

6G 무선통신 시스템용 인덱스 변조기법 기반 상향링크 비직교 다중접속의 성능분석

배유경, 염정선, 정방철
충남대학교 전자공학과

e-mail : ykb1103@o.cnu.ac.kr, jsyeom@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Performance Analysis of Uplink NOMA based on Index Modulation for 6G Wireless Communication Systems

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

Department of Electronics Engineering, Chungnam National University

Abstract

In this paper, we mathematically analyze the bit-error rate (BER) performance of uplink index-modulation non-orthogonal multiple access (IM-NOMA) between two devices using quadrature phase shift keying in fading channel. When a base station (BS) receives the signals of both devices simultaneously, we derive the closed-formed BER of the joint maximum-likelihood detection by using the union upper bound technique. As a results, the derived expression of average BER is matched well with computer simulation in high SNR regime.

I. 서론

차세대 통신시스템과 더불어 다가오는 6세대 이동통신을 위해 핵심 성과 지표(key performance indicator)가 구체화 되는 가운데, 빠르게 증가하는 단말들을 수용하기 위한 높은 연결밀도와 주파수 효율성, 그리고 저전력 통신을 위해 에너지 효율성과 관련한 기술이 활발히 연구되고 있다[1].

비직교 다중 접속(NOMA)은 여러 단말의 신호를 동일한 시간 및 주파수 자원 블록에 중첩하여 통신하는 다중 접속 기술이다. 그러므로 NOMA는 가용 자원의 효율성을 향상시킬 수 있으며, 다양한 통신 시스템에 접목하여 통신 성능을 분석하였다[2].

최근 제안된 인덱스 변조(index modulation: IM) 기반 NOMA 기법은 비트 정보의 일부를 직교 주파수 자원에 임베딩하여 주파수 자원을 활성 상태로 변조하는 기술로서, 에너지 효율성과 통신 성능을 향상시킬 수 있다[3]. 따라서 본 논문은 상향링크 IM-NOMA의 비트 오류율(bit-error rate: BER)에 대한 수학적 분석 연구[4]를 확장하여 QPSK (quadrature phase shift keying) 변조의 BER 성능을 수학적으로 분석한다.

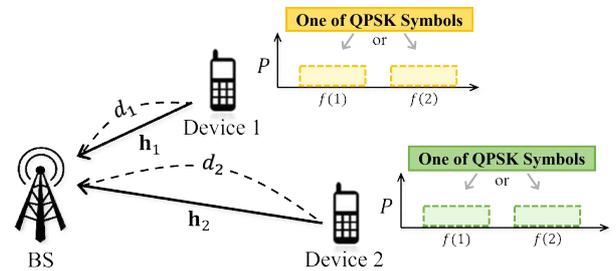


그림 1. 상향링크 IM-NOMA 시스템모델

II. 상향링크 IM-NOMA 시스템

본 논문에서는 각각 단일 안테나를 갖는 두 개의 단말이 사용 가능한 두 개의 동일 직교 부반송파를 이용하여 단일 안테나를 갖는 기지국에 동시에 신호를 전송하는 상향링크 시스템을 고려한다. 각 단말은 각 데이터 블록 안에 비트스트림 b 을 전송한다. 비트스트림 $b = b^{ind} + b^{sym}$ 은 신호 송신에 사용된 부반송파 인덱스를 판단하기 위한 비트 수 $b^{ind} = \lfloor \log_2(n) \rfloor$ 와 전송된 신호를 판단하기 위한 비트 수 $b^{sym} = k \log_2(M)$ 의 합으로 정의된다. 각각은 사용 가능한 부반송파의 개수 n 와 활성 부반송파 수 k , 그리고 M -진 변조에 따라 결정된다. 본 시스템에서는 두 개의 사용 가능한 부반송파와 하나의 활성 부반송파, QPSK 변조하여 신호를 송신한다.

각 단말은 세 개의 비트 중 두 개의 비트 정보를 QPSK 변조를 통해 전송하고, 나머지 하나의 비트에 의해 사전 정의에 따라 활성화할 부반송파 인덱스를 선택하는 인덱스 변조 기법을 사용한다. 기지국이 수신한 신호 벡터 $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{2 \times 1}$ 는 다음과 같다.

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

여기서 P 는 송신 전력, d_l 은 l ($l \in 1, 2$) 번째 단말과 기지국 사이에 거리를 나타내며, α 는 경로 감쇄 지수를 나타낸다.

단말 l 과 기지국 사이의 무선 페이딩 채널 벡터는 $\mathbf{h}_l = [h_l(1) h_l(2)]^T$ 로 표현되고, 본 논문에서 (m) 표기법은 m 번째 부반송파에 대한 것을 의미한다. 모든 무선 채널의 분포는 서로 독립이며 $\mathcal{CN}(0,1)$ 의 동일한 분포를 따른다고 가정하며 $\text{diag}(\cdot)$ 은 대각 행렬을 의미한다. 기지국은 각 단말이 전송하는 파일럿 신호를 통해 모든 채널 정보를 획득하였다고 가정한다. 또한, $\mathbf{x}_l = [x_l(1) x_l(2)]^T$ 은 l 번째 단말의 송신 신호 벡터로써, 첫 번째 부반송파가 활성화되는 경우, $x_l(1)$ 에는 QPSK 변조 신호를, $x_l(2)$ 에는 0의 신호를 임베딩하여 전송하며, 두 번째 부반송파가 활성화되는 경우에는 반대로 적용한다. $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{2 \times 1}$ 는 열잡음을 의미하며 $\mathcal{CN}(0, N_0)$ 의 분포를 따른다고 가정한다.

기지국은 수신 신호로부터 아래와 같은 협력 최대 우도 검파 기법을 통해 두 단말의 전송한 송신 신호 벡터와 활성화된 부반송파의 인덱스를 동시에 검파한다.

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

여기서, $\hat{\mathbf{x}}_l$ 는 기지국에서 검파한 l 번째 단말의 송신 신호 벡터이며, \mathcal{X}_l 은 QPSK 신호에 대한 송신 신호 벡터의 후보 집합을 의미한다.

III. 상향링크 IM-NOMA의 통신 성능 분석

본 논문에서는 상향링크 IM-NOMA의 QPSK 변조 통신 성능을 분석하기 위해 union upper bound 분석 기법을 활용한다. 평균 비트 오류 확률 P_b 은 각각 $|\chi|^2/2 = 32$ 개의 심볼 비트 오류 사건 $P_{b, \text{sym}}$ 과 32개의 부반송파 비트 오류 사건 $P_{b, \text{sub}}$ 을 개별적으로 고려하여 수식 (3)과 같이 표현된다. 여기서 집합에 대한 $|\cdot|$ 연산은 집합의 크기(cardinality)를 의미한다.

$$P_b = \frac{2}{3} P_{b, \text{sym}} + \frac{1}{3} P_{b, \text{sub}} \quad (3)$$

$$\leq \frac{2}{3} \sum_{i=1}^{32} \int_0^\infty Q\left(\sqrt{\frac{x}{2N_0}}\right) f_{\delta_{\text{sym},i}}^2(x) dx + \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{32} \int_0^\infty Q\left(\sqrt{\frac{y}{2N_0}}\right) f_{\delta_{\text{sub},j}}^2(y) dy,$$

심볼 비트 오류 사건과 부반송파 비트 오류 사건이 2/3, 1/3의 확률로 발생하기 때문에 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, $\delta_{\text{sym},i}$ 과 $\delta_{\text{sub},j}$ 는 각각 i 번째 심볼 비트 오류와 j 번째 부반송파 비트 오류를 발생시키는 정상도 상에서의 유클리디안 거리를 의미한다. 또한, $f_Z(z)$ 는 랜덤 변수 Z 의 확률 밀도 함수이다.

일반성을 잃지 않고 첫 번째 부반송파의 성능 분석만을 고려하여 수식 (3)의 각 항인 심볼(sym) 및 부반송파(sub) 비트 정보에 대한 BER은 아래 수식 (4)과 같다.

$$P_{b,e} = \begin{cases} \sum_{e=1}^{32} \frac{1}{2} \left[1 - \sum_{u=0}^1 \binom{2u}{u} \sqrt{\frac{1}{1+2\lambda_{e,1}}} \left(\frac{2}{\lambda_{e,1}} + 4 \right)^{-u} \right], & \text{if } \lambda_{e,1} = \lambda_{e,2} \\ \sum_{e=1}^{32} \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{\frac{1}{1+2\lambda_{e,1}}} \right], & \text{if } \lambda_{e,2} = \infty \\ \sum_{e=1}^{32} \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{\frac{1}{1+2\lambda_{e,2}}} \right], & \text{if } \lambda_{e,1} = \infty \\ \sum_{e=1}^{32} \sum_{l=1}^2 \prod_{p=1, p \neq l}^2 \frac{\lambda_{e,p}}{\lambda_{e,p} - \lambda_{e,l}} \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{\frac{1}{1+2\lambda_{e,l}}} \right], & \text{if } \lambda_{e,1} \neq \lambda_{e,2} \end{cases} \quad (4)$$

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

IV. 시뮬레이션 결과 분석 및 결론

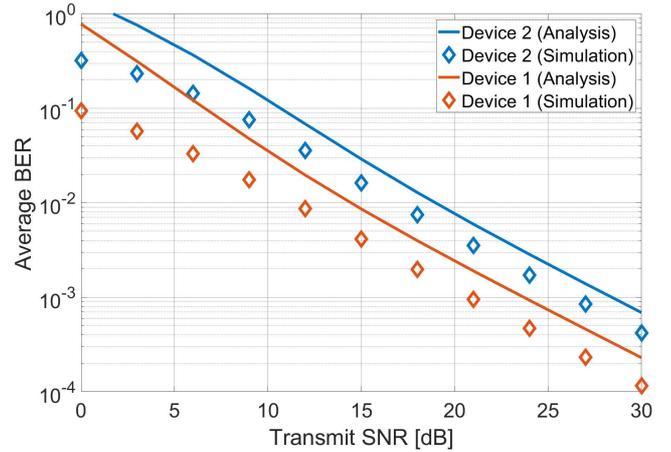


그림 2. 상향링크 IM-NOMA의 평균 BER 성능

그림 2는 페이딩 채널에서 두 개의 단말이 각각 두 개의 부반송파를 이용하여 QPSK 변조된 신호를 동시에 송신하고 단일 안테나를 갖는 기지국이 이를 수신하는 무선 통신 환경에서의 인덱스 변조 기반 비직교 다중접속의 평균 BER 성능을 보여준다. 모든 단말의 송신 전력 및 각 단말로부터 기지국까지의 정규화된 거리는 각각 $P=1$ 과 $2d_1 = d_2 = 1$ 로 가정하며 경로 감쇄 지수는 $\alpha=3$ 으로 가정한다. 분석 결과, 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 수학적으로 분석한 upper bound 결과 사이 평균 BER의 차이가 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio)가 증가함에 따라 점차 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

Acknowledgement

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (2020-0-00144-001, 제조 현장의 무선 연결 성 한계 극복을 위한 산업용 비면허대역 무선 IoT 네트워크 핵심기술 개발)

참고문헌

- [1] X. You et al., "Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts," *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 64, no. 1, pp. 1-74, Jan. 2021.
- [2] J. S. Yeom, H. S. Jang, K. S. Ko, and B. C. Jung, "BER Performance of Uplink NOMA With Joint Maximum-Likelihood Detector," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 68, No. 10, pp. 10295-10300, Oct. 2019.
- [3] M. B. Shahab et al., "Index modulation aided uplink NOMA for massive machine type communications," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 9, no. 12, pp. 2159-2162, Dec. 2020.
- [4] 배유경, 염정선, 정방철, "인덱스 변조기반 상향링크 비직교 다중접속 시스템의 BER 성능분석," *한국통신학회 하계종합학술 발표회*, Jun. 2021.