

채널 부호화된 상향링크 NOMA 시스템의 성능 분석

이영석, 이기훈, 정방철
충남대학교

vslee@o.cnu.ac.kr, kihun.h.lee@cnu.ac.kr, bciung@cnu.ac.kr

Performance Analysis of Channel-Coded Uplink NOMA Systems

Young-Seok Lee, Ki-Hun Lee, Bang Chul Jung

Chungnam National University

요약

본 논문에서는 상향링크 비직교 다중 접속(non-orthogonal multiple access: NOMA) 시스템에 반복 부호(repetition code: RC) 또는 길쌈 부호(convolutional code: CC)를 각각 적용했을 때, 비트 에너지 대 잡음비(Energy per bit to noise density ratio: E_b/N_0) 대비 비트 오류율(bit error rate: BER) 성능을 수학적으로 분석한다. 특히, 모든 송신 단말은 동일한 무선 자원 블록(resource blocks: RB)을 공유하여 패킷을 송신하며 액세스 포인트는 zero-forcing (ZF) 수신기를 통해 각 단말의 신호를 검출한다. 모의실험 결과 RC에 대해서는 정확한 BER 분석 결과를 보이며, CC에 대해서는 상측 한계를 잘 나타내는 것으로 확인했다.

I. 서론

차세대 통신시스템은 5세대(fifth-generation: 5G) 이동통신 시스템의 주요 서비스로 정의되는 대규모 사물통신(massive machine type communications: mMTC) 및 초고신뢰·저지연 통신(ultra-reliable and low-latency communications: URLLC) 각각의 요구 성능 뿐만 아니라 두 서비스의 요구 성능을 동시 달성할 수 있는 기술이 필요할 것으로 전망된다 [1]. 특히, mMTC 서비스의 성능 지표 달성을 위한 기술 중 하나로 다수의 단말이 같은 무선 자원을 공유하여 통신하는 비직교 다중 접속(NOMA) 기술이 활발히 연구되고 있으며 [2], 신뢰성을 향상할 수 있는 전통적인 기법 중 하나로는 채널 부호화(channel coding)가 있다. 한편, 채널 부호화는 실제로 활용되고 있으나, 많은 문헌에서 이를 고려한 NOMA 시스템의 수학적 성능 분석은 지금까지 수행되지 않은 것으로 사료된다. 이에 따라, 본 논문에서는 채널 부호화를 고려한 상향링크 NOMA 시스템의 비트 에너지 대 잡음비(energy per bit to noise density ratio: E_b/N_0) 대비 비트 오류율(bit error rate: BER) 성능을 수학적으로 분석한다.

II. 채널 부호화된 상향링크 NOMA 시스템 모델 및 성능 분석

본 논문에서는 각각 단일 안테나를 갖는 M 개의 단말(station: STA)이 J 개의 다중 안테나를 갖는 액세스 포인트(access point: AP)로 패킷을 송신하는 상향링크 NOMA 시스템을 고려한다. 즉, 모든 STA는 동일한 무선 자원 블록(resource blocks: RB)을 통해 신호를 전송하며, AP는 각 STA의 채널 상태 정보를 안다고 가정한다. 우선, 채널 부호화 기법으로써 R -반복 부호(repetition code: RC)를 고려한다. 이때 AP의 수신 신호 행렬 $\mathbf{Y}(\in \mathbb{C}^{J \times R})$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{G}_1 \mathbf{x}_1 + \sum_{i=2}^M \mathbf{G}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{W},$$

여기서 $\mathbf{x}_i$ 는 $i(\in \{1, \dots, M\})$ 번째 STA가 송신한 직교 위상 편이 변조 신호를 나타내며, $\mathbf{G}_i(\in \mathbb{C}^{J \times R})$ 는 i 번째 STA의 $r(\in \{1, \dots, R\})$ 번째 RB에 대한 무선 채널 벡터 $\mathbf{h}_{i,r}(\in \mathbb{C}^J)$ 로 구성된 행렬을 의미한다. 본 논문에서 모든 무선 채널은 서로 독립이고 $\mathcal{CN}(0, 1)$ 의 동일한 분포를 따르는 레일리 페이딩을 가정한다. 또한, $\mathbf{W}(\in \mathbb{C}^{J \times R})$ 는 R 번 반복 수신하는 동안 AP의 각 안테나에서 발생하는 열잡음 행렬을 의미하며, $\mathbf{w}_r$ 의 각 원소는 서로 독립이고 $\mathcal{CN}(0, N_0)$ 의 동일한 분포를 따른다고 가정한다.

한편, AP는 zero-forcing (ZF) 수신기를 통해 전송된 각 STA의 신호를 검출하며, 일반성을 잃지 않고, 본 논문에서는 첫 번째 STA의 BER 성능을 분석한다. 모든 RB로부터 첫 번째 STA의 신호 검출을 위해 ZF를 수행한 결과는 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$\bar{\mathbf{y}} = \mathbf{z} \mathbf{x}_1 + \bar{\mathbf{w}}, \quad \mathbf{z} = [\mathbf{z}_1 \mathbf{z}_2 \dots \mathbf{z}_R], \quad \bar{\mathbf{w}} = [\bar{w}_1 \bar{w}_2 \dots \bar{w}_R],$$

여기서 $\mathbf{z}_r = (\sqrt{1/[(\mathbf{H}_r^H \mathbf{H}_r)^{-1}]_{11}})$ 은 r 번째 RB의 ZF 과정에 의한

유색 잡음(colored noise)을 백색 잡음($\tilde{\mathbf{w}}_r$)으로 정규화하기 위한 계수이며, 여기서 $\mathbf{H}_r = [\mathbf{h}_{1,r} \dots \mathbf{h}_{M,r}]$ 이고 $[\mathbf{A}]_{ab}$ 는 행렬 $\mathbf{A}$ 에서 a 번째 행의 b 번째 열에 있는 원소를 의미한다.

위 ZF 결과로부터 단일 비트에 대한 오류 확률은 다음과 같다:

$$B_{RC} = \Pr(e|z_1, \dots, z_n) = \mathbb{E}\left[Q\left(\sqrt{2E_b} \|\mathbf{z}\| \sqrt{R/N_0}\right)\right],$$

여기서 Q 함수 내의 $\|\mathbf{z}\|^2$ 은 자유도(degrees of freedom: DoF) $RJ - R(M-1) - 1$ 의 카이제곱(Chi-square: χ^2) 분포를 따르므로 R -RC를 고려한 상향링크 NOMA 시스템의 BER 성능은 다음과 같이 유도된다:

$$B_{RC} = \frac{1}{2} \left[1 - \sum_{k=0}^{RJ-R(M-1)-1} \binom{2k}{k} \sqrt{\frac{E_b/N_0}{E_b/N_0 + R}} \left(\frac{R}{4E_b/N_0 + 4R} \right)^k \right].$$

한편, 길쌈 부호(convolutional code: CC)를 고려한 BER 성능의 상한은 다음과 같이 유도할 수 있다 [3]:

$$B_{CC} < \sum_{d=d_{free}}^{\infty} A_d P(d),$$

여기서 A_d 는 해밍 거리(Hamming weight)가 d 인 부호 워드 중 정보 비트열의 모든 원소가 0이 아닌 부호 워드의 수를 나타내며, d_{free} 는 CC의 자유 거리를 의미한다. 이때, A_d 와 d_{free} 는 CC 인코더의 구조에 따라 정의된다. 또한, $P(d)$ 는 모든 원소가 0인 부호 워드가 전송될 때, 해밍 거리가 d 인 부호 워드로 복호화될 확률을 의미하며, d -RC와 동일한 오류율을 갖는다. 결론적으로, CC를 적용한 상향링크 NOMA 시스템의 BER 상한은 다음과 같이 유도된다:

$$B_{CC} < \sum_{d=d_{free}}^{\infty} \frac{A_d}{2} \left[1 - \sum_{k=0}^{dJ-d(M-1)-1} \binom{2k}{k} \sqrt{\frac{E_b/N_0}{E_b/N_0 + R}} \left(\frac{R}{4E_b/N_0 + 4R} \right)^k \right].$$

III. 모의실험 결과 및 결론

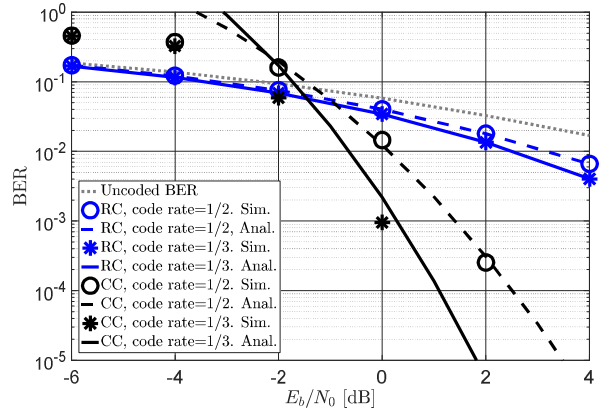


그림 1. 채널 부호화된 상향링크 NOMA 시스템의 E_b/N_0 대비 BER 성능

그림 1은 $M=3$, $J=4$ 일 때, RC와 CC를 고려한 상향링크 NOMA 시스템의 E_b/N_0 대비 BER 성능을 나타낸다. RC와 CC 모두 부호화율(code rate) 1/2 및 1/3을 가정했으며, CC 인코더의 경우 [131, 171]과 [557, 663, 711] 인코더를 각각 고려했다. 결론적으로, RC를 고려한 상향링크 NOMA 시스템의 수학적 분석 결과가 모의실험과 정확하게 일치하는 것을 확인했으며, CC를 고려한 상향링크 NOMA 시스템의 분석 결과는 BER 상측 한계를 잘 정의하는 것으로 확인했다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2021R1A4A103258).

참고 문헌

- [1] H. S. Jang, B. C. Jung*, T. Q. S. Quek, and D. K. Sung, "Resource-Hopping-Based Grant-Free Multiple Access for 6G-Enabled Massive IoT Networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 20, pp. 15349–15360, Oct, 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] H. S. Jang, B. C. Jung*, and D. K. Sung, "Performance Analysis of Reactive Symbol-Level Jamming Techniques," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 12, pp. 12432–12437, Dec. 2018.