

협업적 이중 셀 네트워크에서 비직교 다중 접속 시스템의 BER 성능 분석

유창석*, 엄정선, 정방철

*국방과학연구소, 충남대학교

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

BER Performance Analysis of Uplink NOMA in Cooperative Two Cell Network

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

*Agency for Defense Development, Chungnam National University

요약

본 논문은 이중 셀 시스템에서 상향 링크 비직교 다중 접속 (non-orthogonal multiple access, NOMA)의 비트 오류율 (bit error rate, BER) 성능 분석에 대해 다룬다. 구체적으로 페이딩 채널 환경에서 멀리 셀 환경에서 여러 명의 사용자 단말기가 존재할 때, 각 기지국에서 수신한 신호를 협력적으로 취합하여 최대 우도 (joint maximum likelihood, JML) 검파 기법을 사용하였을 때의 BER 성능을 수학적으로 분석한다. 시뮬레이션 결과로부터 본 논문에서 수학적으로 유도된 BER 분석식은 높은 SNR 구간에서 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 거의 일치함을 보인다.

I. 서론

비직교 다중 접속 (NOMA)는 동일한 주파수 자원을 둘 이상의 단말기가 동시에 사용하는 기술로 가용 자원의 효율성을 높이기 위한 연구들이 진행되고 있다. 이러한 연구들 중에서 비직교 다중 접속에 대한 비트 오류율 (BER) 성능 분석에 대한 연구들이 진행되었다[1-3]. 그러나 대부분의 연구는 단일 셀 환경을 고려하고 있으며[2], [3] 다중 셀 환경에서의 BER 성능 분석의 존재하지 않는다. 본 논문에서는 협력적으로 동작하는 이중 셀 환경에서의 상향링크 비직교 다중 접속 시스템의 BER 성능을 수학적으로 분석하고, 단일 셀 환경에서의 BER 성능과 비교한다. 사용자들은 각 기지국에서 임의의 다른 위치에 존재하며 QPSK (quadrature phase shift keying) 변조를 사용한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 두 개의 기지국들 (base station, BS)과 각 셀에 네 개의 사용자 단말들 (user equipment, UE)이 존재하며 셀 간 간섭이 존재하는 상향링크 비직교 다중 접속 시스템을 고려한다. BS와 UE는 단일 안테나를 가정한다. UE들의 송신신호는 QPSK로 부호화된다. 따라서 i 번째 BS에서 수신한 신호 y_i ($i \in 1, 2$)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 ($j \in 1, 2, 3, 4$)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 송신 신호이다. 채널 $h_{j,i}$ 는 j 번째 UE로부터 i 번째 BS까지의 무선 채널로써 $\mathcal{CN}(0, 1)$ 의 분포를 따른다고 가정한다. 가우시안 잡음은 n_i 으로 표현되며 $\mathcal{CN}(0, N_0)$ 의 분포를 따른다고 가정한다. 송신 신호들은 각 BS에서 개별적으로 검파되는 것이 아닌 BS간에 협력적으로 수신 신호를 공유하여 검파한다. 검파 방법은 연속 간섭 제거 기법 (successive interference cancellation) 대신 협력 최대 우도 (JML) 검파 기법을 이용한다.

$$(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3, \hat{x}_4) = \arg \min_{(x_1, x_2, x_3, x_4) \in \chi^4} \left| \sum_{i=1}^2 y_i - \left(\sum_{j=1}^4 g_{j,i} x_j \right) \right|^2$$

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 정확한 비트 오류 확률을 분석하는 것은 어려움으로 union upper bound 기법을 활용한다. JML 검파 기법의 BER 성능은 각 UE의 첫 번째 비트에 대해서만 분석하며 이에 대한 결과식은 일반화될 수 있다. 채널 이득이 주어졌을 때 조건부 비트 에러 확률의 union bound는 다음과 같다.

$$\Pr\{\text{bit error} | x_j, g_{j,i}, \forall i, j\} = \sum_{l=1}^{|x|/2} Q\left(\sqrt{\frac{\delta_l^2}{2N_0}}\right), \quad (2)$$

여기서 $|\cdot|$ 은 집합의 크기를 의미하고 δ_l^2 은 2차원의 복소 벡터 공간에서의 송신 심볼들과 l 번째 비트 에러 심볼 조합 사이의 유클리디안 거리를 의미한다. 구체적으로 $\delta_l^2 = \sum_{i=1}^2 \delta_{i,l}^2 = \sum_{i=1}^2 \left| \sum_{j=1}^4 g_{j,i} (x_j - \bar{x}_{j,l}) \right|^2$ 이며 $(\bar{x}_{1,l}, \bar{x}_{2,l}, \bar{x}_{3,l}, \bar{x}_{4,l})$ 은 비트 에러를 야기하는 UE들의 QPSK 심볼 조합이다. 따라서 δ_l^2 은 두 개의 지수 분포를 따르는 랜덤 변수의 합이다. δ_l^2 의

확률 밀도 함수를 고려하여 비트 에러 확률을 다음과 같이 구할 수 있다.

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

$$= \sum_{l=1}^{|x|/2} \frac{(-1)(\gamma_{1,l}\gamma_{2,l})}{(\gamma_{1,l}-\gamma_{2,l})^2} \left[\left(1 - \frac{\gamma_{1,l}}{\gamma_{2,l}}\right) \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+2/\gamma_{1,l}}}\right) + \left(1 - \frac{\gamma_{2,l}}{\gamma_{1,l}}\right) \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+2/\gamma_{2,l}}}\right) \right],$$

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

III. 모의실험 결과 및 결론

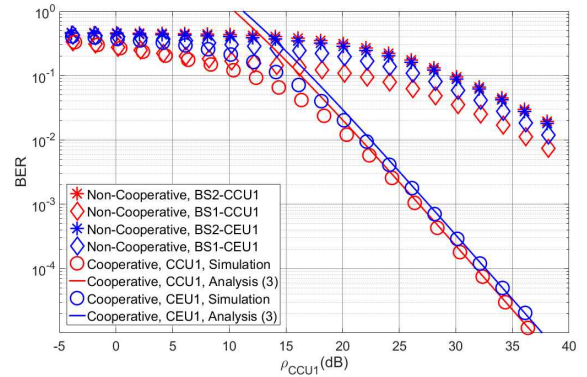


그림 1. 다중 셀 NOMA 시스템에서 BS의 협력적 검파기법과 비협력적 검파 기법의 BER 성능.

그림 1은 본 시스템의 시뮬레이션 결과와 각 BS에서 개별적으로 신호를 검파하였을 때의 시뮬레이션 결과를 보여준다. CCU1은 BS1이 포함된 셀의 중앙에 위치한 사용자 단말이며 CEU1은 반대로 셀 가장자리에 위치한 단말을 의미한다. 모든 BS와 UE는 지리적으로 대칭으로 설정되었기 때문에 CCU1과 CEU1에 대한 BER 성능만을 보인다. ρ_{CCU1} 은 CCU1의 유효 수신 SNR이다. 먼저 분석 결과식은 높은 SNR에서 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 일치함을 보인다. 또한 BS들 간에 협력적으로 신호를 검파하는 것(cooperative)이 비협력적으로(non-cooperative) 신호를 검파하는 것보다 성능이 월등함을 보인다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2015-0-00278, 5G 실감형 서비스를 실현하기 위한 초저지연 네트워크 기술연구)

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, E. Chu, B. C. Jung, and H. Jin, "Performance analysis of diversity-controlled multi-user superposition transmission for 5G wireless networks," *MDPI Sensors*, vol. 18, no. 2, Feb. 2018.
- [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 E Trans. Veh. Technol.*, Jul. 2019 (Accepted).