

최대 우도 검파기법을 이용한 심볼레벨 재밍신호의 자동 변조 분류기법

이예림, 염정선, 정방철
충남대학교 전자공학과

yyy0587@o.cnu.ac.kr, jsyeom@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

1. 서론

최근 전자전 중심으로 전장이 확대됨에 따라 전자전의 중요성이 증가하고 있으며 널리 알려진 전자전 기술인 재밍(jamming) 기술 역시 발전하고 있다[1]. 과거 재밍 기술은 단순히 인위적인 가우시안 잡음을 재밍 신호로 방사함으로써 타겟 시스템의 신호대 재밍비(signal-to-jamming ratio, SJR)를 감소시켜 통신 성능을 저하시킨다. 최근에는 낮은 전력으로 효과적 재밍이 가능하고 재밍 공격 식별 확률을 최소화할 수 있는 심볼레벨 재밍(symbol-level jamming, SLJ)에 대한 많은 연구가 진행되고 있다[2,3]. 그러나 현재까지 SLJ에 대한 항재밍(anti-jamming) 시스템을 위한 연구는 미비하다.

본 논문에서는 재밍 신호 자체를 저감하는 기술의 선행 연구로서 수신된 재밍 신호에 대한 디지털 변조 방식을 자동으로 식별하는 기법에 대해 연구한다. 구체적으로 최적의 검파 성능을 제공하는 최대 우도 검파(maximum likelihood detection, MLD) 기법을 활용하여 이진 위상편이변조(binary phase Shift keying, BPSK), 직교 위상편이변조(quadrature phase Shift keying, QPSK), 16-직교 진폭 변조(quadrature amplitude modulation, QAM)에 대한 자동 변조 분류기법에 대한 성능을 검증한다.

2. 시스템 모델

본 논문에서 직교 주파수 분할 다중 방식(orthogonal frequency division multiplexing)을 고려하며 단일 안테나를 갖는 재머와 타겟 시스템 내 단일 안테나를 갖는 수신기가 재밍 신호를 수신하는 시스템을 고려한다. 무선 채널은 B 시간 슬롯동안 플랫 페이딩(flat fading)을 가정한다. 재머는 BPSK, QPSK, 16-QAM 중 하나의 변조 방식을 선택하여 B 시간 슬롯동안 SLJ 신호를 C 개의 부반송파를 통해 전송한다. 타겟 시스템은 주파수 도약 확산 스펙트럼(frequency-hopping spread spectrum, FHSS) 기술을 사용하여 신호를 송수신한다고 가정한다. 그러므로 수신기는 송신기와 공유하는 FHSS 패턴에 해당하지 않는 리소스 블록(resource block)을 통해 재밍 신호만이 존재하는 신호를 수집할 수 있다. 본 논문에서는 재밍 신호의 변조 분류만을 고려하므로 B 시간 슬롯동안 재밍 신호만 수신된다고 가정한다. 그러므로 $C \times B$ 개의 리소스 블록을 통해 수신기가 수신하는 재밍 신호 벡터 $\mathbf{y}_j \in \mathbb{C}^{CB \times 1}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_j = \sqrt{P_j}(\mathbf{h} \otimes \mathbf{I}_B)\mathbf{x}_j + \mathbf{n} \quad (1)$$

여기서 P_j 는 재밍 전력을 의미하며 $\mathbf{h} \otimes \mathbf{I}_B$ ($\triangleq \mathbf{g}$)는 재머에서 수신기까지의 무선 채널 행렬이며 \otimes 는 크로네커 곱(Kronecker product)이다. 여기서 $\mathbf{h} \in \mathbb{C}^{C \times 1}$ 는 레일리(Rayleigh) 페이딩 채널 모델을 가정하며 $\mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_C)$ 의 분포를 따른다. 재밍 신호와 가산 백색 가우시안 잡음은 각각 $\mathbf{x}_j \in \mathbb{C}^{CB \times 1}$ 와 $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{CB \times 1}$ 로 표현되며 \mathbf{n} 은 $\mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_{CB} \times N_0)$ 의 분포를 따른다고 가정한다.

3. MLD 기반 변조 방식 분류

수신 신호의 분포는 변조화 차수의 값 $M \in \{2, 4, 16\}$ 만큼의 가우시안 분포가 혼합된 가우시안 혼합 모델(Gaussian mixture model)로 주어진다. 이때, M 개의 가우시안 분포의 평균은 송신 신호 후보들의 값이며 분산

은 잡음의 분산 N_0 으로 동일하며 혼합 가중치는 $1/M$ 으로 주어진다. 이에 대한 로그 우도 함수는 다음과 같다.

$$\log \mathcal{L}(M) = \sum_{c=1}^{CB} \log \sum_{m=1}^M \frac{1}{M} f_G(\mathbf{y}_j; [\mathbf{g}]_c \times s_{M,m}, N_0) \quad (2)$$

여기서 f_G 는 가우시안 분포를 의미하며 $[\mathbf{v}]_i$ 는 벡터 \mathbf{v} 의 i 번째 요소를 의미하고 $s_{M,m}$ 은 변조 차수 M 을 갖는 변조 방식의 m 번째 신호를 의미한다. 그러므로 다음과 같이 로그 우도 함수값이 최대인 M 을 결정함으로써 변조 방식을 검파할 수 있다.

$$\hat{M} = \arg \max_{M \in \{2, 4, 16\}} \log \mathcal{L}(M). \quad (3)$$

3. 모의실험 결과 및 결론

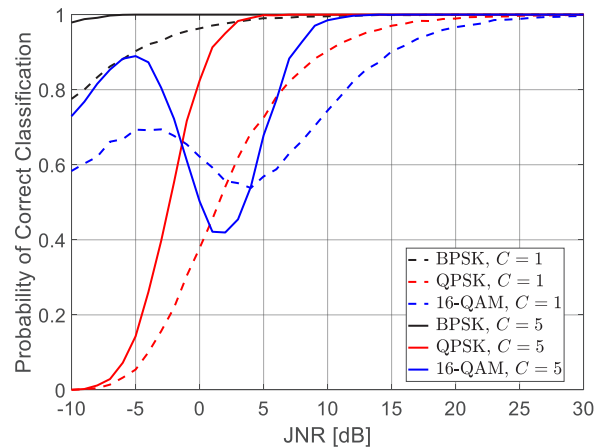


그림 1 심볼레벨 재밍 신호에 대한 변조 방식 분류의 정확성 성능 비교

그림 1은 BPSK, QPSK, 16-QAM 신호 중 하나를 전송하는 심볼레벨 재밍 신호에 대한 재밍 대 잡음비(jamming-to-noise ratio, JNR)에 따른 변조 방식 분류의 정확성 성능을 보인다. 전체적인 경향은 JNR이 향상될수록 정확하게 변조 방식을 검파할 확률이 증가한다. 직교 주파수가 증가할수록 전체적인 수신 재밍 신호의 샘플이 많아지기 때문에 대체적으로 정확성이 증가하는 경향을 보인다. 16-QAM의 성능 변화는 특이한 경향을 보이는데 이는 16-QAM이 생성하는 신호의 값이 많은 이유인 것으로 사료된다.

4. ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 2023년도 정부로(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2021R1A4A1032580 & 2022R1I1A3073740).

5. 참고 문헌

[1] 배유경, 염정선, 정방철, "가우시안 재밍 환경에서 채널 추정 에러를 고려한 인덱스 변조 비직교 다중 접속 기법," *한국통신학회 논문지*, vol. 47, no. 9, pp. 1302-1305, Sep. 2022.
[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] Y. Jang, J. Park, and I. Kim, "BER Expression of QAM for Symbol-Level Jamming," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 2, pp. 1037-1048, Feb. 2022.