

다중 셀 협력 네트워크에서 상향링크 NOMA 시스템의 BER 성능 분석

유창석*, 염정선, 정방철

*국방과학연구소, 충남대학교

cs_you@add.re.kr, jsyeom@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

BER Performance Analysis of Uplink NOMA System in Multi-Cell Cooperative Networks

Chang Seok You*, Jeong Seon Yeom, and Bang Chul Jung

*Agency for Defense Development, Chungnam National University

요약

본 논문은 다중 셀 시스템에서 인접 셀 간의 간섭을 고려한 상향링크 비직교 다중 접속 (non-orthogonal multiple access, NOMA)의 비트 오류율 (bit error rate, BER) 성능을 분석한다. 전체 시스템에 N 개의 셀룰러 기지국 (base station, BS)이 있고 K 개의 사용자 단말 (user equipment, UE)이 있을 때, 모든 기지국에서 수신한 신호를 독립적으로 검파하는 것이 아닌 결합 최대 우도 (joint maximum likelihood, JML) 검파 기법을 사용하였을 때의 최적 BER 성능을 수학적으로 분석한다. 시뮬레이션 결과를 통해 본 논문에서 분석된 BER 수식과 컴퓨터 시뮬레이션이 높은 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio)에서 거의 일치함을 보인다.

I. 서론

비직교 다중 접속 (NOMA)은 여러 단말들이 동일한 시간과 주파수 자원을 사용하여 통신을 하는 다중 접속 기술로써 가용 자원의 효율성을 향상시킬 수 있다 [1]. 많은 연구에서 비직교 다중 접속의 통신 성능을 분석하였으며 이러한 연구 중 비트 오류율 (BER)을 분석한 연구가 있다[2, 3]. 논문 [3]에서는 상향링크 단일 셀 환경에서 두 명의 사용자에 대한 비직교 다중 접속의 BER을 수학적으로 분석하였다. 하지만 셀룰러 네트워크의 성능향상을 위해 현재 스몰셀 네트워크가 고려됨에 따라 셀 간 간섭은 큰 이슈이다. 이에 따라, [3]에서는 이중 셀 환경에서 네 명의 사용자가 존재할 때 상향 링크 비직교 다중 접속의 BER을 수학적으로 분석하였다. 이를 확장하여본 논문에서는 N 개의 BS와 K 명의 UE 존재할 때 셀 간 간섭을 고려한 상향링크 비직교 다중 접속의 BER 성능을 수학적으로 분석한다.

II. 시스템 모델

본 논문의 시스템 모델은 N 개의 BS와 K 개의 UE로 구성된 셀 간 간섭을 고려한 상향링크 비직교 다중 접속 시스템이다. BS와 UE은 단일 안테나를 가짐으로써 UE들의 송신신호는 QPSK로 부호화된다. 따라서 i 번째 BS에서 수신한 신호 y_i ($i \in 1, 2, \dots, N$)는 다음과 같다.

$$y_i = \sum_{j=1}^4 \sqrt{P_j d_{j,i}^{-\alpha}} h_{j,i} x_j + n_i, \quad (1)$$

여기서 P_j ($j \in 1, 2, \dots, K$)는 j 번째 UE의 송신 전력, $d_{j,i}$ 는 j 번째 UE와 i 번째 BS 간의 거리, α 는 경로 감쇄 지수이며 x_j 는 j 번째 UE의 QPSK 신호이다. 본 논문에서 $\mathbb{E}[|x_i|^2] = 1$ 로 가정한다. 채널 $h_{j,i}$ 는 j 번째 UE로부터 i 번째 BS까지의 무선 페이딩 채널로써 $\mathcal{CN}(0, 1)$ 의 분포를 따른다고 가정한다. 가우시안 잡음은 n_i 으로 표현되며 $\mathcal{CN}(0, N_0)$ 의 분포를 따른다고 가정한다. 수신된 신호는 각 BS에서 개별적으로 검파되지 않고 각 BS의 수신 신호를 결합하여 검파하는 협력 최대 우도 (JML) 검파 기법을 이용하여 수학적으로 다음과 같이 표현된다.

$$(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_K) = \arg \min_{(x_1, x_2, \dots, x_K) \in \chi^K} \left| \sum_{i=1}^N y_i - \left(\sum_{j=1}^K g_{j,i} x_j \right) \right|^2,$$

여기서 $g_{j,i} = \sqrt{P_j d_{j,i}^{-\alpha}} h_{j,i}$ 이고, $\chi \in \{(1+j)/\sqrt{2}, (-1+j)/\sqrt{2}, (-1-j)/\sqrt{2}, (1-j)/\sqrt{2}\}$ 이다.

III. 비트 오류 확률 분석

본 논문에서는 union upper bound 기법을 활용하여 닫힌 형태의 BER 식을 수학적으로 유도한다. 본 논문에서는 첫 번째 비트에 대해서만 분석되며, 유도된 결과는 일반화될 수 있다. 채널 이득이 주어질 경우 대한 비트 에러 이벤트(ϵ_b)의 확률의 union bound는 다음과 같다.

$$\Pr\{\epsilon_b | x_j, g_{j,i}, i \in \{1, \dots, N\}, j \in \{1, \dots, K\}\} = \sum_{l=1}^{|X|^{K/2}} Q\left(\sqrt{\frac{\delta_l^2}{2N_0}}\right), \quad (2)$$

여기서 $|\cdot|$ 은 집합의 크기 (cardinality)를 의미하고 δ_l^2 은 수신 신호가 존재하는 2차원의 복소 벡터 공간에서의 송신 심벌들과 해당 심벌에 대해 첫 번째 비트에 대한 에러를 야기하는 l 번째 심벌 조합 사이의 유클리드 거리를 의미한다. 구체적으로 $\delta_l^2 = \sum_{i=1}^N \delta_{i,l}^2 = \sum_{i=1}^N \left| \sum_{j=1}^K g_{j,i} (x_j - \bar{x}_{j,l}) \right|^2$ 이며, $(\bar{x}_{1,l}, \bar{x}_{2,l}, \dots, \bar{x}_{K,l})$ 은 비트 에러를 야기하는 네 개 UE들의 QPSK 심벌 조

합이다. 따라서 δ_l^2 은 임의의 평균과 분산을 가지는 열량 분포를 따르는 N 개의 랜덤 변수의 합이다. δ_l^2 의 확률 밀도 함수를 고려하여 비트 에러 확률은 다음과 같이 주어진다.

$$P_b \leq \sum_{l=1}^{|X|^{K/2}} \int_0^\infty Q\left(\sqrt{\frac{z}{2N_0}}\right) f_{\delta_l^2}(z) dz \quad (3)$$

$$= \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^{|X|^{K/2}} \frac{1}{2} \left(\prod_{j=1, j \neq i}^N \left(\frac{\gamma_{i,l}}{\gamma_{i,l} - \gamma_{j,l}} \right) \right) \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+2/\gamma_{i,l}}} \right)$$

여기서, $\gamma_{i,l}$ 의 랜덤 변수 $\delta_{i,l}^2$ 의 비율(rate) 파라미터이다.

III. 모의실험 결과 및 결론

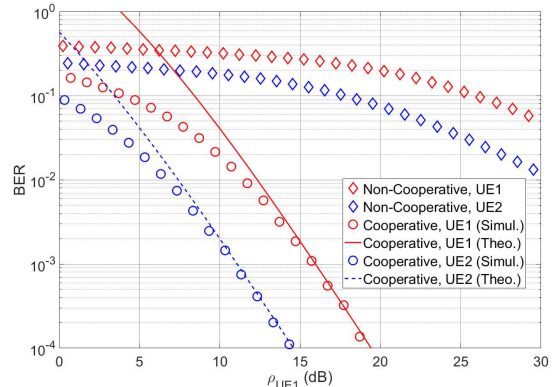


그림 1 상향링크 다중 셀 NOMA 시스템의 협력적 검파 기법과 비협력적 검파 기법의 BER 성능 ($N=3, K=4$)

그림 1은 $N=3, K=4$ 일 때 상향링크 다중 셀 NOMA의 BER 성능을 보여준다. BS는 동심원 상에 존재하며 모든 UE 동심원 내에 임의의 위치에 존재한다고 가정하였을 때, 원의 중앙에 위치한 UE1과 기지국 1에 가깝게 위치한 UE2의 결과를 보여준다. 본 논문에서의 분석 결과와 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 비교하였을 때 SNR이 높아질수록 차이가 줄어들며 높은 SNR에서 거의 같음을 볼 수 있다. 또한, 안테나 다이버시티로 인해 비협력적 (Non-Cooperative) 검파 기법 (기지국 1 기준)과 비교하였을 시 높은 성능 차이를 보여준다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2020년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (2019-0-00964-001, 스펙트럼 채널 지를 통한 기존 무선국 보호 및 주파수 공유기술 개발)

참고 문헌

- [1] Z. Ding, *et al.*, "Application of non-orthogonal multiple access in LTE and 5G networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 2, pp. 185-191, Feb. 2017.
- [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 Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 68, No. 10, p. 10295-10300, Oct. 2019.
- [3] 유창석, 염정선, 정방철, "협력적 이중 셀 네트워크에서 비직교 다중 접속 시스템의 BER 성능 분석," *한국통신학회 추계종합학술발표회*, Nov. 2019.