

위성 통신에서 이론적 재밍 검출 기반 주파수 영역 노치 필터링 기법

염재흥[°], 조영훈^{*}, 고경수^{**}, 송충호^{**}

Frequency-Domain Notch Filtering Based on Theoretical Approach to Jamming Detection in SATCOM Systems

Jae-Heung Yeom[°], Young-Hun Jo^{*}, Kyungsu Ko^{**}, Choong-Ho Song^{**}

요 약

위성 통신은 우주 상공의 중계기를 통하여 공중, 해양 및 재난이나 전시 환경에서도 끊임없는 서비스를 제공할 수 있다. 이와 같이 통신의 신뢰성을 확보할 수 있으므로 군통신에서 네트워크 중심전(NCW)의 핵심적인 역할을 담당하고 있다. 그러나 위성 통신은 개방된 무선 환경으로 인하여 재밍에 쉽게 노출되어 통신 두절을 겪을 수 있으므로 위협이 되는 재밍을 검출하여 제거하는 기술이 필요하다. 기존 연구는 주파수 분할 다중화(FDM) 방식이나 위성항법시스템(GPS) 대역 확산에서 집중적으로 이루어졌다. 본 논문은 위성 통신에서 주로 사용되는 단일 반송파 전송 방식에서 적용 가능한 재밍 검출 및 노치 필터링 기법을 제안한다. 본 논문은 오검출률에 따른 재밍 검출 임계값을 이론적 수식으로 유도하고 심볼간 간섭과 관련된 노치 필터의 임펄스 응답 특성을 고려한 주파수 영역 설계를 제안한다. 성능 분석은 유도된 검출 임계값 수식이 시뮬레이션 결과와 거의 일치하고 제안된 임계값 기반 노치 필터 설계가 협대역 재밍 공격에 효과적임을 보인다.

키워드 : 재밍, 노치 필터, 위성 통신, 검출, 임계값, 주파수 변환, 심볼간 간섭

Key Words : Jamming, Notch filter, SATCOM, Detection, Threshold, FFT, ISI

ABSTRACT

Satellite communication (SATCOM) system provides seamless global service including the sky, the ocean, disaster zone and war zone through the satellite repeater in space. Thus the SATCOM is a promising solution to enhance the communication reliability. It plays an important role in the network centric warfare (NCW) in military communications. However, the SATCOM channels are vulnerable to a jamming threat. Most conventional research works have focused on jamming nulling in the frequency division multiplexing (FDM) and GPS spread spectrum. This paper proposes a new scheme for detection and filtering of narrow-band jamming in a single carrier system (e.g. DVB-S2). The theoretical analysis is presented as a closed-form formulation according to a false detection probability. A frequency-domain design of notch filter is also proposed by analyzing the effect of inter-symbol interference on signal-to-interference-and-noise ratio. Simulation results show that the analytical results are accurate and the proposed notch filter design is effective for narrow-band jamming attacks.

[°] First and Corresponding Author : Asia Pacific Satellite Inc. Satellite Technology Lab. jhyeom@apsi.co.kr, 실장, 정회원

^{*} Asia Pacific Satellite Inc. Satellite Technology Lab. ataebest@apsi.co.kr, 수석연구원

^{**} LIG Nex1 Co., Ltd. C4I R&D, kyungsu.ko@lignex1.com, 수석연구원; choonghosong@lignex1.com, 수석연구원, 정회원

논문번호 : 202006-133-A-RU, Received June 17, 2020; Revised June 28, 2020; Accepted June 30, 2020

I. 서 론

위성 통신은 우주 상공의 중계기를 통하여 빔 커버리지 범위 어디서나 전파 송수신이 가능하여 지형, 재난 및 전시 환경에 거의 영향을 받지 않는다¹⁾. 지상이 동통신은 항공기와 선박에서 사용될 수 없고 단기간에 커버리지 확보에 어려우므로 5G에서도 통신 신뢰성을 높이기 위해서 위성의 역할을 필요로 한다²⁾. 국내에서 육해공군의 위성통신체계(ANASIS)가 미래 전장에 필수적인 네트워크 중심전(NCW, network centric warfare)의 핵심적인 역할을 담당하고 있다³⁾.

이와 같이 위성 통신은 다양한 분야에서 사용되고 있으나 위성 통신의 특성상 개방된 무선 구간을 사용하므로 악의적인 재밍이 신호 대역에 중첩되어서 간섭을 유발함으로써 통신 두절을 일으키기 쉽다. 재밍의 영향을 억제하기 위한 대표적 기술은 대역확산기술과 필터링 기술이다⁴⁾. 대역확산기술은 신호 대역폭 대비 수신 배의 대역폭을 부가적으로 필요로 하고 재밍대신호비(jamming-to-signal power ratio, JSR)가 상당히 클 때에는 직접 확산(direct sequence spreading)에서도 필터링이 효과적이다^{4,5)}.

기존에 Global Positioning System (GPS) 대역 확산 수신기에서 재밍 검출⁵⁾ 및 시간 영역 노치 필터링 연구가 많이 이루어졌다^{6,7)}. 반도체 공정 기술로 푸리에 변환을 빠르게 할 수 있게 되므로 주파수 영역에서 톤이나 협대역 재밍을 검출하고 제거하는 연구들이 이루어졌다^{8,9)}.

주파수 영역 재밍 제거 기술은 주파수 도약이나 주파수 분할 다중화(FDM) 방식의 군위성 통신에서 주로 이용되었다^{10,11)}. 다상필터뱅크(polyphase filter bank) 기반 기술은 신호 대역이 FDM으로 주파수 분할되어서 전송되는 신호에 적용 가능하며 톤이나 협대역 재밍을 검출하여 해당 FDM 주파수 영역을 제거하는 기능을 수행한다¹¹⁾. 그러나 DVB-S2와 같은 단일 반송파(single carrier) 위성 신호에는 적용하기가 어렵다¹⁰⁻¹¹⁾.

단일 반송파 신호는 주파수 구간별로 분할되지 않으므로 재밍을 제거하는 노치 필터의 주파수 응답은 성능에 큰 영향을 미친다. 기존 연구는 재밍 제거 후에 잔여 재밍 간섭 영향만을 제한적으로 고려하고 노치 필터의 주파수 응답 특성을 반영하지 못하였다¹²⁾. 또한 재밍 신호를 정확하게 검출하기 위한 검출 임계값에 대한 연구가 거의 이루어지지 않았다. 임계값을 특정 값으로 가정하거나¹¹⁾ 재밍을 포함한 수신 신호 세기(RSS, received signal strength)를 측정된 후에

임의의 분산 정도⁸⁾나 비트오류율(BER)이나 패킷전송률(PDR)과 연계하여¹³⁾ 재밍 존재 여부를 판정하였다.

본 논문은 톤이나 부분대역 재밍(PBJ, partial band jamming) 검출에서 정렬된 수신 전력의 카이 제곱 랜덤 분포로부터 유도된 오검출률에 따른 임계값을 이용한다. 또한 본 논문은 노치 필터의 임펄스 응답에서 주엽과 부엽 특성을 고려한 필터 설계를 제시한다. 주파수 영역 노치 필터링은 재밍 수신 신호를 제거한 후에 시간 영역으로 변환될 때 원형 컨볼루션(circular convolution)에¹⁴⁾ 의한 심볼간 간섭(ISI, inter-symbol interference)을 유발하기 때문이다.

본 논문은 II장에서 고려하는 시스템 모델을 설명하고 III장에서 수학적으로 재밍 검출 임계값을 유도하고 IV장에서는 노치 필터링에 의한 성능 영향을 살펴보고 V장에서 성능 시험 결과를 보이고 VI장에서 결론을 내린다.

II. 시스템 모델

그림 1은 위성통신 중계기를 통하여 단일 반송파로 통신하는 시스템에서 위성 단말이 상향링크로 송신하는 신호의 대역 내에 재밍 신호가 중첩된 후에 위성 중계기의 주파수 변환을 거쳐서 하향링크로 전송되는 과정을 보인다. 본 논문은 위성 단말의 항재밍 수신기를 고려한다. 그림 2는 재밍 신호를 검출하여 제거하기 위한 항재밍 수신기의 내부 구조를 보인다. 수신 신호 $x(t)$ 는 송신 신호 $s(t)$, 재밍 신호 $j(t)$ 와 잡음 $w(t)$ 이 합쳐져서 Analog Digital Converter(ADC)에서 u 배로 오버샘플링(oversampling)된다.

$$x(n) = s(n) + j(n) + w(n) \quad (1)$$

여기서 $s(n)$ 는 성형필터(shaping filter)의 롤오프(roll-off) α 를 갖고 $w(n)$ 은 복소 백색 가우시안 잡음

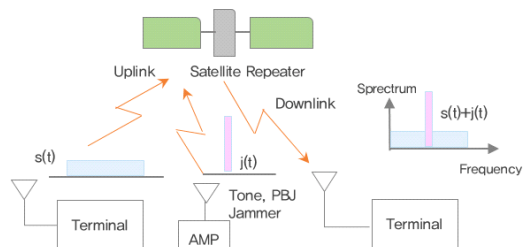


그림 1. 위성 중계기에서 재밍 간섭 시나리오
Fig. 1. Jamming threat scenario in satellite repeater.

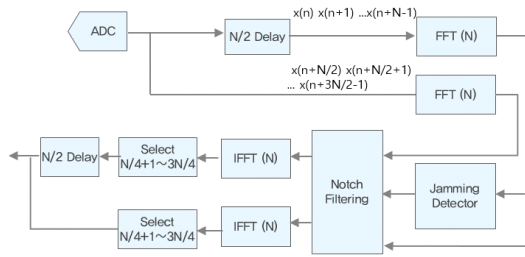


그림 2. 노치 필터 기반 항재밍 수신기
Fig. 2. Notch filter based receiver.

(AWGN)을 나타낸다. 신호대 간섭·잡음비(SINR, signal-to-interference-plus-noise ratio) ζ 은 재밍대 신호비(JSR, jamming-to-signal ratio) ξ 와 신호대 잡음비(SNR, signal-to-noise ratio) γ 로 표현될 수 있다.

$$\zeta = \frac{P_s}{P_j + P_n} = \frac{1}{\xi + \gamma^{-1}} \quad (2)$$

JSR이 10dB 이상이면 SINR이 -10dB이하를 갖게 되므로 수신기는 정상적으로 통신할 수 없게 된다. 따라서 수신 신호의 일부 대역 손실을 보더라도 재밍 신호를 제거하여 통신 가능한 SINR을 확보해야 한다.

본 논문은 톤 재밍이나 부분대역 재밍을 가정한다. 고속 푸리에 변환(FFT)하여 주파수 영역에서 신호 대역에 포함된 재밍 신호를 노치 필터링한 후에 역 고속 푸리에 변환(IFFT)하여 신호를 복원한다. 주파수 영역에서 수신 신호와 노치 필터링의 IFFT 연산은 수신 신호와 노치 필터링의 시간 영역에서 원형 컨볼루션이 된다¹⁴. 처음 부분과 마지막 부분은 불연속점 구간으로 재밍이 남게 되어서 본 논문에서는 상위의 FFT 입력을 $N/2$ 지연 시키고 상하위의 IFFT 출력의 $N/4+1 \sim 3N/4$ 구간을 선택하여 희망 신호를 복원한다.

III. 재밍 검출 기법

재밍 검출은 수신 신호의 푸리에 변환을 이용하여 수행된다.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (3)$$

여기서 $W_N = e^{-j(2\pi/N)}$ 이고 푸리에 변환으로 N 개의 부반송파(subcarrier)가 생성된다. 송신 신호의 성형 필터는 일반적으로 제곱근 올림 코사인(SRRC, square

root raised cosine) 필터를 사용하므로¹⁵ 일정한 전력을 갖는 신호 구간은 N 개의 부반송파 중에서 물오프를 제외한 부반송파 개수로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$m = \left\lfloor \frac{(1-\alpha)N}{2u} \right\rfloor \quad (4)$$

여기서 $\lfloor a \rfloor$ 은 a 보다 작거나 같은 최대 정수를 의미한다. 예를 들어 $\alpha=0.25$ 이고, $N=1024$, $u=4$ 이면 $m=96$ 이 된다. 개별 부반송파에 대한 수신 전력을 다음과 같이 구한다.

$$Y_{m+k+1} = \|X_k\|^2, \quad -m \leq k \leq m \quad (5)$$

식 (5)에서 범위에 포함되는 부반송파 개수 $2m+1$ 을 M 으로 정의한다. M 개의 부반송파의 개별 수신 전력 분산을 줄이기 위해서 FFT를 L 번 이동 평균(MA, moving average)하여 구한다.

$$R_k(n) = \frac{1}{L} \sum_{i=n-L+1}^n Y_k(i), \quad 1 \leq k \leq M \quad (6)$$

우선 재밍을 검출하기 위해서 재밍 존재 여부를 판단하기 위한 신호 구간의 기준(reference) 전력을 구해야 한다. 기존 연구는 신호 세기에 재밍을 포함하여 측정하였으나 본 논문에서는 PBJ 없는 구간의 신호전력을 계산하기 위해서 수신 전력의 정렬(sorting)을 이용한다. 그림 3은 내리차순 정렬을 통하여 재밍을 제외한 신호 구간의 전력을 구할 수 있음을 보인다. “ M 번째 큰 값 선택”(Selecting the M th Largest) 알고리즘은 전체 원소를 정렬하는 방식보다 연산량이 적고 정렬 개수에 선형적으로 증가한다¹⁶. 연산량을 더욱 감소하기 위해서 M 개의 신호 대역 부반송파를 등간격으로 나눠서 평균하여 G 개 그룹의 전력 U_g 을 다음과 같이 구한다.

$$U_g = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T R_{t+T(g-1)}(n), \quad 1 \leq g \leq G \quad (7)$$

여기서 $T = \lfloor M/G \rfloor$ 이다. M 개에서 T 배 감소된 G 개의 그룹 전력 집합에 대해서 알고리즘을 수행한다.

$$\hat{U} = M \text{select}_q(W), \quad W = \{U_1, U_2, \dots, U_G\} \quad (8)$$

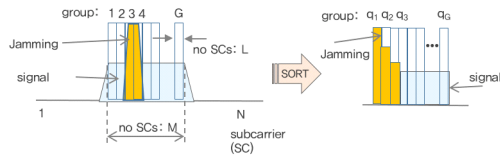


그림 3. 내림차순 정렬에 기반 기준 전력 산출
Fig. 3. Sorting-based reference power calculation.

여기서 $Mselect_q(A)$ 는 집합 A 에서 q 번째 가장 작은 값을 찾는 정렬함수이다¹⁶⁾. q 번째 그룹신호의 평균 전력 \hat{U} 을 PBJ 영향이 없는 기준 전력으로 사용한다. V장 성능 분석은 식 (8)을 통하여 톤 재밍이나 PBJ에서 정확하게 기준 전력을 얻을 수 있음을 보인다.

두 번째로 기준 전력에 일정한 임계값 오프셋을 반영하여 재밍 검출 임계값을 구해야 한다. 재밍 임계값은 낮을수록 오검출률이 높아져서 신호 구간에서 노치 필터링을 수행함으로써 성능 열화를 발생시킬 수 있다. 따라서 재밍 임계값은 재밍 오검출률의 함수로 생성하여야 한다. 검출 임계값을 고려할 때는 재밍을 제외한 신호 성분과 잡음 성분을 고려하고 두 신호는 복소 가우시안 랜덤 변수 (Gaussian random variable)이다. 식 (6)의 R_k 은 $2 \cdot L$ 차 자유도를 갖는 카이 제곱 확률분포(chi-square random PDF)를 갖고 해당하는 상보누적분포함수 (CCDF, complementary cumulative density function)는 다음과 같이 표현될 수 있다¹⁵⁾.

$$\tilde{F}_Y(y|L) = e^{-y/2\sigma_X^2} \sum_{k=0}^{L-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{y}{2\sigma_X^2} \right)^k \quad (9)$$

여기서 $2\sigma_X^2$ 은 수신 신호 X 의 복소 가우시안 분포의 분산을 의미한다. 가우시안 분포인 경우에 분산은 전력과 동일하므로 $\|X\|^2$ 의 평균 전력에 해당한다. 즉 식 (9)로부터 오검출률은 단순히 신호 전력을 누적하는 횟수 L 에만 의존하는 함수임을 알 수 있다. 누적 횟수 L 에 따른 식 (9)의 CCDF로부터 목표 오검출률 확률 P_F 에 해당하는 임계값 오프셋 Δ 을 구할 수 있다.

$$\Delta = \underset{y}{\text{Find}}(\tilde{F}_Y(y|L) = P_F) \quad (10)$$

여기서 $\underset{y}{\text{Find}}(\cdot)$ 는 조건을 만족하는 y 를 찾는 함수이다.

마지막으로 재밍 검출을 위한 임계값은 식 (8)과

(10)에서 각각 얻어진 기준 전력 \hat{U} 와 오프셋 Δ 을 이용하여 구할 수 있다.

$$Th = \hat{U} \cdot \Delta \quad (11)$$

재밍 신호를 검출할 때는 롤오프 구간을 포함하여 다음과 같이 수행한다.

$$A = \{k|X_k > Th\}, \quad -m^+ \leq k \leq m^+ \quad (12)$$

여기서 $m^+ = \lfloor \frac{(1+\alpha)N}{2u} \rfloor$ 이다.

IV. 재밍 필터링 기법

본 장에서는 III장에서 검출된 재밍을 제거하기 위한 노치 필터의 주파수 응답 설계를 고려한다. 그림 4에서 노치 필터 $H(f)$ 가 주파수 영역에서는 전력 통과 필터와 대역 통과 필터로 구성되고 시간 영역 필터 $h(t)$ 는 임펄스 $\delta(t)$ 와 싱크 함수 (sinc function)로 구성되는 것을 볼 수 있다. 그림 5는 노치 필터의 주파수 응답 계수를 다음과 같이 정의하는 것을 보인다.

$$\begin{aligned} H_n &= \eta_0 & S \leq n \leq E \\ H_{S-n} &= \eta_n & 0 \leq n \leq W \\ H_{E+n} &= \eta_n & 0 \leq n \leq W \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 H_n 은 n 번째 부반송파의 필터 이득을 의미하고 S , E 와 W 는 각각 재밍 검출의 시작점, 검출 마지막 점, 검출 부반송파 구간에 추가되는 양옆의 필터링 구간을 의미한다. 주파수 영역에서 노치 필터링은 다음과 같이 주파수 영역 곱셈 연산으로 수행된다¹⁴⁾.

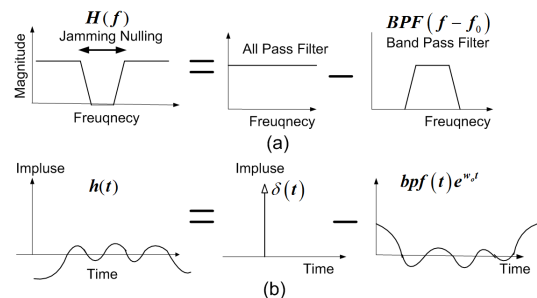


그림 4. 노치 필터의 응답 (a) 주파수 (b) 시간
Fig. 4. Notch filter response (a) Frequency (b) Time.

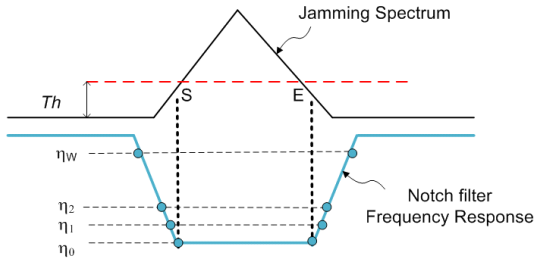


그림 5. 재밍 검출에 따른 주파수 영역 노치 필터 계수
Fig. 5. Frequency-domain filter coefficients.

$$Z_k = X_k \cdot H_k, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (14)$$

식 (14)의 역 푸리에 변환은 다음과 같이 수신 신호와 노치 필터간의 원형 컨볼루션이 된다.

$$z_n = x_n \otimes h_n, \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (15)$$

여기서 \otimes 는 원형 컨볼루션 연산을 의미한다.

노치 필터링 이후에 복조를 위해서 요구되는 SINR은 주어진 SNR γ 에서 잔여 재밍 간섭 D_J , 노치 필터 임펄스 응답에 의한 심볼간 간섭 D_{ISI} , 필터링에 의한 대역 손실 D_{Null} 의 영향을 받게 된다. 본 논문은 SNR γ 에서 노치 필터링에 의한 3개의 성능 손실 항목을 고려한 SINR을 $\zeta_\phi(D_J, D_{ISI}, D_{Null}|\gamma)$ 으로 정의한다. 성능 손실을 최소화하여 가장 높은 SINR을 갖는 노치 필터 계수 집합을 결정한다.

$$\bar{\phi} = \arg \max_{\phi_i \subset \Phi} \zeta_\phi(D_J, D_{ISI}, D_{Null}|\gamma), \quad 1 \leq i \leq Q \quad (16)$$

여기서 $\phi_i = \{\eta_0, \dots, \eta_{W}\}$, $\Phi = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_Q\}$ 을 각각 의미하고 Q 는 고려하는 필터 계수 집합의 개수를 의미한다.

기존 연구는 주파수 영역에서 임계값을 초과하는 신호를 제거하는 방식으로 신호 대역 널링 D_{Null} ^[8,12] 및 잔여 재밍 D_J ^[12]에 의한 영향만을 고려하였다. 본 논문은 D_{Null} 와 D_J 영향을 최소화하기 위해서 III장에서 유도된 오검출률에 따른 임계값 이론치를 이용하고 또한 D_{ISI} 영향과 직접 관련된 필터의 임펄스 응답을 고려한 주파수 영역 필터 설계를 제안한다. 본 논문은 4개의 집합을 고려하여 ϕ_1 는 D_{Null} 만을, ϕ_2 는 $[D_{Null}, D_J]$ 을, ϕ_3 는 $[D_J, D_{Null}, D_{ISI}]$ 모두를, ϕ_4 는 $[D_J, D_{Null}, D_{ISI}]$ 을 고려하여 설계된 4개의 집합을 제시하고 식 (16)에 따라서 3가지 영향을 모두 반영한 필터 설계

표 1. 주파수 영역 노치 필터 계수의 집합 (단위 dB)
Table 1. Candidate sets with frequency-domain notch filter coefficients (unit: Decibel).

	η_0	η_1	η_2	η_3	η_4	η_5	η_6	η_7	η_8
ϕ_1	-48	0	0	0	0	0	0	0	0
ϕ_2	-48	-48	-48	-48	-48	0	0	0	0
ϕ_3	-48	-24	-12	-6	-2	0	0	0	0
ϕ_4	-48	-32	-28	-24	-16	-12	-8	-4	-2

ϕ_3 가 가장 우수 성능을 가짐을 보인다. 세부적으로 설명하면 ϕ_1 은 임계값보다 큰 부반송파만 제거하는 사각형(rectangular) 노치 필터로 일부 재밍 간섭이 남는다. ϕ_2 은 검출된 부반송파와 양옆에 각각 4개의 부반송파를 추가적으로 제거하는 사각형 노치 필터이다. ϕ_3 은 검출된 부반송파를 제거하고 양옆에 각각 4개의 부반송파를 일정한 기울기를 가지고 제거하고 ϕ_4 는 양옆 각각 8개의 부반송파를 일정한 기울기를 가지고 제거한다.

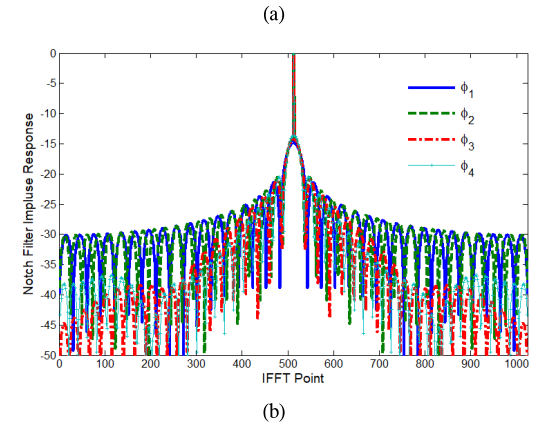
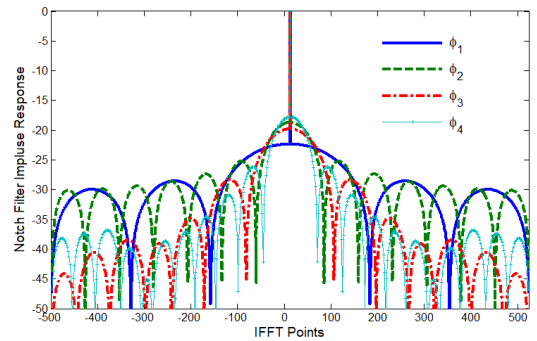


그림 6. 노치 필터의 후보 집합에 따른 시간 영역 임펄스 응답 (a) Tone (b) PBJ
Fig. 6. Time-domain impulse response according to candidate sets (a) Tone (b) PBJ.

그림 6 (a)는 신호 대역폭의 3%가 검출되는 톤 재밍 경우에 노치필터 계수의 4개 후보 집합에 대한 시간 영역에서 임펄스 응답 (impulse response)을 보인다. ϕ_1 은 제거 구간이 좁으므로 주엽과 부엽이 넓고 천천히 떨어지는 것을 볼 수 있고 ϕ_2 은 양옆에 부가적으로 제거 구간을 확장하므로 주엽과 부엽의 폭이 좁아졌으나 부엽이 천천히 작아지는 것을 볼 수 있다. ϕ_3 은 ϕ_2 과 동일한 제거 구간을 갖지만 주파수 영역에서 원만하게 떨어지므로 시간 영역에서 부엽이 빠르게 떨어지는 것을 볼 수 있다. 그림 6 (b)은 신호 대역폭의 17%가 검출되는 PBJ 경우에 4개의 노치 필터의 후보 집합에 대한 시간 영역에서 임펄스 응답을 보인다. 모든 후보 집합의 주엽과 부엽의 폭은 큰 차이가 없으나 ϕ_3 와 ϕ_4 가 부엽이 빠르게 작아지는 것을 볼 수 있다. 본 장에서 고려한 노치 필터의 주파수 응답 특성에 따른 수신 성능을 V장에서 살펴본다.

V. 성능 분석

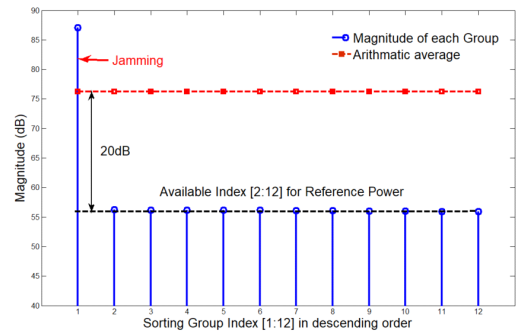
본 장에서는 III장에서 유도한 재밍 검출 임계값과 IV장에서 고려한 노치 필터의 주파수 응답에 따른 성능을 분석한다. 성능 분석을 위한 시뮬레이션 파라미터는 표 2와 같다. 기존 연구는 재밍 검출을 위한 기준 전력을 재밍을 포함하여 측정함으로써 정확한 임계값을 구하기 어려웠다^{8,12}. 그림 7은 제안 방식에 따라서 식 (8)에 기반하여 톨오프 구간을 제외한 신호 대역을 12개의 그룹으로 나눠서 재밍이 없는 그룹을 선택하여 기준 전력을 구한다. 그림 7에서 보는 바와 같이 기존 방식은 재밍을 포함한 산술적 평균으로 JSR 20dB 만큼 크게 측정되므로 기준 전력을 과도하게 설정함으로써 잔여 재밍에 의한 성능 저하나 미검출이 발생할 수 있다¹². 그림 7 (a)는 톤 재밍에서 첫

번째 정렬 그룹을 제외한 11개의 그룹이 기준 전력으로 사용 가능하고 식 (8)에서 q 는 2부터 12까지 가능함을 알 수 있다. 그림 7 (b)는 PBJ에서 처음 3개의 그룹을 제외한 9개의 그룹이 기준 전력으로 가능하고 식 (8)에서 q 는 4부터 12까지 가능하다. 그림 7의 성능 결과를 통하여 재밍 제외한 신호 구간 전력이 일정하므로 협대역의 PBJ에서 내림차순의 후순위 그룹을 기준 전력으로 사용 가능함을 알 수 있다.

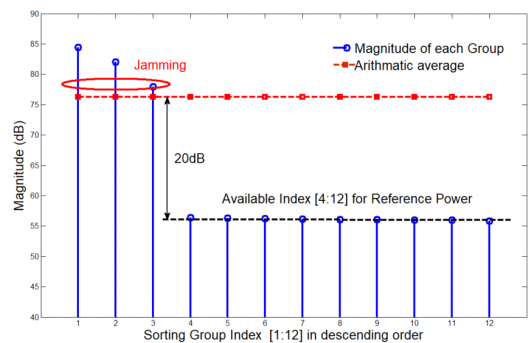
그림 8은 검출 임계값을 위한 식 (9)와 (10)에서 유도한 오프셋의 수학적 이론이 시뮬레이션 결과와 일치하는 지 확인한다. 그림 8 (a)는 신호와 잡음만 존재하는 경우에 오검출률을 확인하기 위한 L 번 평균한 키 제공 랜덤 변수인 오프셋에 따른 CCDF를 보인다. L 이 클수록 CCDF 확률에 대한 임계값 오프셋이 작아지는 것을 볼 수 있다. 그림 8 (b)는 오검출률에 대한 임계값 오프셋에 대해서 식 (9)의 이론치와 시뮬레이션 결과를 비교하여 0.2dB 오차로 일치하는 것을 볼 수 있다. 미세한 오차는 주파수 부엽특성을 개선하기 위해서 사용된 윈도우(windowing)의 평탄도 오차

표 2. 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation parameters.

Item	Value
Modulation	Single Carrier
Bandwidth	2MHz
Jamming	Tone, PBJ 200kHz
FFT point	1024
Roll-off	0.25
Over-sampling	4
JSR	20dB
Windowing	Hanning



(a)



(b)

그림 7. 신호 대역에서 정렬된 그룹별 신호 세기 (a) 톤 재밍 (b) 부분대역 재밍
Fig. 7. Signal strength per sorted group in descending order (a) Tone (b) PBJ.

로 보인다^[7]. 그림 8 성능 결과를 통하여 $L=2$ 인 경우에 오검출률을 0.01% 이하로 낮추기 위해서 임계값 오프셋 8dB 이상이 요구되고 $L=8$ 인 경우에는 임계값 오프셋 5dB이면 충분한 것을 알 수 있다. 수학적 이론식을 통하여 평균 횡수 L 에 따른 재밍 검출 임계값을 정확하게 설정할 수 있음을 알 수 있다.

주파수 노치 필터의 계수에 따른 성능을 분석한다. 표 2의 시뮬레이션 환경에서 평균 횡수 $L=4$ 이고 임계값 오프셋 $\Delta=7$ dB을 적용한다. 표 1의 4개의 노치 필터 계수 집합에 대해서 성능 영향성을 파악한다. 톤 재밍에서는 192개 부반송파에서 3%인 6개가 재밍 검출되고 PBJ에서는 17%인 34개가 검출된다. 그림 9는 SNR에 따른 주파수 영역 노치 필터 계수의 집합에서 측정된 SINR을 보인다. 그림 9 (a) 톤 재밍에서 노치 필터의 임펄스 응답의 주엽 및 부엽이 좁고 빨리 감쇄하는 ϕ_3 과 ϕ_4 이 우수한 성능을 보인다. ϕ_2 은 잔여 재밍을 제거하지만 부엽이 빨리 감쇄하지 않으므로 성능 저하를 보인다. 그림 9 (b) PBJ에서는 17% 신호 대역폭이 손실되어서 톤 재밍보다 전체적으로 성능 저하가 발생하고 주엽과 부엽의 폭이 대부분 유사한

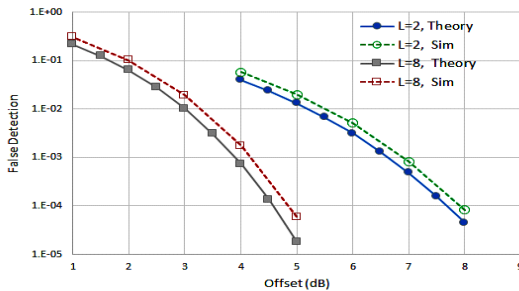
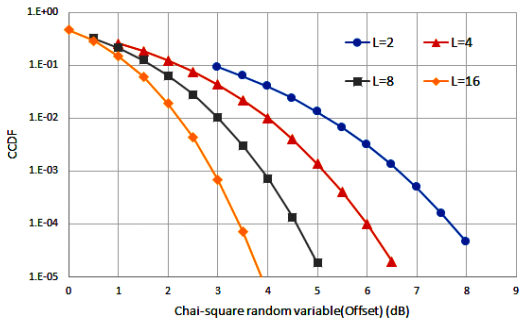


그림 8. 임계값 오프셋에 따른 재밍 검출 성능 (a) 이론 성능 (b) 이론 성능과 시뮬레이션 비교
Fig. 8. Jamming detection performance (a) Theoretical Curves (b) Comparison between analytical results and simulation.

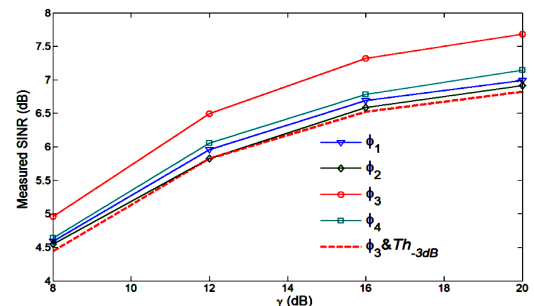
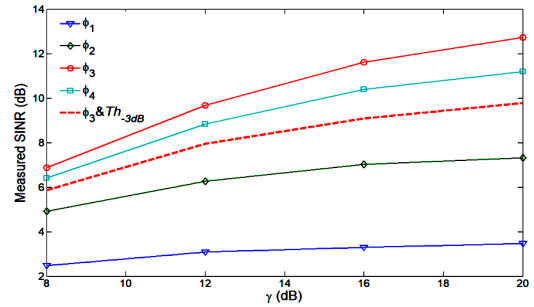


그림 9. 재밍 공격에서 노치 필터의 계수에 따른 측정 SINR 성능 (a) 톤 재밍 (b) 부분 대역 재밍
Fig. 9. Measured SINR performance according to notch filter coefficients under jamming attack (a) Tone (b) PBJ.

것을 볼 수 있다. ϕ_1 와 ϕ_2 는 싱크 함수로 부엽이 천천히 감소하므로 성능이 저하되고 유사한 성능을 보인다. 즉 검출 임계값에 의해서 남은 잔여 재밍보다는 주엽과 부엽의 폭과 감소 속도가 성능에 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 또한 ϕ_3 은 넓은 주파수 필터 범위를 갖는 ϕ_4 보다 우수한 성능을 보이며 부엽 특성이 확보되면 신호 대역 손실을 최소화할 때 성능 저하를 낮출 수 있음을 알 수 있다. 또한 ϕ_3 & Th_{-3dB} 는 검출 임계값이 3dB 작게 설정된 경우로 기준 전력 추정에서 3dB 오류가 발생하거나 식 (10)에서 얻어진 임계값 오프셋보다 3dB 낮게 설정될 때 ϕ_3 과 비교하여 성능 저하가 발생하는 것을 볼 수 있다.

이와 같이 톤 재밍과 PBJ 성능을 통하여 식 (16)의 조건을 만족하는 ϕ_3 가 가장 우수한 성능을 가짐을 알 수 있다. 본 논문은 2MHz 대역폭에 한정하여 성능 분석을 수행하였으나 재밍 대역폭이 증가하는 경우에는 필터링에 의한 대역 손실이 커지므로 신호 대역폭 증가를 함께 고려해야 한다.

VI. 결 론

위성통신에서 단일 반송파 전송 방식의 신호대역에 협대역 재밍 신호가 중첩되어 수신되는 경우에 재밍 신호를 검출하여 노치 필터링하는 기법을 제안하였다. 재밍 검출 임계값에 사용되는 기준 전력과 검출 임계값 오프셋을 구하는 방식을 제시하였다. 기준 전력은 신호 대역을 그룹 단위로 분할하고 내림치순 정렬하여 후순위에 있는 그룹의 전력을 사용할 때 정확하게 추정할 수 있음을 보였다. 검출 임계값 오프셋은 카이 제곱 랜덤 변수의 분포를 통하여 오검출률에 따른 이론적 수학적 식으로 유도되었고 시뮬레이션 결과와 거의 일치됨을 보였다. 노치 필터의 주파수 응답에 따른 성능 분석을 통하여 필터 임펄스 응답 특성을 고려하여 설계된 노치 필터가 협대역 재밍에서 효과적임을 보였다.

References

- [1] D. Minoli, *Innovations in Satellite Communications and Satellite Technology*, WILEY, 2015.
- [2] B. Evans, O. Onireti, T. Spathopoulos, and M. A. Imran, "The role of satellites in 5G," *EUSIPCO*, pp. 2756-2760, Aug. 2015.
- [3] B. Parikh and D. Fritz, "Network centric operations over transponded SATCOM," *IEEE MILCOM*, vol. 1, pp. 517-520, Oct. 2004.
- [4] D. Lee, B. Ko, and S. Kim, "Anti-Jamming Communications," *KICS Info. & Commun. Mag.*, vol. 24, no. 10, pp. 24-33, Oct. 2007.
- [5] 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.
- [6] Y. Chien, "Design of GPS anti-Jamming systems using adaptive notch filters," *IEEE Syst. J.*, vol. 9, no. 2, pp. 451-460, Jun. 2015.
- [7] W.-J. Ma, W.-L. Mao, and F.-R. Chang, "Design of adaptive all-pass based notch filter for narrowband anti-jamming GPS system," *Int. Symp. Intell. Sign. Process. and Commun. Syst.*, pp. 305-308, Hong Kong, China, Dec. 2005.
- [8] P. T. Capozza, B. J. Holland, T. M. Hopkinson, and R. L. Landrau, "A single-chip narrow-band frequency-domain excisor for a Global Positioning System (GPS) receiver," *IEEE J. Solid-State Cir.*, vol. 35, no. 3, pp. 401-411, Mar. 2000.
- [9] L. B. Milstein, "Interference rejection techniques in spread spectrum communications," in *Proc. IEEE*, vol. 76, no. 6, pp. 657-671, Jun. 1988.
- [10] J. Oh, S. Im, and H. Ko, "A nulling anti-jamming scheme for the polyphase filter bank-based satellite repeat system," *J. IEK*, vol. 19-TC, no. 7, pp. 39-47, 2012.
- [11] W. Moon, S. Park, J. Lee, and S. Im, "Performance evaluation on a polyphase filter bank structure based anti-jamming system," *IEEE DSP/SPE*, pp. 262-26701, Napa, CA, Aug. 2013.
- [12] S. Park and J. Cha, "Anti-jamming algorithm based on fft notch filter to enhance the survivability of a satellite communication," *J. IEIE*, vol. 55, no. 5, pp. 3-10, May 2018.
- [13] K. Grover, A. Lim, and Q. Yang, "Jamming and anti-jamming techniques in wireless networks: A survey," *Int. J. Ad Hoc and Ubiquitous Comput.*, vol. 17, no. 4, pp. 197-215, 2014.
- [14] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice Hall, 1989.
- [15] J. G. Proakis, *Digital Communication*, 4th Ed., McGraw Hill, 2001.
- [16] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C*, 2nd Ed., Cambridge University Press, 2002.
- [17] M. Cerna and A. F. Harvey, *The Fundamentals of FFT-Based Signal Analysis and Measurement*(2000), Retrieved Jun. 15, 2020, from http://www.sjsu.edu/people/burford.furman/docs/me120/FFT_tutorial_NI.pdf.

염 재 흥 (Jae-Heung Yeom)



1995년 2월 : 한양대학교 졸업
1997년 2월 : 한양대학교 석사
2009년 2월 : 서울대학교 박사
1997년~2002년 : 삼성전자
2002년~2003년 : LG유플러스
2008년~현재 : AP위성(주)

<관심분야> 위성통신, 다중 안테나 신호 처리, 셀룰라 이동통신, 무인기 데이터링크

[ORCID:0000-0003-3137-7268]

고 경 수 (Kyungsu Ko)



2006년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사
2006년~2010년 : 한국과학기술원 MMPC(Mobile Media Platform Center) 연구원
2010년~현재 : LIG넥스원 수석 연구원

<관심분야> 무인기 데이터링크, 전술 데이터링크, 위성통신 시스템, 이동통신 시스템

[ORCID:0000-0002-1226-1297]

조 영 훈 (Young-Hoon Cho)



2004년 2월 : 한동대학교 전자공학과 졸업
2006년 2월 : 한동대학교 정보통신 공학과 석사
2006년 3월~2008년 9월 : 시너지 이노베이션(주)
2008년 3월~현재 : AP 위성(주)

<관심분야> 전자공학, 신호처리, 위치추적

[ORCID:0000-0001-9581-598X]

송 충 호 (Choong-Ho Song)



1996년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 졸업
1998년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 석사
2002년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 박사
2002년 3월~현재 : LIG넥스원 수석연구원

<관심분야> 무인기 데이터링크, 전술 데이터링크, 위성통신 시스템, 위성추적 안테나 및 알고리즘

[ORCID:0000-0002-9628-4268]