

OFDM 통신 시스템에서 심볼 단위 제밍 공격 완화를 위한 결합 최대 우도 검파 기반 항제밍 기법

이유진¹, 이영석¹, 전영일², 서정현², 이호원³, 정방철¹

¹충남대학교, ²LIG넥스원, ³아주대학교

{leeuj, yslee}@o.cnu.ac.kr, {youngil.jeon, junghyun.seo}@lignex1.com, howon@ajou.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

A Joint Maximum Likelihood Detection-based Anti-Jamming Technique for Mitigating Symbol-level Jamming Attacks in OFDM Communication Systems

Yu-Jin Lee¹, Young-Seok Lee¹, Young il Jeon², Jung Hyun Seo², Howon Lee³, Bang Chul Jung¹

¹Chungnam National University, ²Cyber&Electronic Warfare R&D, LIG Nex1 Co., Ltd., ³Ajou University

요약

본 논문에서는 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 통신 시스템에서 공인(legitimate) 송신기와 수신기 간 통신을 방해하는 심볼 단위 제밍(symbol-level jamming: SLJ) 공격을 완화하기 위한 결합 최대 우도(joint maximum likelihood: JML) 검파 기반 항제밍 기법을 제안하고, 이론적 성능 상한을 분석한다. 모의실험을 통해, SLJ 공격이 통신 성능에 미치는 영향을 확인하고 제안하는 JML 검파 기반 항제밍 기법이 SLJ 공격을 효과적으로 완화할 수 있음을 검증하며 이론적 성능 분석 결과가 실제 모의실험 결과를 잘 나타내는 것을 확인한다.

I. 서론

직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 기반 통신 시스템은 운용 주파수 대역이 알려질 때 공인 송신기와 수신기 간 통신을 방해하는 제밍(jamming) 공격에 취약한 문제점이 있다 [1]. 특히, 공인 통신 링크와 동일한 변조 및 채널 부호 기법을 사용하여 임의의 심볼을 수신기로 전송하는 심볼 단위 제밍(symbol-level Jamming: SLJ)은 낮은 전력으로도 높은 제밍 효과를 갖는 것으로 알려져 있다 [2]. 그러나, SLJ 공격에 관한 실질적인 영향 분석 및 효과적으로 제밍 공격을 완화할 수 있는 항제밍 기술 연구는 다소 미비한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 OFDM 통신 시스템에서 SLJ 공격이 존재할 때 이를 효과적으로 완화할 수 있는 결합 최대 우도(joint maximum likelihood: JML) 검파 기반 항제밍 기법을 제안하고, 그 성능을 이론적으로 분석한다. 또한, 모의실험을 통해 제안하는 JML 검파 기반 항제밍 기법이 효과적으로 SLJ 공격의 영향을 완화할 수 있음을 검증한다.

II. SLJ 완화를 위한 JML 검파 기반 항제밍 기법 및 성능 분석

본 논문에서는 단일 안테나를 갖는 공인 송신기와 수신기 간 통신 링크에 단일 안테나를 갖는 제머가 수신기로 SLJ 신호를 전송하는 통신 환경을 고려한다. 본 논문에서는 N 개의 부반송파를 통해 공인 송신기와 수신기가 통신하고 있다고 가정한다. 따라서, k ($\in \{1, \dots, N\}$) 짝 부반송파에 대한 주파수 영역 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y[k] = \sqrt{P_S}H[k]X[k] + \sqrt{P_J}G[k]J[k] + W[k],$$

여기서 P_S 와 P_J 는 각각 공인 송신기 심볼 및 SLJ 심볼 전력을 나타내고, $H[k]$ 와 $G[k]$ 는 각각 공인 링크 및 SLJ 링크의 주파수 영역 채널 응답을 나타낸다. 또한, $X[k]$ 와 $J[k]$ 는 각각 공인 송신기와 제머가 k 짝 부반송파로 전송한 심볼을 나타내며 $W[k]$ 는 수신기에서 발생하는 부가 열잡음의 신호를 나타낸다. 본 논문에서 모든 잡음 성분은 서로 독립이고 동일한 $\mathcal{CN}(0, N_0)$ 분포를 따른다고 가정하였다. 본 논문에서는 SLJ 신호 감쇄를 위한 JML 검파 기반 수신기를 제안한다. 따라서, 다음과 같이 수신기는 JML 검파를 통해 k 짝 부반송파 수신 신호에서 공인 송신기와 제머가 전송한 심볼을 검파한다.

$$(\hat{s}_x^k, \hat{s}_j^k) = \underset{s_x^k, s_j^k \in \mathcal{S}}{\operatorname{argmin}} \left\{ |Y[k] - \sqrt{P_S}H[k]s_x^k - \sqrt{P_J}G[k]s_j^k|^2 \right\},$$

여기서 \mathcal{S} 는 송신 심볼의 정규화된 후보 집합을 의미한다.

본 논문에서는 SLJ 공격 환경에서 제안하는 JML 검파 기반 항제밍 기법의 비트 당 오류율(bit-error rates: BER) 성능을 수학적으로 분석한다. 이때, 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 제머는 직교 위상 전이(quadrature phase shift keying: QPSK) 변조 심볼을 전송한다고 가정하였다. [3]에 기반하여, SLJ 공격이 존재할 때 JML 검파 기반 항제밍 기법의 오류 확률 상한은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\Pr(E) \leq \sum_{i=1}^8 \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 4/(SNR|\alpha_i|^2 + JNR|\beta_i|^2)}} \right),$$

여기서 $SNR(= P_S/N_0)$ 과 $JNR(= P_J/N_0)$ 은 각각 공인 신호 대 잡음 비와 제밍 신호 대 잡음 비를 의미하고 α_i 와 β_i 는 [3]과 같이 정의된다.

IV. 모의실험 결과 및 결론

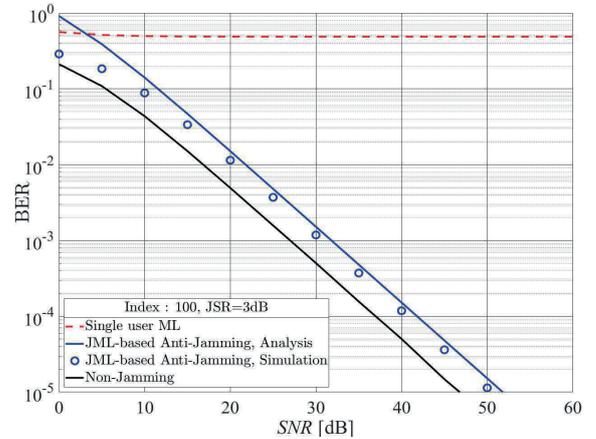


그림 1 SLJ 공격 환경에서 JML 검파 기반 항제밍 기법의 BER 성능

그림 1은 OFDM 통신 시스템에서 SLJ 공격이 존재할 때 제안하는 JML 검파 기반 항제밍 기법의 공인 송신기 신호 대 잡음비(SNR) 대비 BER 성능을 도시한 결과이다. 본 모의실험에서는 부반송파 수 $N=128$, 제밍 대 공인 송신기 신호 전력비는 3dB로 가정하였다. 그림 1은 부반송파 인덱스 $k=100$ 에 해당하는 수신 신호의 BER 성능을 나타낸다. 성능 비교를 위한 single user ML 기법은 SLJ 신호가 존재함에도 불구하고 공인 송신기 신호에 대한 ML 검파만을 수행한 BER 결과를 의미하여 SLJ 신호에 의한 영향을 확인할 수 있다. 반면, 제안하는 JML 검파 기반 항제밍 기법은 SLJ 공격을 효과적으로 완화할 수 있음을 확인하였으며, 본 논문에서 분석한 수학적 성능이 실제 모의실험 결과를 잘 나타내는 것을 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 LIG 넥스원 지원을 받아 수행된 연구임. (계약번호: 2022U145009)

참고 문헌

[1] C. Zhong, J. Yao, and J. Xu, "Secure UAV communication with cooperative jamming and trajectory control," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 2, pp. 286-289, Feb. 2019.
 [2] 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.
 [3] 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.