

OFDM 재밍 환경에서 결합 최대 우도 검파 기반 항재밍 기법의 성능 분석

이 유 진*, 이 영 석*, 전 영 일**,
서 정 현**, 이 호 원***, 정 방 철°

Performance Analysis of Joint Maximum Likelihood Detection-Based Anti-Jamming Technique in OFDM Jamming Environments

Yu-Jin Lee*, Young-Seok Lee*,
Youngil Jeon**, Junghyun Seo**,
Howon Lee***, Bang Chul Jung°

요 약

본 논문에서는 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 통신 시스템에서 대역 내 임의의 주파수를 통해 인가된 재밍 신호가 전체 대역에 미칠 수 있는 신호 영향을 분석하고, 모든 부반송파에 대한 공인 송신기와 수신기 링크에서 OFDM 재밍 신호의 영향을 효과적으로 완화할 수 있는 결합 최대 우도(joint maximum likelihood: JML) 검파 기반 항재밍 기법을 제안한다. 또한, 본 논문에서는 제안하는 JML 검파 기반 항재밍 기법의 성능을 이론적으로 분석하고 모의실험을 통해 제안하는 기법의 항재밍 성능 향상과 이론적 분석 결과의 정확성을 검증한다.

Key Words : Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), Anti-jamming technique, Joint maximum likelihood detector

ABSTRACT

In this paper, we first analyze how a jamming signal applied through arbitrary frequencies within the band can affect the entire band in orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) communication systems. Then, we propose an anti-jamming technique based on joint maximum likelihood (JML) detection that can effectively mitigate the effects of OFDM jamming signals in legitimate transmitter and receiver links for all sub-carriers. In addition, in this paper, we theoretically analyze the performance of the proposed JML detector-based anti-jamming technique. Through extensive simulations, we verify the improvement of the anti-jamming performance for the proposed technique and the accuracy of our analysis results.

I. 서 론

직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 기반 UAV(unmanned aerial vehicle) 통신 시스템은 높은 주파수 효율성과 다중 경로 페이딩에 강인한 특성으로 인해, 무선 제어 신호뿐만 아니라 영상 데이터 등의 신호를 전달할 수 있어 다양한 작전 환경에서 활용될 수 있으나^[1], OFDM 기반 통신 시스템은 공인 송수신 링크 간 운용 주파수 대역이 알려질 때 재밍 공격에 취약하다는 문제점이 있다^[2].

특히, OFDM 기반 통신 시스템 대역 내 임의의 주파수를 사용하여 재밍 신호를 전송하는 재밍 공격은 전체 주파수 대역에 재밍 신호의 영향을 미칠 수 있으며^[3], 재머가 디지털 변조 심볼을 전송하는 심볼 단위 재밍 공격은 공인 송수신 통신 링크를 효과적으로 무력화시킬 수 있는 재밍 기법으로 알려져 있다^[4]. 이와 관련하여 OFDM 통신 시스템에서 재밍 공격의 영향을 효과적으로 줄이기 위해 주파수를 변경하여 통신하는 주파수 도약 확산 스펙트럼(frequency hopping spread spectrum: FHSS) 기반의 항재밍 연구가 진행되었으나^[5],

* 본 연구는 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 LIG 넥스원 지원(계약번호: 2022U145009) 및 과학기술정보통신부의 지원(과제번호: RS-2024-00396992)을 받아 수행된 연구임.

♦ First Author : Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, leeu@o.cnu.ac.kr, 학생(석사), 학생회원

° Corresponding Author : (0000-0002-4485-9592) Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, bcjung@cnu.ac.kr, 정교수, 종신회원

* (0000-0002-8552-1731) Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, yslee@o.cnu.ac.kr, 학생(박사)

** Cyber & Electronic Warfare R&D, LIG Nex1 Co., Ltd., {youngil.jeon, junghyun.seo}@lignex1.com

*** (0000-0001-5509-9202) Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, howon@ajou.ac.kr, 정교수, 종신회원

논문번호 : 202407-162-B-LU, Received July 29, 2024; Revised August 30, 2024; Accepted August 30, 2024

OFDM 통신 시스템에서 심볼 단위 신호를 임의의 주파수로 전송하는 재밍 공격에 대한 고려는 아직 미비한 실정이다. 또한, 실질적인 재밍 영향 분석이나 효과적으로 재밍 신호를 제거할 수 있는 항재밍 기술 연구는 활발히 조사되지 않았다.

본 논문에서는 OFDM 기반 공인 송수신 통신 링크에서 재머가 운용 주파수 대역 내 임의의 주파수를 활용하여 심볼 단위 재밍 신호를 전송하는 재밍 공격 환경을 고려한다. 본 논문에서는 해당 재밍 공격 환경에서 전 대역에 미칠 수 있는 재밍 신호의 영향을 이론적으로 도출하고, 모든 부반송파 신호에서 발생할 수 있는 재밍 신호 영향을 효과적으로 완화할 수 있는 결합 최대 우도(joint maximum likelihood: JML) 검파 기반 항재밍 기법을 제안한다. 또한, 제안하는 기법의 비트 당 오류율(bit-error rates: BER) 성능을 수학적으로 분석하고 모의실험을 통해 제안하는 기법의 항재밍 성능 향상과 이론적 분석 결과를 검증한다.

II. 제안하는 JML 검파 기반 항재밍 기법

본 논문에서는 그림 1과 같이 단일 안테나를 갖는 공인 송신기와 수신기 간 통신 링크에 단일 안테나를 갖는 OFDM 재머가 수신기로 심볼 단위 신호를 전송하는 통신 환경을 고려한다. 본 논문에서는 N 개의 부반송파를 통해 공인 송신기와 수신기가 통신하고 있고 재머는 공인 송신기와 수신기가 사용하는 주파수 대역을 알고 있다고 가정한다. 이때, 재머는 $\mu(=k'+\epsilon)$ 부반송파 인덱스에 해당하는 주파수를 통해 심볼 단위 재밍 신호를 생성한다. 여기서 재밍 신호의 부반송파 인덱스는 기존 부반송파 인덱스를 나타내는 정수 부분 $k'(\in \mathbb{Z})$ 와 소수 부분 $\epsilon(\in (0,1])$ 으로 나타낼 수 있다. 따라서, 시간 영역에서 재밍 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

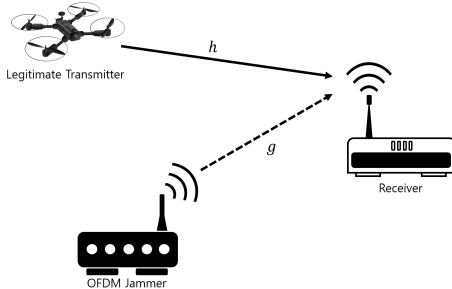


그림 1. OFDM 통신 환경에서 항재밍 시스템 모델
Fig. 1. An anti-jamming system model in OFDM communication environment.

$$j[n] = \frac{\sqrt{P_J}}{N} J[k'] e^{\frac{2\pi n \mu}{N}}, \quad (1)$$

여기서 $n(\in \{1, \dots, N\})$ 은 시간 영역에서 샘플링 인덱스, P_J 는 송신 재밍 신호 전력, $J[k']$ 은 재머가 전송하는 정규화된 주파수 영역 심볼을 나타낸다.

OFDM 수신기에서 fast Fourier transform (FFT) 연산을 통해 $k(\in \{1, \dots, N\})$ 째 부반송파에 대한 주파수 영역 수신 신호는 다음과 같다.

$$Y[k] = \sqrt{P_S} H[k] X[k] + \sqrt{P_J} G[k] \gamma(k, \mu) J[k'] + W[k], \quad (2)$$

여기서 $H[k]$ 와 $G[k]$ 는 각각 공인 링크 및 재밍 링크의 주파수 영역 채널 응답을 나타내고, $X[k]$ 는 공인 송신기가 전송한 심볼, $W[k]$ 는 수신기에서 발생하는 주파수 영역 잡음 신호를 나타낸다. 본 논문에서, 모든 주파수 영역 열잡음 성분은 통계적으로 독립이고 동일한 $\mathcal{CN}(0, N_0)$ 분포를 따른다고 가정하였다. $\gamma(k, \mu)$ 은 μ 에 해당하는 주파수로 송신한 재밍 신호가 k 째 부반송파 신호에 미치는 영향을 나타내는 항으로써 다음과 같이 유도된다.

$$\gamma(k, \mu) = \frac{\sin(\pi(\mu - k))}{N \times \sin\left(\frac{\pi(\mu - k)}{N}\right)} e^{\frac{2\pi(\mu - k)(N-1)}{N}}, \quad (3)$$

본 논문에서는 특정 부반송파에 대한 재밍 신호 감쇄를 위한 JML 검파 기반 수신기를 제안한다. 따라서, 공인 송신기는 다음과 같이 JML 검파를 통해 k 째 부반송파 수신 신호에서 공인 송신기와 재머가 전송한 심볼을 검파한다.

$$\begin{aligned} & (\hat{s}_x^k, \hat{s}_J^k) \\ &= \underset{s_x^k, s_J^k \in \mathcal{S}}{\operatorname{argmin}} \left\{ \left| Y[k] - \sqrt{P_S} H[k] s_x^k - \sqrt{P_J} G[k] \gamma(k, \mu) s_J^k \right|^2 \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $\mathcal{S}$ 는 송신 심볼의 정규화된 후보 집합을 의미한다. 이때, 본 논문에서는 수신기는 OFDM 채널 특성과 블라인드 채널 추정 기법을 이용하여 재머와 수신기 간 채널을 알고 있다고 가정하였다⁶⁾.

III. JML 검파 기반 항재밍 기법의 성능 분석

본 장에서는 OFDM 심볼 단위 재밍 공격 환경에서

제안하는 JML 검파 기반 항재밍 기법의 BER 성능을 수학적으로 분석한다. 또한, 일반성을 잃지 않고, 임의의 k 째 부반송파 신호에서 공인 송신기가 전송한 심볼 검파의 오류 확률을 유도한다. 주파수 영역 채널 $H[k]$ 와 $G[k]$ 는 각각 통계적으로 독립이고 동일한 $\mathcal{CN}(0,1)$ 분포를 따르는 레일리 페이딩(Rayleigh fading) 채널을 가정하였고, 공인 송신기와 재밍은 직교 위상 천이(quadrature phase shift keying: QPSK) 변조 심볼을 전송한다고 가정하였다.

따라서, 유효 채널 이득 $A_S^k = \sqrt{P_S}H[k]$, $A_J^k = \sqrt{P_J}G[k]\gamma(k,\mu)$ 가 주어질 때, k 째 부반송파 신호에서 공인 송신기 신호 비트가 오류가 발생할 조건부 확률 상한은 다음과 같이 유도된다⁷⁾.

$$\Pr(E|A_S^k, A_J^k) \leq \sum_{l=1}^8 Q\left(\sqrt{\frac{\delta_l^2}{2N_0}}\right), \quad (5)$$

여기서 $\delta_l(l \in 1, 2, \dots, 8) = |A_S^k \alpha_l + A_J^k \beta_l|$ 는 성상에서 오류가 발생할 수 있는 중첩 심볼 간 거리를 나타낸다. 본 절에서는 QPSK 매핑 규칙을 적용하여, 표 1과 같이 신호를 표현할 수 있다⁷⁾. 또한, α_l 와 β_l 는 각각 $1 \leq l \leq 4$ 에서, $\alpha_l = s_1 - s_4$ 및 $\beta_l = s_1 - s_l$ 로 정의되고, $5 \leq l \leq 8$ 에서는, $\alpha_l = s_1 - s_3$ 및 $\beta_l = s_1 - s_{l-4}$ 로 정의된다. 또한, 유효 채널 계수를 나타내는 δ_l 은 통계적으로 평균이 0이고 분산이 $P_S|\alpha_l|^2 + P_J|\beta_l|^2|\gamma(k,\mu)|^2$ 인 복소 가우시안 분포를 따르며, 채널 이득 $|\delta_l|^2$ 은 통계적으로 λ 가 $1/(P_S|\alpha_l|^2 + P_J|\beta_l|^2|\gamma(k,\mu)|^2)$ 인 지수 분포를 따른다고 알려져 있다. 따라서, 전체 확률 정리에 의해 제안하는 JML 검파 기반 항재밍 기법의 BER 성능 상한은 다음과 같다.

표 1. QPSK 심볼 신호 매핑
Table 1. QPSK symbol signal mapping.

Bit-pattern	Symbol	Signal Representation
00	s_1	$\frac{1+j}{\sqrt{2}}$
01	s_2	$\frac{-1+j}{\sqrt{2}}$
11	s_3	$\frac{-1-j}{\sqrt{2}}$
10	s_4	$\frac{1-j}{\sqrt{2}}$

$$\Pr(E) \leq \sum_{l=1}^8 \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4}{SNR|\alpha_l|^2 + JNR|\beta_l|^2|\gamma(k,\mu)|^2}}} \right), \quad (6)$$

여기서 $SNR(=P_S/N_0)$ 과 $JNR(=P_J/N_0)$ 은 각각 신호 대 잡음 비(signal to noise ratio: SNR)와 재밍 대 잡음 비(jamming to noise ratio: JNR)을 의미한다.

IV. 모의실험 결과

본 모의실험 환경은 부반송파 수 $N=128$ 을 가정하였고, 수신기를 무력화하기 위한 실제적인 재밍 공격 시나리오를 반영하여 재밍 신호의 전력은 공인 송신기 신호보다 3dB 높다고 가정하였다⁸⁾. 또한, 재밍 신호는 정수 인덱스 $k'=100$, 소수 부분 $\epsilon=0.3$ 에 해당하는 주파수로 생성하였다. 그림 2와 그림 3은 각각 부반송파 인덱스 $k=100$ 과 $k=10$ 에 해당하는 수신 신호의 BER 성능을 도기한 결과를 나타낸다. 이때, 성능 비교를 위한 single user ML 기법은 재밍 신호가 존재함에도 불구하고 공인 송신기 신호에 대한 ML 검파만을 수행하는 기존 기법을 의미하여 재밍 신호가 미치는 영향을 직접적으로 확인할 수 있다.

구체적으로, 그림 2는 재밍 신호의 주파수와 가장 인접한 부반송파 인덱스 신호에 대한 BER 성능을 나타낸다. 기존 기법에선 재밍 신호의 영향으로 인해 수신기가 정상적으로 동작하지 않음을 확인할 수 있다. 한편, 그림 3은 재밍 신호의 주파수와 인접하지 않는 부반송파 인덱스 신호의 BER 성능을 나타낸다. 이러한 비인접 부반송파 인덱스에서 재밍 신호는 (3)에 의해 낮은

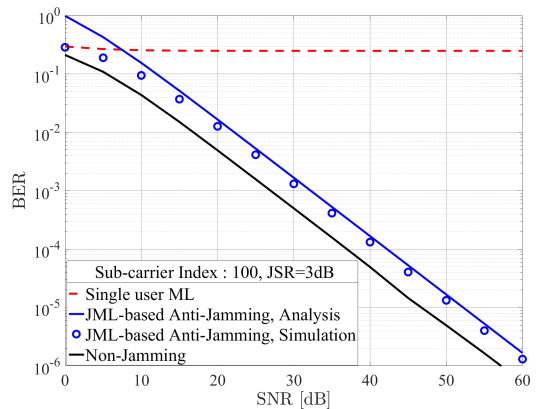


그림 2. 부반송파 인덱스($k=100$) 신호에 대한 제안하는 항재밍 기법의 BER 성능
Fig. 2. BER performance of the proposed anti-jamming technique for signals of subcarrier index ($k=100$).

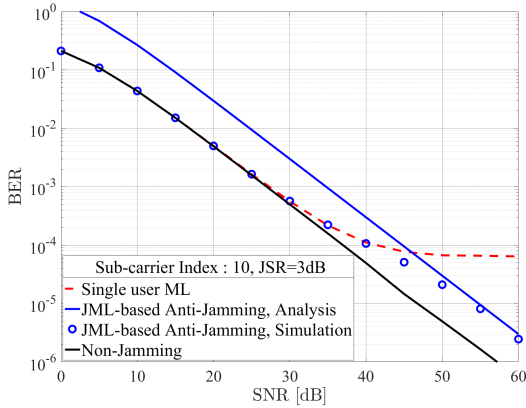


그림 3. 부반송파 인덱스 ($k=10$) 신호에 대한 제안하는 항재밍 기법의 BER 성능
Fig. 3. BER performance of the proposed anti-jamming technique for signals of subcarrier index ($k=10$).

SNR 영역에서 재밍 영향이 크지 않으나 (6)에서 JNR 이 증가함에 따라 재밍 신호의 영향도 함께 커지게 되어 높은 SNR 영역에선 재밍 신호에 의해 BER 성능이 포화되는 것을 확인할 수 있다. 반면, 제안하는 JML 검파 기반 항재밍 기법은 모든 부반송파 인덱스 신호에 대해 전체 SNR 영역에서 효과적으로 재밍 신호의 영향을 완화할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 본 논문에서 분석한 JML 검파 기반 항재밍 기법의 이론적 성능 상한이 모든 부반송파 인덱스 신호에 대한 모의실험 결과를 잘 나타내는 것을 검증하였다.

V. 결론

본 논문에서는 OFDM 통신 시스템에서 대역 내 임의의 주파수를 활용하는 심볼 단위 재밍 공격이 존재할 때, 모든 대역 내 재밍 공격의 영향을 효과적으로 완화할 수 있는 JML 검파 기반 항재밍 기법을 제안하였고, 제안하는 기법의 성능을 이론적으로 분석하였다. JML 검파 기반 항재밍 기법의 수학적 성능 분석 결과는 재밍 신호가 존재하는 OFDM 시스템을 특성화하는데 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 향후 본 연구 결과를 기반으로 다수의 재머와 다중안테나 수신기를 고려한 실질적인 OFDM 재밍 환경을 고려하고, 일반화된 변조 차수에 대한 항재밍 기법의 성능을 이론적으로 분석할 예정이다.

References

[1] G. K. Pandey, D. S. Gurjar, H. H. Nguyen, and S. Yadav, "Security threats and mitigation

techniques in UAV communications: A comprehensive survey," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 112858-112897, Oct. 2022.

(<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3215975>)

[2] Y. -J. Lee, et al. "A joint maximum likelihood detection-based anti-jamming technique for mitigating symbol-level jamming attacks in OFDM communication systems," in *Proc. KICS Summer Conf.*, p. 662, Jun. 2024.

[3] C. Shahriar, S. Sodagari, R. McGwier, and T. C. Clancy, "Performance impact of asynchronous off-tone jamming attacks against OFDM," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 2177-2182, Jun. 2013.

(<https://doi.org/10.1109/ICC.2013.6654850>)

[4] H. S. Jang and B. C. Jung, "Performance analysis of reactive symbol-level jamming techniques," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 12, pp. 12432-12437, Dec. 2018.

(<https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2877435>)

[5] Y. Shi, X. Lu, K. An, Y. Li, and G. Zheng, "Efficient index-modulation-based FHSS: A unified anti-jamming perspective," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 2, pp. 3458-3472, Jan. 2024.

(<https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3296605>)

[6] R. Cao, H. Gao, and Y. Lu, "Channel estimation for massive MIMO uplink under active jamming attack," *IEEE Syst. J.*, vol. 17, no. 2, pp. 3258-3269, Jun. 2023.

(<https://doi.org/10.1109/JSYST.2022.3209790>)

[7] J. S. Yeom, H. S. Jang, K. S. Ko, and B. C. Jung, "BER performance of uplink NOMA with joint maximum-likelihood detector," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 10, pp. 10295-10300, Oct. 2019.

(<https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2933253>)

[8] A. S. Ali, et al., "Performance analysis and evaluation of RF jamming in IoT networks," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, pp. 2745-2751, Dec. 2022.

(<https://doi.org/10.1109/GLOBECOM48099.2022.10001334>)