

인덱스 변조기반 상향링크 비직교 다중접속 시스템의 BER 성능분석

배유경, 염정선, 정방철
충남대학교

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

BER Performance of Uplink Non-orthogonal Multiple Access with Index Modulation

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

요약

본 논문은 페이딩 채널에서 두 단말에 대한 상향링크에서의 인덱스 변조 비직교 다중접속 (Index Modulation Non-Orthogonal Multiple Access: IM-NOMA)의 비트 오류율 (Bit-Error Rate: BER) 성능을 수학적으로 분석한다. 구체적으로 두 개의 직교 부반송파를 사용할 수 있는 두 단말은 입력된 두 비트 정보를 각각 binary phase shift keying (BPSK) 변조와 전송에 사용할 부반송파 선택을 하는 인덱스 변조에 맵핑한다. 두 단말은 단일 안테나 기지국에 동시에 신호를 전송하며 기지국은 수신 신호를 결합 최대 우도 (Joint Maximum Likelihood: JML) 검파 기법을 사용한다. 본 논문에서는 이에 대한 BER 성능을 upper union bound 기법을 통해 수학적으로 분석하며 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 비교하여 유도된 BER 수식의 정확함을 보인다.

1. 서론

사물인터넷(IoT)의 급증으로 인해 2030년에는 전 세계적으로 약 1,250억 개 이상의 IoT 단말이 활용될 전망이므로 향상된 주파수 효율성을 제공하는 통신 기술이 필요하다. 또한, 많은 수의 IoT 단말이 배터리로 동작하여 에너지 효율성을 위한 통신기술 역시 필요하다. 비직교 다중접속(NOMA) 기술은 여러 단말이 동일 직교 자원을 통해 동시에 통신함으로써 주파수 효율을 향상시키는 기술로, 많은 연구에서 NOMA의 통신 성능을 분석하였다[1]. 최근 제안된 인덱스 변조 비직교 다중접속(IM-NOMA)은 정보 일부가 전송 신호에 임베딩되어 비트 정보를 일부 자원의 활성 상태로 변조하는 기술로서, 다중 직교 부반송파를 이용한 IM-NOMA를 통해 에너지 효율성이 향상되었다[2].

하지만 현재까지 IM-NOMA의 성능 분석이 제공되지 않았으므로 본 논문에서 최초로 페이딩 채널 환경에서의 비트 오류율(BER)을 수학적으로 분석한다.

II. 시스템 모델 및 BER 성능 분석

본 논문에서는 단일 안테나를 갖는 두 개의 단말이 사용 가능한 두 개의 동일 직교 부반송파를 이용하여 단일 안테나를 갖는 기지국에게 동시에 신호를 전송하는 시스템을 고려한다. 각 단말은 두 개의 비트 정보 중 하나의 비트 정보를 BPSK 변조를 통해 전송하고 다른 하나의 비트 정보는 사전 정의에 의해 두 개의 부반송파 중 활성화할 하나의 부반송파를 선택하기 위해 IM-NOMA를 사용한다. 기지국이 수신 신호하는 신호 벡터 $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{2 \times 1}$ 는 다음과 같다.

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

여기서 P_l ($l \in \{1, 2\}$)과 d_l 은 각각 l 번째 단말의 송신 전력 및 l 번째 단말과 기지국까지의 거리를 나타내며, α 는 경로 감쇄 지수를 나타낸다. 단말 l 로부터 기지국까지의 무선 페이딩 채널 벡터는 $\mathbf{h}_l = [h_l(1), h_l(2)]^T$ 로 표현되며 본 논문에서 (n)의 표기법은 n 번째 부반송파에 대한 것을 의미한다. 모든 무선 채널의 분포는 서로 독립이고 $\mathcal{CN}(0, 1)$ 의 동일한 분포를 따른다고 가정한다. 본 논문에서는 단말에서 파일럿 신호를 전송함으로써 기지국이 모든 채널 정보를 획득하였다고 가정한다. 그리고 $\mathbf{x}_l = [x_l(1), x_l(2)]^T$ 은 l 번째 단말의 신호 벡터로써 비활성화되는 부반송파에 따라 신호 벡터의 하나의 요소는 0의 신호가 전송된다. 즉, $\mathbf{x}_l$ 의 후보 집합은 $\chi_l := \{[-1j^l, 0]^T, [1j^l, 0]^T, [0, -1j^l]^T, [0, 1j^l]^T\}$ 이다. 가우시안 잡음 벡터 $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{2 \times 1}$ 는 $\mathcal{CN}(0, N_0 \cdot \mathbf{I}_2)$ 의 분포를 따른다.

기지국은 수신 신호로부터 협력 최대 우도 검파 기법을 통해 다음과 같이 두 단말이 전송한 신호 벡터와 전송에 활성화된 부반송파의 인덱스를 검파한다.

$$(\hat{\mathbf{x}}_1, \hat{\mathbf{x}}_2) = \arg \min_{(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2) \in \chi_1 \times \chi_2} \left\| \mathbf{y} - \sum_{l=1}^2 \sqrt{P_l d_l^{-\alpha}} \text{diag}(\mathbf{h}_l) \mathbf{s}_l \right\|^2, \quad (2)$$

여기서 $\hat{\mathbf{x}}_l$ 는 기지국에서 검파한 l 번째 단말의 송신 신호 벡터이다.

본 논문에서는 IM-NOMA의 BER 성능 분석을 위해서 union upper bound 분석 기법을 사용한다. 비트 오류 사건(ϵ_b)의 평균 확률의 union bound는 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.

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

이때, $\delta_{\text{sym}, i}$ 와 $\delta_{\text{sub}, j}$ 는 각각 i 번째 심볼 비트 오류와 j 번째 부반송파 비트 오류를 발생시키는 상상도 상에서의 유클리디안 거리를 의미한다.

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

$$P_{b, e} = \sum_{i=1}^8 \frac{1}{2} (1 - g(\lambda_{e, i}(1), \lambda_{e, i}(2))), \quad (4)$$

$$g(\alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{1}{\beta - \alpha} \left(\frac{\beta}{\sqrt{1+2\alpha}} - \frac{\alpha}{\sqrt{1+2\beta}} \right), & \text{if } \alpha \neq \beta \\ \sum_{k=0}^1 \binom{2k}{k} \sqrt{1/(1+2\alpha)} (2/\alpha + 4)^{-k}, & \text{if } \alpha = \beta \end{cases}$$

여기서 $\lambda_{e, i}(n)$ ($e \in \{\text{sym}, \text{sub}\}, n \in \{1, 2\}$)은 해당 비트 정보에 대한 i 번째 오류 경우의 유클리디안 거리 변수를 이루는 n 번째 부반송파와 관련한 지수 분포를 따르는 랜덤 변수의 평균이다.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

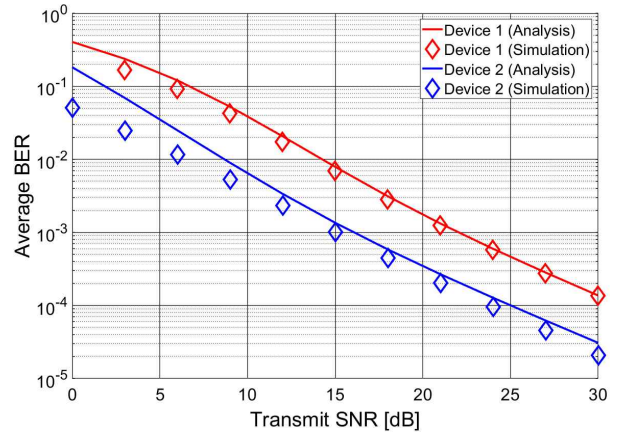


그림 1 인덱스 변조기반 상향링크 비직교 다중접속 시스템의 평균 BER 성능

그림 1은 페이딩 채널에서 두 개의 단말이 각각 두 개의 부반송파를 이용하여 신호를 동시에 송신하고 단일 안테나를 갖는 기지국이 이를 수신하는 무선 통신 환경에서의 인덱스 변조 비직교 다중접속의 BER 성능을 보여준다. 단말의 전송 전력 및 기지국까지의 정규화된 거리는 각각 $2P_1 = P_2 = 1$ 과 $d_1 = 2d_2 = 1$ 로 가정한다. 시뮬레이션 결과로부터 송신 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio, SNR)가 증가할수록 평균 BER 측면에서 본 논문에서 수학적으로 분석한 union upper bound의 결과와 컴퓨터 시뮬레이션 결과 사이의 평균 BER의 차이가 점차 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 미래창조과학부 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2019R1A2B5B01070697).

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," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 10, pp. 10295-10300, Oct. 2019.
- [2] 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.