

가우시안 재밍 환경에서 채널 추정 에러를 고려한 인덱스 변조 비직교 다중 접속 기법

배 유 경*, 엄 정 선*, 정 방 철^o

Index Modulation Non-Orthogonal Multiple Access under Channel Estimation Error and Gaussian Jamming

Yoo-Kyung Bae*, Jeong Seon Yeom*,
 Bang Chul Jung^o

요 약

본 논문에서는 군통신 환경에서 적군의 재밍 신호에도 강인한 통신 서비스를 지원하기 위해 기존 비직교 다중접속 (non-orthogonal multiple access: NOMA)와 인덱스 변조 기법(index modulation: IM)을 적용한 상향링크 IM-NOMA 기법을 제안한다. 또한, 채널 추정 오류가 있는 현실적인 환경을 고려한다. 부분대역 재밍(partial band jamming: PBJ)과 전대역 재밍 (barrage jamming: BJ)이 있을 때 기존 NOMA와 비교 분석하였다. 시뮬레이션 결과로부터 IM-NOMA 기법이 NOMA 시스템보다 PBJ와 BJ 환경에서 모두 우수한 성능을 확인할 수 있다.

Key Words : Index modulation (IM), non-orthogonal multiple access (NOMA), maximum-likelihood (ML) detector, channel estimation error, Gaussian jamming

ABSTRACT

In this paper, we propose an uplink IM-NOMA technique in which IM is applied to the existing NOMA, in order to support a military communication service that is robust to the jamming signal of the enemy in the military communication environment. We consider the channel estimation error for realistic military communication environment. We compare IM-NOMA with the conventional NOMA when there are PBJ and BJ. Through computer simulations, it can be confirmed that the IM-NOMA performs better than the NOMA system in both PBJ and BJ environments.

1. 서 론

무선 통신 네트워크에서 의도적으로 간섭을 발생시켜 목표하는 무선시스템을 방해하는 기술인 재밍(jamming)은 현대의 전자전에서 큰 문제로 대두되어 왔다. 전자전에서 재밍 공격은 전술적으로 사용되어 실시간 정보 수신을 차단하고 이는 전장에서 큰 타격을 미칠 수 있으므로 학계에서는 다양한 재밍 환경에서의 항재밍 (anti-jamming) 연구들이 이루어지고 있다¹⁻³⁾.

한편, IM 기법은 부반송파에 변조 심볼을 임베딩할 뿐만 아니라 부반송파의 활성화된 인덱스를 통해 비트 정보의 일부를 직교 주파수 지원에 임베딩하여 신호를 전송하는 기법이다⁴⁾. IM 기법의 활성화 부반송파의 회소 특성은 재밍 환경에서 보다 강인한 통신을 가능하게 한다⁵⁾. 본 논문에서는 IM 기법을 높은 주파수 효율성과 대규모 연결, 그리고 낮은 지연시간 등을 제공하는 NOMA 시스템⁶⁾과 접목한 IM-NOMA 기법을 고려한다. 또한, 현실적인 군통신 환경을 고려할 때 온전한 채널 추정은 불가능하므로 본 논문에서는 수신단에서 채널 추정 오류가 있다고 가정한다⁷⁾.

PBJ와 BJ의 가우시안 재밍 환경을 고려할 때, 상향

* 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크 기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다 (UD190033ED).

• First Author : (ORCID:0000-0002-1838-2313) Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, ykb1103@o.cnu.ac.kr, 학생(석사), 학생회원

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

* (ORCID:0000-0003-0480-034X) Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, jsyeom@cnu.ac.kr, 학생(박사), 학생회원

논문번호 : 202206-124-A-LU, Received June 29, 2022; Revised June 30, 2022; Accepted June 30, 2022

링크 IM-NOMA의 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio: SNR) 대비 비트 오류율 (bit-error rate: BER)을 모의실험을 통해 분석하고, IM을 적용하지 않은 NOMA 시스템과 비교한다.

II. 상향링크 IM-NOMA 시스템 모델

전체 시스템은 단일 송신 안테나를 가지는 L 개의 단말과 N 개의 수신 안테나를 가지는 수신기가 존재한다. 본 시스템은 각 송신단말이 S 개의 직교하는 부반송파 중에서 사전 정의에 따라 활성화된 K 개의 부반송파에 M 진-위상 편이 변조 (M -phase shift keying, M -PSK)된 신호를 임베딩하여 신호를 전송하는 시스템을 가정한다. l 번째 단말의 비트열인 $b_{l,\text{total}}$ 은 중복되지 않고 $b_{l,\text{sub}}$ 와 $b_{l,\text{sym}}$ 비트열로 구성된다. $|b|$ 를 비트열 b 의 길이를 나타내는 연산자라고 할 때, l 번째 단말의 비트열의 총 길이는 $|b_{l,\text{total}}| = |b_{l,\text{sub}}| + |b_{l,\text{sym}}|$. $b_{l,\text{sub}}$ 는 활성화 부반송파의 인덱스를 결정하며 길이 $|b_{l,\text{sub}}| = \lfloor \log_2 \binom{S}{K} \rfloor$ 를 갖고, $b_{l,\text{sym}}$ 는 각 활성화 부반송파에 임베딩될 M -PSK 변조 심볼을 결정하며 $|b_{l,\text{sym}}| = K \log_2(M)$ 이다.

III. 가우시안 재밍 환경에서 채널 추정 오류가 있는 상향링크 IM-NOMA 기법

그림 1은 하나의 재머가 존재하는 가우시안 재밍 환경에서 수신단의 채널 추정 오류가 있는 상향링크 IM-NOMA 기법을 설명한다. 이때, 수신기에 수신된 신호 벡터 $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{SN \times 1}$ 는 아래와 같다.

$$\mathbf{y} = \sum_{l=1}^L \sqrt{P d_l^{-\alpha}} \text{diag}(\tilde{\mathbf{h}}_l) \mathbf{x}_l + \mathbf{J} + \mathbf{w} \quad (1)$$

여기서 P 와 d_l , α 는 각각 송신 전력과 l 번째 단말로 부터 수신단까지의 거리, 그리고 경로감쇄 지수를 나타낸다. 채널 추정 오류 모델 $\tilde{\mathbf{h}}_l = \mathbf{h}_l + \boldsymbol{\epsilon}_l$ 에서, l 번째 단말과 수신단 사이 형성되는 무선 페이딩 채널 벡터 $\mathbf{h}_l = [\mathbf{h}_l(1)^T \ \mathbf{h}_l(2)^T \ \dots \ \mathbf{h}_l(S)^T]^T \in \mathbb{C}^{SN \times 1}$ 로 주어진다. 여기서 $\cdot(s)$ 표기법은 $s \in \{1, \dots, S\}$ 번째 부반송파에 대한 것을 나타낼 때, $\mathbf{h}_l(s) \in \mathbb{C}^{N \times 1} (\forall s)$ 의 모든 무선 채널은 서로 독립이고 $\mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_N)$ 의 동일한 분포를 따른다고 가정한다. 채널 추정 오류 벡터 $\boldsymbol{\epsilon}_l \in \mathbb{C}^{SN \times 1}$ 는 모든 원소가 서로 독립이고 $\mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma^2 \times \mathbf{I}_N)$ 의 동일

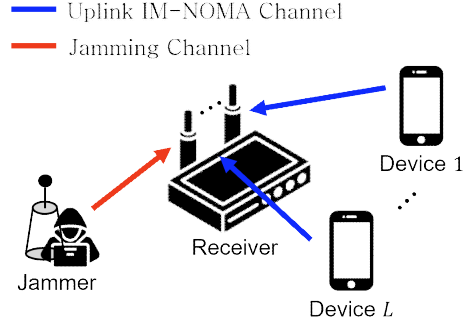


그림 1. 가우시안 재밍과 채널 추정 에러를 고려한 상향링크 IM-NOMA 시스템 모델
Fig. 1. System model of uplink IM-NOMA with Gaussian jamming and channel estimation error

한 분포를 따른다고 가정한다. $\text{diag}(\cdot)$ 표기법은 대각 행렬을 나타낸다. l 번째 단말의 송신 신호 벡터 $\mathbf{x}_l = [x_l(1)x_l(2) \dots x_l(S)]^T \otimes \mathbf{1}_N \in \mathbb{C}^{SN \times 1}$ 의 각 요소는 활성화된 부반송파에는 M -PSK 변조 심볼이, 비활성화 부반송파에는 0의 신호가 임베딩된다. \otimes 는 크로네커 곱 (Kronecker product)을 의미하며, $\mathbf{1}_N$ 은 모든 원소가 1인 크기 N 의 열벡터를 나타낸다. 수신된 재밍 신호 벡터는 $\mathbf{J} = [\mathcal{J}(1)\mathcal{J}(2) \dots \mathcal{J}(S)]^T \otimes \mathbf{1}_N \in \mathbb{C}^{SN \times 1}$ 이며, 부반송파별 재밍 신호 벡터의 요소는 $\mathcal{J}(s) \sim \mathcal{CN}(0, P_J/E)$ 의 분포를 따른다고 가정하므로 총 재밍 전력 P_J 이다. 재머가 송수신단에서 사용하는 부반송파 대역을 알고있다고 가정할 때, 총 재밍전력을 모든 부반송파 대역에 동일하게 인가하는 $E=S$ 인 BJ 모델과 총 재밍전력을 동일한 확률로 선택된 임의의 한 부반송파에만 인가하는 $E=1$ 인 PBJ 모델을 고려한다. $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{SN \times 1}$ 는 가산 백색 가우시안 잡음으로 $\mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_{SN} \times N_0)$ 의 분포를 따른다고 가정한다.

수신단은 최적의 협력 최대 우도 검파 (maximum-likelihood: ML) 검파기를 통해 아래와 같이 모든 장치에 전송된 M -PSK 변조된 심볼과 활성화된 부반송파 인덱스를 모두 검파한다.

$$\{\hat{x}_l, (\hat{k}_k)_{k=1}^K\}_{l=1}^L = \arg \min_{s_i, k_1, \dots, k_K \in \mathbb{D}} \left\| \mathbf{y} - \sum_{l=1}^L \sqrt{P d_l^{-\alpha}} \text{diag}(\mathbf{h}_l) \mathbf{s}_l \right\|^2, \quad (2)$$

여기서 \mathbb{D} 는 s_i 과 K 개의 k_i 로 구성된 송신 신호의 후보 집합이다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 가우시안 잡음과 채널 추정 오류가 있을 때, 상향링크 IM-NOMA 기법의 BER 성능을 분석하고, 인덱스 변조 기법이 없는 전통적인 NOMA 기법과 비교한다. IM의 매핑률은 [5]의 TABLE I 을 따른다고 가정한다.

그림 2는 $L=2, N=4, S=4, K=2, P=1, d_l=1, (\forall l \in \{1,2\}) \alpha=3$ 일 때, IM-NOMA의 BER 성능을 보여준다. 채널 추정 오류 분산 $\sigma^2=0.1$ 일 때, PBJ와 BJ 환경에서 신호 대 재밍비 (signal-to-jamming ratio: SJR)는 10 dB로 가정한다. 시뮬레이션 결과로부터 송신 신호 대 잡음비가 증가할수록 기존 NOMA와 IM-NOMA 모두 BER 성능이 향상하였으며, 인덱스 변조 기법이 적용된 IM-NOMA

가 적용되지 않은 기존 NOMA 시스템보다 PBJ와 BJ 환경에서 향상된 BER을 볼 수 있다. 또한, PBJ 환경보다 BJ 환경에서 더 강인하게 동작하는 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 $L=2, N=4, S=4, K=2, M=2, P=1, d_l=1, \alpha=3$ 일 때, 채널 추정 오류 분산값에 따른 IM-NOMA의 BER 성능을 상한에서 하한까지 보여준다. SJR이 10 dB일 때, 송신 SNR이 증가할수록 BER 향상을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 가우시안 재밍이 존재하는 군통신 환경에서 보다 강인한 통신을 가능하게 하는 상향링크 IM-NOMA 기법을 제안했다. 채널 추정 오류가 있는 현실적인 환경을 가정하였고, 전대역 중 일부 부반송파에만 재밍 신호를 보내는 PBJ와 전대역에 일정 재밍 전력을 고르게 전송하는 BJ 환경에서 시뮬레이션을 진행했다. 결과적으로 제안하는 IM-NOMA 기법은 IM을 고려하지 않은 기존 NOMA보다 재밍 환경에서 강인하였고, 채널 추정 오류가 있음에도 높은 BER 성능을 달성하는 것을 확인하였다. 더 나아가 다수의 재머나 지능형 재머가 있는 재밍 환경을 고려하는 경우, IM 기법을 부반송파 기반이 아닌 주파수 도약 (frequency hopping) 패턴 등을 기반으로 하는 연구로 확장하여 유효 SJR을 높여 신뢰성을 확보할 수 있다.

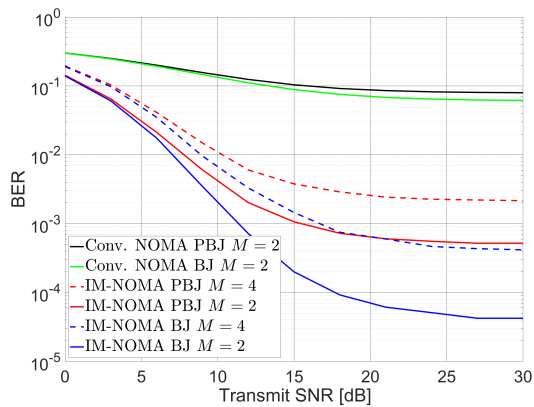


그림 2. 송신 전력 대 잡음비 대비 비트 오류율 성능
Fig. 2. BER performance according to transmit SNR

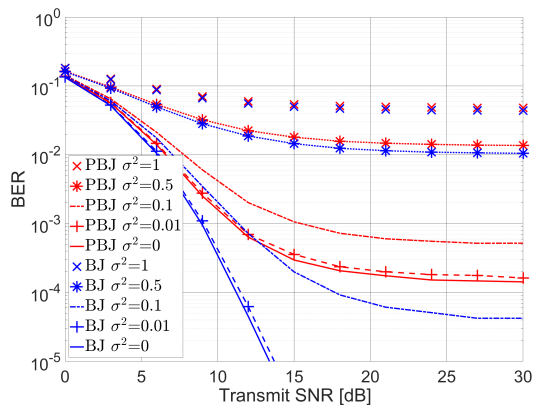


그림 3. 채널 추정 오류 분산에 따른 비트 오류율
Fig. 3. BER performance according to channel estimation error variance

References

- [1] H. Pirayesh and H. Zeng, "Jamming attacks and anti-jamming strategies in wireless networks: A comprehensive survey," *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 24, no. 2, pp. 767-809, 2nd Quart., 2022. (<https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.00292>)
- [2] Y. Sun, K. An, J. Luo, Y. Zhu, G. Zheng, and S. Chatzinotas, "Outage constrained robust beamforming optimization for multiuser IRS-Assisted anti-jamming communications with incomplete information," *IEEE Internet of Things J.*, Jun. 2022. (<https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3140752>)
- [3] J. Kim, Y. Cho, K. Shin, M. Bae, J.-Y. Kim, J. Lee, and J. Kim, "A study on fast

- frequency hopping communication for anti-jamming in TDL system,” *J. KICS*, vol. 43, no. 1, pp. 175-180, Jan. 2018. (<https://doi.org/10.7840/kics.2018.43.1.175>)
- [4] T. Mao, Q. Wang, Z. Wang, and S. Chen, “Novel index modulation techniques: A survey,” *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 21, no. 1, pp. 315-348, 1st Quart., 2019. (<https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2858567>)
- [5] A. Kaplan, et al., “OFDM-IM performance evaluation under jamming attack,” in *Proc. ITNAC*, Nov. 2020. (<https://doi.org/10.1109/ITNAC50341.2020.9315104>)
- [6] Y. Liu, et al., “Evolution of NOMA toward next generation multiple access (NGMA) for 6G,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 40, no. 4, pp. 1037-1071, Apr. 2022. (<https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3145234>)
- [7] X. Jiang and C. Zhang, “Secure transmission aided by orbital angular momentum jamming with imperfect CSI,” in *Proc. IEEE ICC*, May 2019. (<https://doi.org/10.1109/ICC.2019.8761801>)