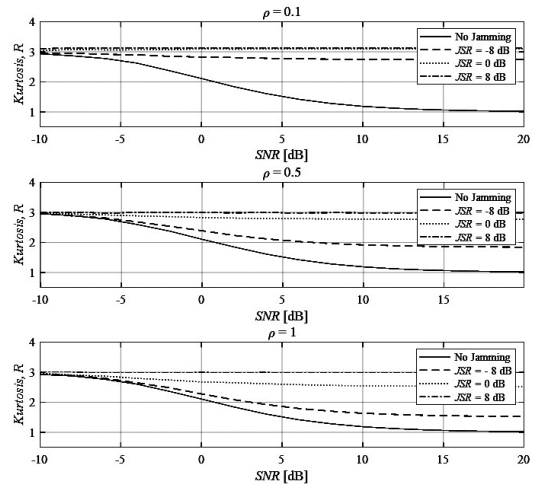


그림 3. ρ 에 따른 첨도 분포
Fig. 3. Kurtosis distribution versus ρ

IV. 제안하는 기법의 검출 성능

재밍 환경에서 수신 신호의 첨도 값 분포 특성을 이용하여 일정 수준 이상의 SNR 에서 결정 변수의 첨도 값을 검출 임계값 (threshold value), T 과 비교하여 재밍 여부를 판단하는 기법을 제안한다. 제안하는 재밍 검출 기법의 검출 성능을 확인하기 위한 전산 실험 파라미터는 표 1과 같고 첨도 값을 계산하기 위해 ‘1024’ 개의 수신 심볼, y_k 를 활용하였다. 그리고 제안하는 재밍 검출 기법과 성능 비교를 위해 1024-FFT를 통해 주파수 영역에서 재밍 신호 검출 기법의 성능을 확인하였다.

제안하는 재밍 검출 기법의 톤 재밍 환경에서의 임계값에 따른 오경보 확률 (false alarm probability) 및 검출 실패 확률 (missing probability)은 그림 4와 같다.

그림 4에서 확인할 수 있는 바와 같이 SNR 5 dB에서의 오경보 확률과 JSR 8 dB에서의 검출 실패 확률 모두 10^{-3} 이하로 낮출 수 있는 임계값은 ‘1.6’임을

표 1. 전산 실험 파라미터
Table 1. Parameter of the simulation

$x(t)$ 변조 방식	BPSK
심볼 율	1 Msps
재밍 유형	톤/부분 대역/전 대역 재밍
톤 재밍 중심주파수	0.1 MHz
ρ	0.1, 0.5, 1
SNR	5, 7, 9 dB
JSR	-8, 0, 8 dB

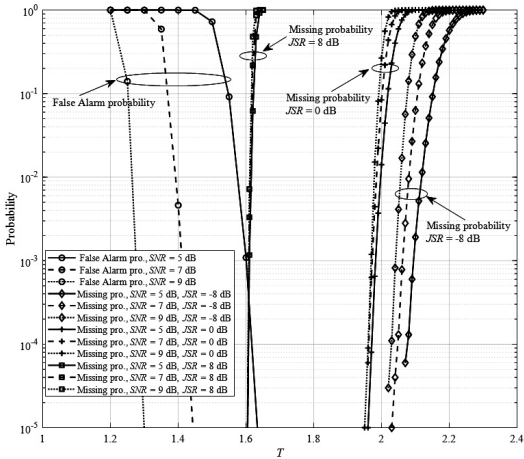


그림 4. 톤 제밍 환경에서 제안하는 제밍 검출기법의 오경보 및 검출 실패 확률
 Fig. 4. False alarm and missing probability of the proposed jamming detection scheme under the tone jamming

확인 할 수 있다. 이를 통해 제안하는 제밍 검출기법의 임계값을 '1.6'으로 도출하였다. 또한 기존에 제안된 톤 제밍 검출 기법으로는 검출하기 힘든 낮은 JSR에서의 검출 성능이 우수함을 확인할 수 있다.

부분 대역 제밍 환경에서 제안하는 제밍 검출기법의 임계값, T 에 따른 오경보 및 검출 실패 확률은 그림 5, 6과 같다. 그림 5와 6에서 확인할 수 있듯이 ρ 가 '0.1', '0.5' 부분 대역 제밍 환경에서 제안하는 제밍 검출 기법의 임계값, T 를 '1.7'으로 설정하면 5 dB 이상의 SNR 그리고 JSR -8 dB 이상에서 오경보

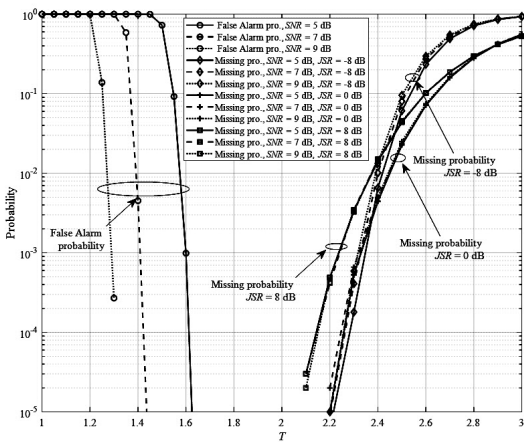


그림 5. 부분 대역 제밍 ($\rho = 0.1$) 환경에서 제안하는 제밍 검출기법의 오경보 및 검출 실패 확률
 Fig. 5. False alarm and missing probability of the proposed jamming detection scheme under the partial band jamming ($\rho = 0.1$)

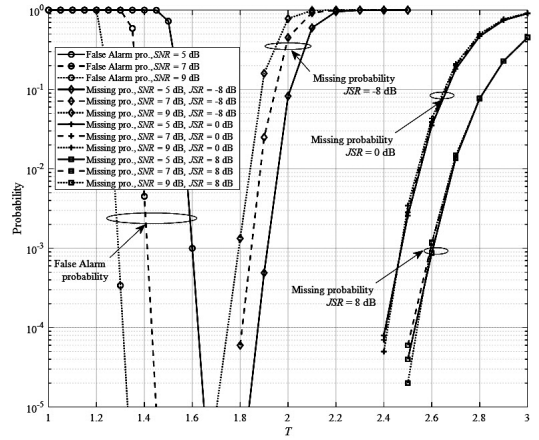


그림 6. 부분 대역 제밍 ($\rho = 0.5$) 환경에서 제안하는 제밍 검출기법의 오경보 및 검출 실패 확률
 Fig. 6. False alarm and missing probability of the proposed jamming detection scheme under the partial band jamming ($\rho = 0.5$)

및 검출 실패 확률 모두 10^{-3} 이하로 낮출 수 있다.

FFT 기반 제밍 검출 기법의 $\rho = 0.5$ 인 부분 대역 제밍 환경에서 임계값에 따른 오경보 확률 및 검출 실패 확률은 그림 7과 같다. 그림 7에서 확인할 수 있는 바와 같이 FFT 기반의 제밍 검출 기법은 JSR 8 dB 이상에서 임계값, T 를 '1.5 ~ 3'으로 설정하면 오경보 확률 및 검출 실패 확률을 10^{-5} 이하로 낮출 수 있으나 JSR -8 dB 이하에서 임계값, T 를 '1'으로 설정하여도 오경보 확률 및 검출 실패 확률이 10^{-1} 이상임을 확인할 수 있다. 그림 6, 7에서 확인할 수 있는 바와 같

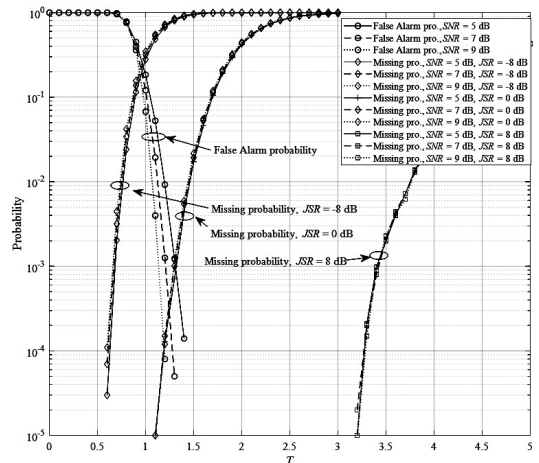


그림 7. 부분 대역 제밍 ($\rho = 0.5$) 환경에서 FFT 기반 제밍 검출기법의 오경보 및 검출 실패 확률
 Fig. 7. False alarm and missing probability of the FFT based jamming detection scheme under the partial band jamming ($\rho = 0.5$)

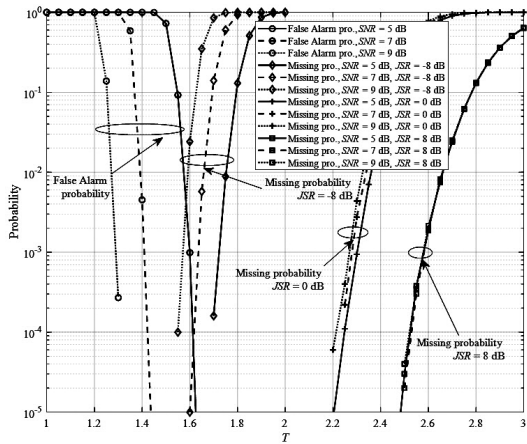


그림 8. 전 대역 재밍 ($\rho = 1$) 환경에서 제안하는 검출기법의 오경보 및 검출 실패 확률
 Fig. 8. False alarm and missing probability of the proposed jamming detection scheme under the full band jamming ($\rho = 1$)

이 제안하는 재밍 검출 기법과 FFT 기반 재밍 검출 기법의 오경보 확률 및 검출 실패 확률을 통해 검출 성능이 우수함을 확인할 수 있다.

전 대역 재밍 환경에서의 제안하는 재밍 검출 기법의 임계값, T 에 따른 오경보 확률 및 검출 실패 확률은 그림 8과 같고 제안하는 재밍 검출의 임계값을 '1.6'으로 설정하면 제안하는 재밍 검출 기법의 오경보 및 검출 실패 확률을 10^{-3} 이하로 낮출 수 있다. 또한 제안하는 재밍 검출 기법은 JSR이 낮아 재밍 신호의 전력 스펙트럼 밀도가 송신 신호의 전력 스펙트럼 밀도 보다 낮을 때에도 검출이 가능한 장점이 있다.

그림 3에서 톤 재밍 환경에서 임계값을 '1.6'으로 설정하여 오경보 확률과 검출 실패 확률로 모두 10^{-3} 이하로 낮출 수 있음을 확인하였고, 그림 5, 6, 7을 통해 부분 대역 재밍 및 전 대역 재밍 환경에서 제안하는 재밍 검출 기법의 임계값을 톤 재밍 환경에서 도출한 '1.6'으로 설정하면 오경보 확률 및 검출 실패 확률 모두 10^{-3} 이하임을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 수신 신호의 첨도 측정을 통해 재밍 신호 존재 여부를 판별하는 기법을 제안하였고 해당 검출 기법의 성능을 분석하였다. 또한 제안하는 재밍 검출기법의 임계값으로 $T = 1.6$ 을 사용할 경우 다양한 재밍 재밍 환경에서 오경보 및 검출 실패 확률을 10^{-3} 이하로 낮출 수 있음을 확인하였다. 제안하는 재

밍 검출 기법은 톤 재밍, 부분 대역 재밍 및 전 대역 재밍 검출이 가능하고 기존의 재밍 검출 기법에서는 검출이 용이하지 않았던 낮은 JSR 영역에서 우수한 검출 성능을 제공한다.

References

- [1] M. Spuhler, D. Giustiniano, V. Lenders, M. Wilhelm, and J. B. Schmitt, "Detection of reactive jamming in DSSS-based wireless communications," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 13, no. 3, pp. 1593-1603, Mar. 2014. (<https://doi.org/10.1109/TWC.2013.013014.131037>)
- [2] J. H. Yeom, Y. H. Jo, K. S. Ko, and C. H. Song, "Frequency-domain notch filtering based on theoretical approach to jamming detection in SATCOM systems," *J. KICS*, vol. 45, no. 08, pp. 1329-1337, 2020. (<https://doi.org/10.7840/kics.2020.45.8.1329>)
- [3] Y. Chien, "Design of GPS anti-jamming systems using adaptive notch filter" *IEEE Syst. J.*, vol. 9, no. 2, pp. 451-460, Jun. 2015. (<https://doi.org/10.1109/JSYST.2013.2283753>)
- [4] W. J. Ma, W. L. Mao, and F. R. Chang, "Design of adaptive all pass based notch filter for narrow band anti-jamming GPS system," *Int. Symp. Intell. Sign. Process. and Commun. Syst.*, pp. 305-308, Hong Kong, China, Dec. 2005. (<https://doi.org/10.1109/ISPACS.2005.1595407>)
- [5] X. Yang, A. Li, M. Wei, X. Zang, S. Lu, and W. Wang, "Jamming signal detection based on TSVD method," *IEEE Int. Conf. Advances in Electr. Eng. and Comput. Appl.*, pp. 558-562, Aug. 2020. (<https://doi.org/10.1109/AEECA49918.2020.9213528>)
- [6] R. D. D. Roo, S. Misra, and C. S. Ruf, "Sensitivity of the kurtosis statistic as a detector of pulsed sinusoidal RFI," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 45, pp. 1938-1946, Jul. 2007. (<https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.888101>)

- [7] S. Misra, C. Ruf, and R. Kroodsma, "Detectability of radio frequency interference due to spread spectrum communications signals using the kurtosis algorithm," *IEEE IGARSS 2008*, pp. 335-338, Jul. 2008. (<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4778996>)

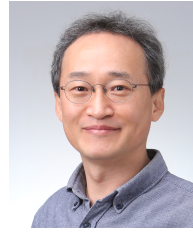
이 희 수 (Huisoo Lee)



2008년 2월 : 충남대학교 학사
2010년 2월 : 충남대학교 석사
2010년 3월 : 국방과학연구소 연
구원
2017년 9월~현재 : 충남대학교
전자전과정보통신공학과 박
사과정

<관심분야> 위성통신시스템, 항재밍 알고리즘
[ORCID:0000-0003-4452-1097]

오 왕 록 (Wangrok Oh)



1994년 2월 : 포항공과대학교 학사
1997년 2월 : 포항공과대학교 석사
2003년 8월 : 포항공과대학교 박사
1997년~2000년 : 포항공과대학
교 정보통신연구소 전임연구원
2003년~2006년 : 포항공과대학
교 정보통신연구소 전임연구원

2006년~2010년 : 충남대학교 정보통신공학과 조교수
2010년~2015년 : 충남대학교 정보통신공학과 부교수
2015년~현재 : 충남대학교 정보통신공학과 교수
<관심분야> 통신시스템 설계 및 구현, 오류정정부호,
MIMO 시스템

[ORCID:0000-0001-8205-5432]