

Performance Analysis of Uplink Bursty NOMA Systems with Hybrid Detector

Ki-Hun Lee, Bang Chul Jung
Chungnam National University

요약

본 논문에서는 각각 단일 안테나를 갖는 두 단말이 다중 안테나를 갖는 하나의 액세스 포인트로 신호를 전송하는 상향링크 간헐적 비직교 다중 접속 (bursty non-orthogonal multiple access: B-NOMA) 시스템을 고려한다. 각 단말은 서로 독립적인 확률에 따라 간헐적으로 신호를 전송하고 액세스 포인트는 이 같은 B-NOMA 네트워크를 위해 기존에 제안된 두 단계 구조의 하이브리드 수신 기법에 따라 송신된 신호를 검파한다. 이때, 각 단말의 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR) 대비 비트 오류율(bit-error-rate: BER) 성능을 수학적으로 분석한다.

I. 서론

최근 [1]에서는 각 단말에서 간헐적으로 트래픽이 발생하는 상향링크 비직교 다중 접속(NOMA) 네트워크를 고려한 두 단계 구조(signaling-based hybrid: S-Hybrid)의 수신 기법을 제안했다. 이는 확장된 결합 최대 우도 검파 기법의 연산 부하를 완화하기 위해, 패킷의 일부 심볼을 파일럿 신호로 활용하여 전송 단말을 먼저 추정 후 해당 단말의 정보 신호를 검출하는 수신 기법이다. 나아가 [2]에서는 수신 안테나를 다중 안테나로 확장하고, 전송 단말 추정을 위한 파일럿 신호의 간소화를 제안했다. 본 논문에서는 [2]에서 제안한 하이브리드 수신 기법에 대해 각 단말(station: STA)의 전송 확률 및 액세스 포인트(access point: AP)의 수신 안테나 수에 따라 일반화된 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR) 대비 비트 오류율(bit-error-rate: BER) 성능을 수학적으로 분석한다.

II. B-NOMA 시스템 모델 및 하이브리드 수신 기법의 성능 분석

본 논문에서는 [2]와 같은 상향링크 간헐적 NOMA (bursty NOMA: B-NOMA) 시스템 모델을 고려하며, 각 단말의 SNR 대비 BER 성능을 분석한다. 일반성을 잃지 않고, 첫 번째 단말의 직교 위상 편이 변조(quadrature phase shift keying: QPSK) 신호 두 비트 중 첫 번째 비트가 0에서 1로 오류 나는 경우(event: e)만을 고려하며, 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다(두 번째 단말의 BER 또한 다음과 같은 과정을 통해 유도된다.):

$$P_{e,1} = \Pr(e|\mathbf{g}, \mathbf{b}_1 = 1),$$

여기서 $\mathbf{g}_k (\mathbf{g}_k := \sqrt{\sigma_k} \mathbf{h}_k)$ 는 $k (\in \{1, 2\})$ 번째 단말과 액세스 포인트 사이 대규모 페이딩($\sqrt{\sigma_k} = \sqrt{d_k^{-\eta}}$ [2])이 고려된 무선 채널 벡터를 나타내며, $b_k (\in \{0, 1\})$ 는 k 번째 단말의 전송 여부를 나타내는 지표(indicator: Ind) 비트를 의미한다. 즉, $P_{e,1}$ 은 첫 번째 단말이 신호를 전송했을 때($b_1 = 1$)의 BER을 나타내며, 이는 다음과 같이 정의할 수 있다:

$$P_{e,1} = \Pr(b_2 = 1) \left[\begin{aligned} & P_{b,1}^{(NOMA)} (1 - P_{b,1}^{(Ind)}) (1 - P_{b,2}^{(Ind)}) \\ & + P_{b,1}^{(OMA)} (1 - P_{b,1}^{(Ind)}) (P_{b,2}^{(Ind)}) \\ & + 1 (P_{b,1}^{(Ind)}) (1 - P_{b,2}^{(Ind)}) + 1 (P_{b,1}^{(Ind)}) (P_{b,2}^{(Ind)}) \end{aligned} \right] \\ + \Pr(b_2 = 0) \left[\begin{aligned} & P_{b,1}^{(NOMA)} (1 - P_{b,1}^{(Ind)}) (1 - P_{b,2}^{(Ind)}) \\ & + P_{b,1}^{(OMA)} (1 - P_{b,1}^{(Ind)}) (P_{b,2}^{(Ind)}) \\ & + 1 (P_{b,1}^{(Ind)}) (1 - P_{b,2}^{(Ind)}) + 1 (P_{b,1}^{(Ind)}) (P_{b,2}^{(Ind)}) \end{aligned} \right] \\ = (1 - P_{b,1}^{(Ind)}) \left[\begin{aligned} & P_{b,1}^{(NOMA)} \{ \alpha (1 - P_{b,2}^{(Ind)}) + (1 - \alpha) P_{b,2}^{(Ind)} \} \\ & + P_{b,1}^{(OMA)} \{ \alpha P_{b,2}^{(Ind)} + (1 - \alpha) (1 - P_{b,2}^{(Ind)}) \} \end{aligned} \right] + P_{b,1}^{(Ind)},$$

여기서 $\Pr(b_2 = 0) = 1 - \alpha$, $\Pr(b_2 = 1) = \alpha$ 이고, $P_{b,1}^{(NOMA)}$, $P_{b,1}^{(OMA)}$, $P_{b,k}^{(Ind)}$ 는 두 단말 모두 송신하여 결합 최대 우도 검파 기법을 통해 각 단말의 신호를 검파했을 때, 첫 번째 단말의 데이터 비트 오류율; 첫 번째 단말만 송신하여 최대 우도 검파 기법을 통해 신호를 검파했을 때, 해당 단말의 데이터 비트 오류율; 및 결합 최대 우도 검파 기법을 통해 각 단말의 지표 비트를 검파했을 때, k 번째 단말의 지표 비트 오류율을 각각 나타내며, [3]으로부터 다음과 같이 유도할 수 있다:

$$P_{b,1}^{(NOMA)} \leq \sum_{q=9}^{16} \Phi \left(\sum_{k=1}^2 \rho_k \sigma_k |S_1^{(k)} - S_q^{(k)}|^2 / 2 \right),$$

$$P_{b,1}^{(OMA)} \leq \sum_{q=3}^4 \Phi \left(\rho_1 \sigma_1 |s_1 - s_q|^2 / 2 \right),$$

$$P_{b,1}^{(Ind)} \leq \sum_{q=3}^4 \Phi \left(\sum_{k=1}^2 \rho_k \sigma_k |A_1^{(k)} - A_q^{(k)}|^2 / 2 \right),$$

$$P_{b,2}^{(Ind)} \leq \sum_{q \in \{2,4\}} \Phi \left(\sum_{k=1}^2 \rho_k \sigma_k |A_1^{(k)} - A_q^{(k)}|^2 / 2 \right),$$

여기서 $S_i^{(1)} = s_{\lceil i/4 \rceil}$, $S_i^{(2)} = s_{((i-1) \bmod 4) + 1}$ ($i \in \{1, 2, \dots, 16\}$)이고,

$\{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ 는 그레이 부호를 따르며 순차적으로 $\{00, 01, 10, 11\}$ 비트를 나타내는 정규화된 QPSK 신호의 성상을 나타낸다. 또한, $A_j^{(1)} = a_{\lceil j/2 \rceil}$, $A_j^{(2)} = s_{((j-1) \bmod 2) + 1}$ ($j \in \{1, 2, 3, 4\}$)이며, 여기서 $\{a_1, a_2\} (= \{0, 1\})$ 은 지표 비트의 성상을 나타낸다. 끝으로, $\rho_k (= P_k/N_0)$ 는 k 번째 단말의 송신 SNR을 의미하며, $\Phi(\gamma)$ 는 다음과 같다:

$$\Phi(\gamma) = \frac{1}{2} \left[1 - \sum_{m=1}^M \binom{2m}{m} \sqrt{\frac{1}{1+2/\gamma} \frac{1}{(2\gamma+4)^m}} \right].$$

III. 모의실험 결과 및 결론

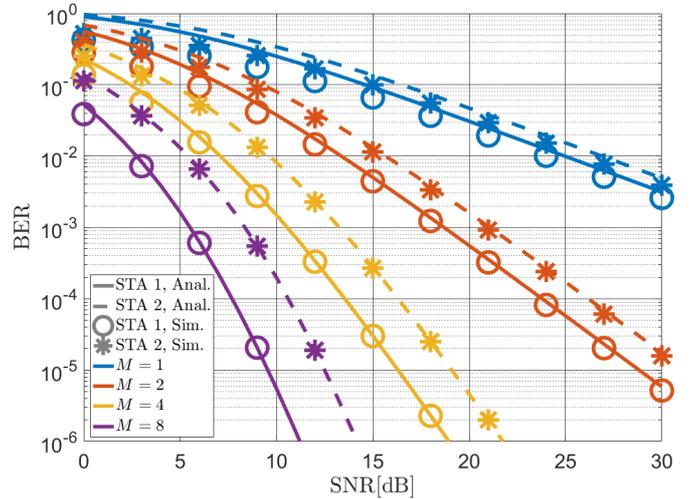


그림 1. 하이브리드 수신 기법을 고려한 상향링크 B-NOMA 시스템의 BER 성능

그림 1은 [2]에서 제안한 두 단계 구조의 하이브리드 신호 수신 기법을 고려한 상향링크 B-NOMA 시스템에서 각 단말의 SNR 대비 BER 성능을 나타낸다. 두 단말은 서로 독립적으로 $\alpha = 0.5$ 의 동일한 확률에 따라 정규화된 송신전력($P_1 = P_2 = 1$)으로 신호를 전송하며, $\sigma_1 = 1$, $\sigma_2 = 1/2$ 를 가정했다. 또한, 액세스 포인트는 각각 1, 2, 4 및 8개의 안테나를 갖는 상황을 고려했다. 구체적으로, 그림 1에서 실선과 점선은 첫 번째 및 두 번째 단말의 수학적 성능 분석 결과를 각각 나타내며, '○'와 '*' 심볼은 이에 대응되는 모의실험 결과를 나타낸다. 결론적으로, 본 논문에서 수행한 수학적 성능 분석 결과가 각 단말의 BER 상측 한계(upper bound)를 잘 정의하는 것으로 확인했다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2019-0-00964, 스펙트럼 채널지를 통한 기존 무선국 보호 및 주파수 공유기술 개발)

참고 문헌

- [1] M. B. Shahab, S. J. Johnson, M. Shirvanimoghaddam, and M. Dohler, "Receiver design for uplink power domain NOMA with discontinuous transmissions," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 25, no. 8, Aug. 2021.
- [2] 조민근, 이영석, 이기훈, 정방철, "상향링크 간헐적 NOMA 시스템을 위한 다중 안테나 기반 신호 수신 기법," *한국통신학회 학술대회논문집*, pp. 1509-1510, Jun. 2021.
- [3] 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.