

다중안테나 상향링크 비직교 다중접속 시스템용 인덱스 변조기법의 성능분석

배우경, 염정선, 정방철
충남대학교

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

Performance Analysis for Index Modulation for Multi-Antenna Uplink NOMA Systems

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

요약

본 논문은 페이딩 채널에서 단일 안테나를 가진 두 단말과 N 개의 안테나를 가진 기지국 사이 상향링크 비직교 다중 접속 (Index Modulation Non-Orthogonal Multiple Access: IM-NOMA)의 비트 오류율 (bit error rate: BER) 성능을 수학적으로 분석한다. 각 단말에서는 두 개의 직교 부반송파를 이용하여 입력으로의 두 비트 정보를 각각 binary phase shift keying (BPSK) 변조와 활성화할 부반송파 인덱스를 선택하여 변조 맵핑한다. 본 논문에서는 각 단말에서의 송신 신호를 기지국에서 수신하여 결합 최대 우도 검파 기법을 사용하였을 때의 최적 BER 성능을 union bound의 상한을 달린 형태의 수식으로 유도한다. 시뮬레이션 결과를 통해 본 논문에서 수학적으로 유도한 평균 BER 수식의 정확함을 확인할 수 있다.

1. 서론

6세대 이동통신과 더불어 차세대 통신시스템은 주파수 및 에너지 효율성을 향상시키는 것을 목표로 하고 있다. 비직교 다중 접속(NOMA)은 여러 단말의 신호를 동일한 시간 및 주파수 자원 블록에 중첩시켜 통신하는 다중 접속 기술로써 가용 자원의 효율성을 향상시킬 수 있다 [1]. 최근 제안된 인덱스 변조 비직교 다중접속(IM-NOMA)은 비트 정보의 일부를 직교 주파수 자원에 임베딩하여 활성 상태로 변조하는 기술로서, 에너지 효율성과 통신 성능을 향상시키는 기술이다[2]. 본 논문은 상향링크 IM-NOMA를 단일 안테나 시스템에서 비트 오류율(bit-error rate: BER)의 수학 분석 연구[3]를 확장하여 N 개의 수신안테나가 존재하는 경우의 BER 성능을 수학적으로 분석한다.

II. 다중 안테나 상향링크 IM-NOMA 시스템 모델 및 BER 성능 분석

본 논문에서는 단일 안테나를 갖는 두 개의 단말이 N 개의 안테나를 갖는 기지국에 사용 가능한 두 개의 동일 직교 부반송파를 이용하여 동시에 신호를 전송하는 상향링크 인덱스 변조기법 비직교 다중 접속 시스템을 고려한다. 각 단말은 두 비트 중 하나의 비트 정보는 사전정의에 따라 활성 부반송파를 결정하고 다른 한 비트는 BPSK (binary phase shift keying) 변조하여 활성화된 부반송파를 이용하여 전송한다. 따라서 기지국에서 수신한 신호 벡터 $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{2N \times 1}$ 는 다음과 같다.

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

여기서 P 는 송신 전력, d_l 는 l 번째 단말과 기지국 사이의 거리를 나타내며, α 는 경로 감쇄 지수를 나타낸다. 단말 l 과 기지국 사이 형성되는 무선 페이딩 채널 행렬은 $\mathbf{H}_l = [[\mathbf{h}_l^T(1) \mathbf{0}_N^T]^T, [\mathbf{0}_N^T \mathbf{h}_l^T(2)]^T]^T$ 로 표현되며 본 논문의 $\cdot (n)$ 표기법은 n 번째 부반송파에 대한 것을 의미한다. $\mathbf{0}_N$ 은 모든 요소가 0 인 벡터를 의미한다. 무선 채널 벡터 $\mathbf{h}_l(n) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 모든 요소가 독립이며 $\mathcal{CN}(0, \mathbf{I}_N)$ 의 동일한 분포를 따른다고 가정한다. 기지국은 각 단말이 전송하는 파일럿 신호를 통해 모든 채널 정보를 획득하였다고 가정한다. $\mathbf{x}_l = [x_l(1), x_l(2)]^T$ 는 l 번째 단말의 신호 벡터로써, 첫 번째 부반송파가 활성화되는 경우, $x_l(1)$ 에는 BPSK를 $x_l(2)$ 에는 0을 전송하며 두 번째 부반송파가 활성화되는 경우는 반대로 적용한다. 가우시안 잡음 $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{2N \times 1}$ 는 $\mathcal{CN}(0, N_0 \times \mathbf{I}_{2N})$ 의 분포를 따른다고 가정한다.

기지국은 수신 신호로부터 아래와 같이 협력 최대 우도 검파 기법을 통해 각 단말이 사용한 부반송파 인덱스와 신호를 복호한다.

$$(\hat{\mathbf{x}}_1, \hat{\mathbf{x}}_2) = \arg \min_{(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2) \in \mathcal{X}_1 \times \mathcal{X}_2} \left\| \mathbf{y} - \sum_{l=1}^2 \sqrt{P d_l^{-\alpha}} \mathbf{H}_l \mathbf{s}_l \right\|^2, \quad (2)$$

여기서 $\hat{\mathbf{x}}_l$ 는 기지국에서 검파한 l 번째 단말의 송신 신호 벡터를 나타내며, \mathbf{x}_l 의 후보 집합 $\mathcal{X}_l := \{[-j', 0]^T, [j', 0]^T, [0, -j']^T, [0, j']^T\}$ 이다.

본 논문에서는 상향링크 IM-NOMA의 BER 성능 분석을 위해 union upper bound 분석 기법을 활용한다. 평균 비트 오류 확률 P_b 은 각각 $|\chi|^2/2 = 8$ 개의 심볼 비트 오류 사건(ϵ_{sym})과 8개의 부반송파 비트 오류 사건(ϵ_{sub})을 개별적으로 고려하여 다음과 같이 표현된다.

$$P_b = \frac{1}{2} \Pr\{\epsilon_{\text{sym}}\} + \frac{1}{2} \Pr\{\epsilon_{\text{sub}}\} = \frac{1}{2} P_{b, \text{sym}} + \frac{1}{2} P_{b, \text{sub}}$$

$$\leq \frac{1}{2} \sum_{i=1}^8 \int_0^\infty Q\left(\sqrt{\frac{x}{2N_0}}\right) f_{\delta_{\text{sym},i}}(x) dx + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^8 \int_0^\infty Q\left(\sqrt{\frac{y}{2N_0}}\right) f_{\delta_{\text{sub},j}}(y) dy, \quad (3)$$

여기서, $\delta_{\text{sym},i}$ 과 $\delta_{\text{sub},j}$ 는 각각 i 번째 심볼 비트 오류와 j 번째 부반송파 비트 오류를 발생시키는 성상도 상에서의 유클리디안 거리를 의미하며 $f_z(z)$ 는 랜덤 변수 z 의 확률 밀도 함수이다. 일반성을 잃지 않고 첫 번째 부반송파의 성능

분석만 고려하여 수식 (3)의 각 항인 심볼 (sym) 및 부반송파 (sub) 비트 정보에 대한 BER은 아래 수식 (4)와 같다.

$$P_{b,e} = \begin{cases} \sum_{e=1}^8 \frac{1}{2} \left[1 - \sum_{u=0}^{2N-1} \binom{2u}{u} \sqrt{\frac{1}{1+2\lambda_{e,1}}} \left(\frac{2}{\lambda_{e,1}} + 4\right)^{-u} \right], & \text{if } \lambda_{e,1} = \lambda_{e,2} \\ \sum_{e=1}^8 \frac{1}{2} \left[1 - \sum_{u=0}^{N-1} \binom{2u}{u} \sqrt{\frac{1}{1+2\lambda_{e,1}}} \left(\frac{2}{\lambda_{e,1}} + 4\right)^{-u} \right], & \text{if } \lambda_{e,2} = \infty \\ \sum_{e=1}^8 \frac{1}{2} \left[1 - \sum_{u=0}^{N-1} \binom{2u}{u} \sqrt{\frac{1}{1+2\lambda_{e,2}}} \left(\frac{2}{\lambda_{e,2}} + 4\right)^{-u} \right], & \text{if } \lambda_{e,1} = \infty \\ \sum_{e=1}^8 \sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^N \frac{A_{l,k}}{2} \left[1 - \sum_{u=0}^{k-1} \binom{2u}{u} \sqrt{\frac{1}{1+2\lambda_{e,l}}} \left(\frac{2}{\lambda_{e,l}} + 4\right)^{-u} \right], & \text{if } \lambda_{e,1} \neq \lambda_{e,2} \end{cases} \quad (4)$$

$$A_{l,k} = \begin{cases} \prod_{p=1, p \neq l}^2 \left(1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_l}\right)^{-N}, & \text{for } k = N \\ \frac{1}{N-k} \sum_{q=1}^{N-k} \left\{ A_{l,k+q} \sum_{p=1, p \neq l}^2 N \left(1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_l}\right)^{-q} \right\}, & \text{for } 1 \leq k < N \end{cases}$$

여기서 $\lambda_{e,n}$ ($e \in \{1, 2\}, n \in \{1, 2\}$)은 e 번째 오류 경우의 해당 비트 정보에 대한 유클리디안 거리 변수를 이루는 n 번째 부반송파와 관련한 지수 분포의 평균이다.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

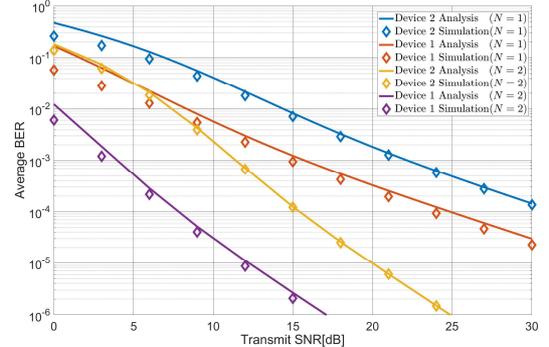


그림 1. 상향링크 인덱스 변조 비직교 다중접속 시스템 평균 BER 성능

그림 1은 페이딩 채널에서 단일 안테나를 가진 두 단말이 두 개의 직교 부반송파를 이용하여 송신할 때 $N=1, 2$ 인 상향링크 IM-NOMA의 평균 BER 성능을 송신 신호대 잡음비로 대비하여 보여준다. 모든 단말의 송신 전력 및 기지국까지의 정규화된 거리는 각각 $P=1$ 과 $d_1 = 2d_2 = 1$ 로 가정한다. 분석 결과는 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 매우 유사하며 안테나 수의 증가는 안테나 다이버시티로 인한 성능 향상을 보인다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2021R1A4A1032580).

참고 문헌

- [1] J. S. Yeom, H. S. Jang, K. S. Ko, and B. C. Jung, "BER Performance of Uplink NOMA With Joint Maximum-Likelihood Detector," *Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, No. 10, pp. 10295-10300, Oct. 2019.
- [2] A. Almohamad, et al., "A Novel Downlink IM-NOMA Scheme," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 2, pp. 235-244, Jan. 2021.
- [3] 배우경, 염정선, 정방철, "인덱스 변조기법 상향링크 비직교 다중접속 시스템의 BER 성능분석," *한국통신학회 하계종합학술발표회*, Jun. 2021.