

지능형 재밍환경에서 인덱스 변조기반 주파수도약 대역 확산 기법

배유경, 염정선, 정방철
충남대학교

ykb1103@o.cnu.ac.kr, jsyeom@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Index Modulated-Frequency Hopping Spread Spectrum Technique for Intelligent Jamming Environments

Yoo-Kyung Bae, Jeong Seon Yeom, and Bang Chul Jung
Chungnam National University

요약

본 논문은 지능형 재밍인 R-SLJ(Reactive symbol-level Jamming) 네트워크에서 재밍 공격에 대한 강인한 통신을 가능하게 하는 IM-FHSS(Frequency Hopping Spread Spectrum) 기술을 제안한다. 또한 현실적인 재밍 확률을 고려하여 수신 신호에 협력 최대 가능도 검출을 적용하였다. 또한, 본 논문에서는 최초로 페딩 채널 환경에서의 비트 오류율 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하며 에너지 검출 기법과 비교하였다. 그 결과 제안된 IM-FHSS의 JML 성능이 에너지 검출 기법보다 우수하였다. 또한, 재밍율을 높여도 낮은 변조 차수를 사용하여 향상된 성능을 달성하였다.

I. 서론

무선 통신에서 광역전파(broadcasting) 발생을 통해 타인의 통신을 의도적으로 무력화시키는 재밍(Jamming) 문제가 심각하게 대두되고 있으며 이를 해결하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 한편, 반응적 심볼 레벨 재밍(Reactive symbol-level Jamming)은 지속적으로 주파수 대역을 탐지하며 재밍 링크의 변조 방식까지 파악하여 임의로 발생시킨 비트를 동일하게 변조하여 재밍 신호로 사용하여 에너지 효율적인 재밍 방식으로 알려져 있다[1]. 최근 제안된 인덱스 변조(index modulation: IM)는 부반송파의 활성화 유무를 통해 비트 정보의 일부를 직교 주파수 자원에 임베딩하여 주파수 자원을 활성화 상태로 변조하는 기술로서, 에너지 효율성과 통신 성능을 향상시킬 수 있다[2]. 주파수 도약 대역 확산(FHSS: Frequency Hopping Spread Spectrum) 시스템은 높은 보안성이 보장되어 많이 응용된다. 따라서 본 논문은 최초로 페딩 채널에서의 R-SLJ를 고려한 IM-FHSS 기법을 제안한다.

II. R-SLJ 환경을 고려한 IM-FHSS 시스템

본 논문에서는 페딩 채널에서 통신하는 공인 송신 access point (AP)와 공인 수신 단말 그리고 반응 재밍을 하는 재머로 구성된 재밍 네트워크를 고려한다. 재머는 능동 재밍으로 두 단말의 통신을 재밍한다고 가정한다.

저전력으로 동작해야 하는 IoT 단말의 특성과 재밍 시나리오를 고려하여 공인 송수신기들은 항재밍 기법으로 IM-FHSS 기법을 적용한다. 구체적으로 주파수 호핑 (frequency hopping, FH)을 위한 N 개의 직교 주파수 자원이 존재할 때, AP는 비트 정보 $m = m_1 + m_2$ 를 전송한다. 비트 정보 m 중 $m_1 = (\lfloor \log_2 N \rfloor)$ 개의 비트는 FH 패턴의 인덱스에 의해 전달되는 IM 기법에 의해 IoT 단말에 전송되며 나머지 m_2 개의 비트는 심볼로 변조되어 결정되며 패턴의 주파수에 임베딩되어 전송된다. 이때, N 은 FH 패턴의 수이며, 결정된 FH 패턴은 한 호핑 지속시간 동안만 사용한다고 가정한다. 그러므로 N 을 증가시킴으로써 더 많은 재밍 회피 확률을 향상함과 동시에 IM 기법을 통해 더 많은 정보를 전송할 수 있다.

재머는 능동 재밍을 위해 공인 송수신기 사이 누설된 링크(overhearing link)를 통해 N 개의 직교 주파수 자원 중 AP의 신호가 전송된 하나의 주파수 자원을 전력 최대 우도 검파 기법을 통해 알아낼 수 있다. 그 후, 재머는 해당 주파수를 통해 재밍신호를 전송한다. 만약 재머의 활성화 주파수 검파 오류 확률과 프로세싱 딜레이 및 전송 딜레이 등으로 인해 p_j 의 확률로 공인 링크에 대해 재밍을 한다면 공인 수신 단말이 수신하는 신호 벡터 $\mathbf{y} (\in \mathbb{C}^{N \times 1})$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{y} = \begin{cases} \sqrt{Pd} \text{diag}(\mathbf{h})\mathbf{x} + \mathbf{w} & \text{with } 1 - p_j \\ \sqrt{Pd} \text{diag}(\mathbf{h})\mathbf{x} + \mathbf{J} + \mathbf{w} & \text{with } p_j \end{cases} \quad (1)$$

여기서 P 는 송신 전력, d 는 공인 송수신기 사이 정규화 거리를 나타내며, α 와 $\text{diag}(\cdot)$ 은 각각 경로 감쇄 지수와 벡터의 대각 행렬 변환 함수를 의미한다.

송신 단말이 보낸 파일럿 신호를 통해 공인 두 단말 사이의 무선 페딩 채널 정보 $\mathbf{h} = [h(1) \dots h(N)]^T$ 를 수신 단말이 알고 있는 상황을 가정한다. 여기서 $h(n)$ 은 $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 번째 가용주파수에서의 무선 채널을 나타내며 본 논문에서 (n) 의 표기법은 n 번째 가용주파수에 대한 것을 의미한다. 모든 무선 채널의 분포는 서로 독립이며 $\mathcal{CN}(0, 1)$ 의 동일한 분포를 따른다고 가정하며, 단말이 한 패킷을 송신하는 한 호핑 지속 시간동안은 변하지 않는 준-정적(quasi-static) 채널을 가정한다. 송신 신호 벡터 $\mathbf{x} = [x(1) \dots x(N)]^T$ 는 첫 번째 부반송파가 활성화되는 경우, $x(1)$ 에는 변조 신호를, 나머지 신호에는

0의 신호를 전송한다. p_j 의 확률로 재밍을 당하는 경우 재밍 신호 $\mathbf{J} = \beta \sqrt{P_j} \mathbf{d}_j^{-\alpha} \text{diag}(\mathbf{h}_j) \mathbf{x}_j$ 가 함께 수신된다. 여기서 재밍 송신 전력 비율 β 와 \mathbf{x} 와 동일한 변조가 적용된 재머의 송신 신호 벡터 \mathbf{x}_j 에 의존된다. $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 열잡음을 의미하며 $\mathcal{CN}(0, N_0 \times \mathbf{I}_N)$ 의 분포를 따른다고 가정한다.

수신 단말은 수신 신호로부터 아래와 같은 협력 최대 우도 검파 기법을 통해 공인 통신 링크에서 송신 단말이 전송한 심볼과 활성화된 부반송파의 인덱스를 동시에 검파한다.

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{s} \in \mathcal{X}} \|\mathbf{y} - \sqrt{Pd} \text{diag}(\mathbf{h})\mathbf{s}\|^2, \quad (2)$$

여기서, $\hat{\mathbf{x}}$ 는 수신 단말에서 검파한 송신 단말의 신호 벡터이며, \mathcal{X} 은 변조 신호에 대한 송신 신호의 후보 집합이다.

III. 모의실험 결과 및 결론

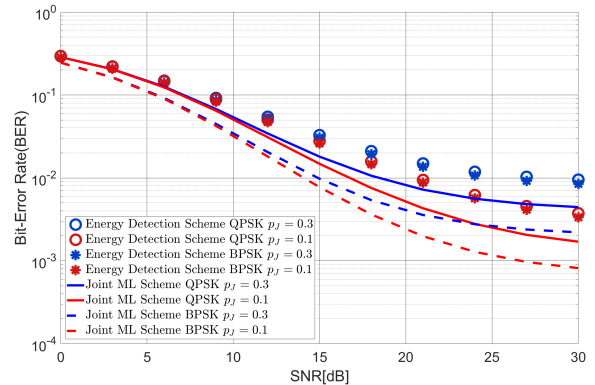


그림 1. IM-FHSS 시스템의 BER 성능

그림 1은 반응적 심볼 레벨 재밍으로 통신 노드를 무력화시키는 재머가 존재하는 환경에서 페딩 채널의 공인 통신 링크를 이루고 있는 두 단말에 대한 인덱스 변조 주파수 도약 대역 확산(Index Modulation-Frequency Hopping Spread Spectrum: IM-FHSS)의 비트 오류율(Bit-Error Rate: BER) 성능을 보여 준다. p_j 의 확률로 재밍이 가해지는 환경에서 FH 패턴의 개수는 $N = 2$ 로 가정하며 송신 전력 및 수신 단말까지의 정규화된 거리는 각각 $P = P_j = 1$ 과 $d = d_j = 1$ 로 가정한다. 경로 감쇄 지수 $\alpha = 3$ 과 송신 전력 비율 $\beta = 0.25$ 로 가정하였을 때, 결과적으로 본 논문에서 제안한 결합 최대 우도 검파 기법이 에너지 검출 성능보다 우수한 것을 확인하였다. 또한, 재밍 확률이 높아져도 낮은 변조 차수를 사용하였을 때 향상된 성능을 달성하는 것을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.(UD190033ED)

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] Y. Shi, K. An and Y. Li, "Index Modulation Based Frequency Hopping: Anti-Jamming Design and Analysis," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 7, pp. 6930-6942, July 2021.