

가우시안 재밍 환경에서 인덱스 변조기반 상향링크 비직교 다중접속

배유경, 염정선, 정방철
충남대학교 전자공학과

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

1. 서론

무선 통신 네트워크에서 간섭은 통신 성능을 저하시키는 주요 요소이다. 이러한 간섭을 의도적으로 발생시켜 목표하는 무선 시스템을 방해하는 기술인 재밍(jamming)은 큰 문제로 대두되고 있다. 한편, 인덱스 변조(index modulation: IM) 기법은 부반송파의 활성 유무를 통해 비트 정보의 일부를 직교 주파수 자원에 임베딩하여 주파수 자원을 활성 상태로 변조하는 기법으로 [1], IM 기법의 희소 특성은 재밍 환경에 강한 통신을 가능하게 한다 [2]. 이와 같은 IM 기법의 특성을 기반으로 본 논문에서는 비직교 다중 접속(non-orthogonal multiple access: NOMA) 기술과 IM 기법을 결합한 IM-NOMA 기법이 기존 NOMA 기술보다 상향링크 시스템에서 다양한 가우시안 재밍 환경에 강인함을 보인다.

2. 가우시안 재밍 환경에서 상향링크 IM-NOMA

본 논문에서 단일 안테나를 갖는 두 개의 단말이 N 개의 안테나를 갖는 기지국으로 신호를 전송하며 이와 동시에 기지국에 가우시안 재밍 신호가 수신되는 시스템을 고려한다. 두 단말들은 직교하는 S 개의 부반송파 중 사전 정의에 따라 K 개의 활성 부반송파에 이진 위상천이변조(binary phase shift keying: BPSK) 변조 신호를 임베딩하여 동시에 전송하는 상향링크 IM-NOMA 시스템을 고려한다. 본 연구에서는 $S = 4$ 그리고 $K = 2$ 로 고려한다. 그러므로 각 단말에서 전송하는 비트 수는 부반송파 인덱스에 임베딩되는 비트의 수인 $\left\lceil \log_2 \binom{S}{K} \right\rceil = 2$ 와 $K = 2$ 개의 BPSK 신호에 의해 전송되는 비트의 수인 K 의 합이며, 본 논문에서는 부반송파의 인덱스를 결정하는 입력 비트에 따라 아래와 같은 사전 정의된 매핑을 통해 활성 부반송파를 선택한다.

표 1, IM 기법의 인덱스 매핑 (S = 4, K = 2)

입력 비트	활성 부반송파	송신 신호 벡터 \mathbf{x}_l
[0 0]	{1,3}	$[x_l(1) \ 0 \ x_l(3) \ 0]^T \otimes \mathbf{1}_N$
[0 1]	{1,4}	$[x_l(1) \ 0 \ 0 \ x_l(4)]^T \otimes \mathbf{1}_N$
[1 0]	{2,3}	$[0 \ x_l(2) \ x_l(3) \ 0]^T \otimes \mathbf{1}_N$
[1 1]	{2,4}	$[0 \ x_l(2) \ 0 \ x_l(4)]^T \otimes \mathbf{1}_N$

따라서 기지국에서 수신한 신호 벡터 $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{2N \times 1}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{y} = \sum_{l=1}^2 \sqrt{P d_l^{-\alpha}} \text{diag}(\mathbf{h}_l) \mathbf{x}_l + \mathbf{J} + \mathbf{w}, \quad (1)$$

여기서 P 는 송신전력, d_l 는 l ($l \in \{1,2\}$) 번째 단말과 기지국의 거리, α 는 경로 감쇄 지수를 나타낸다. 무선 채널 벡터는 l 번째 단말에서 기지국까지 $\mathbf{h}_l = [\mathbf{h}_l(1)^T \ \mathbf{h}_l(2)^T \ \mathbf{h}_l(3)^T \ \mathbf{h}_l(4)^T]^T \in \mathbb{C}^{4N \times 1}$ 으로 주어지며 $\mathbf{h}_l(n) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ ($\forall n$)는 모든 요소가 독립이고 $\mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_N)$ 의 분포를 따른다고 가정한다. 여기서 $\cdot(n)$ 표기법은 n 번째 부반송파에 대한 것을, $\text{diag}(\cdot)$ 은 대각 행렬을 나타낸다. 신호 벡터 $\mathbf{x}_l = [x_l(1) \ x_l(2) \ x_l(3) \ x_l(4)]^T \otimes \mathbf{1}_N \in \mathbb{C}^{4N \times 1}$ 은 l 번째 단말의 송신 신호 벡터로, 활성화된 부반송파에는 BPSK 변조 심볼이, 비활성화 부반송파에는 0의 신호가 임베딩된다. 여기서 \otimes 는 크로네커 곱이며, $\mathbf{1}_N$ 은 모든 원소가 1인 크기 N 의 열 (column) 벡터이다. 재밍 신호 벡터 $\mathbf{J} \in \mathbb{C}^{4N \times 1}$ 는 $[J(1)J(2)J(3)J(4)]^T \otimes \mathbf{1}_N \in \mathbb{C}^{4N \times 1}$ 으로 기본적으로

$J(n) \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, P_j/M)$ 의 분포를 따른다고 가정하므로 총 재밍전력은 P_j 이다. 본 논문에서 재머는 단말이 사용하는 부반송파의 대역을 알고있다고 가정하며, 일정 재밍 전력을 모든 부반송파에 고르게 인가하는 $M = S$ 인 전대역 재밍(barrage jamming: BJ) 모델과 재밍 전력을 하나의 부반송파에만 인가하는 $M = 1$ 인 부분대역 재밍(partial band jamming: PBJ) 모델을 고려한다. 가산 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise) $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{4N \times 1}$ 은 $\mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_{4N} \times N_0)$ 의 분포를 따른다고 가정한다.

기지국은 각 단말이 보낸 파일럿 신호를 통해 모든 채널 정보를 획득했다고 가정하며, 수신 신호로부터 아래와 같은 협력 최대 우도 검파 기법을 통해 두 단말이 전송한 송신 신호와 활성화된 부반송파 인덱스를 동시에 검파한다.

$$\{\hat{x}_l, \hat{k}_l\}_{l=1}^2 = \arg \min_{(s_l, k_l) \in \mathbb{D}} \|\mathbf{y} - \sum_{l=1}^2 \sqrt{P d_l^{-\alpha}} \text{diag}(\mathbf{h}_l) \mathbf{s}_l\|^2, \quad (2)$$

여기서 \mathbb{D} 는 s_l 과 k_l 로 구성된 s_l 의 후보 집합이다.

3. 모의실험 결과 및 결론

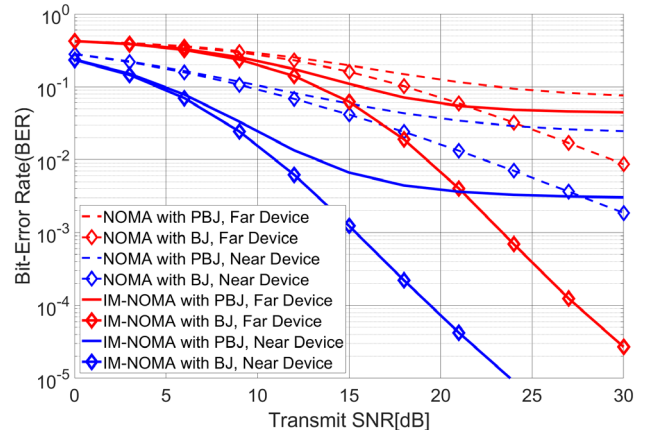


그림 1. 가우시안 재밍 환경에서 상향링크 IM-NOMA 기법과 NOMA 기법간의 BER 성능 비교

그림 1은 가우시안 재밍 환경에서 $S = 4$ 개의 직교 부반송파 중 $K = 2$ 개의 활성 부반송파를 이용하여 송신할 때 IM-NOMA의 BER 성능을 보여준다. 단말의 전송 전력과 기지국까지의 정규화된 거리는 각각 $P = 1$ 과 $2d_1 = d_2 = 2$ 이며, PBJ와 BJ 환경에서 신호 대 재밍비는 10 dB로 가정한다. 시뮬레이션 결과로부터 송신 신호 대 잡음비가 증가할수록 인덱스 변조 기법을 적용한 IM-NOMA 기법이 NOMA 시스템보다 PBJ와 BJ 환경에서 모두 우수한 성능을 확인할 수 있다.

4. ACKNOWLEDGEMENT

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

5. 참고 문헌

- [1] 배유경, 염정선, 정방철, "인덱스 변조기반 상향링크 비직교 다중접속 시스템의 BER 성능분석," 한국통신학회 하계종합학술발표회, Jun. 2021.
- [2] A. Kaplan et al., "OFDM-IM Performance Evaluation Under Jamming Attack," *Int. Telecom. Netw. Appl. Conf. (ITNAC)*, Nov. 2020.