결합 최대 우도 검파기반 하향링크 비직교 다중 접속 시스템의 성능 분석

염정선 (충남대학교), 정방철 (충남대학교)
jsyeom@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Performance Analysis of Downlink NOMA based on Joint Maximum Likelihood Detection

Jeong Seon Yeom (CNU), Bang Chul Jung (CNU)
Chungnam National University.

요 약

본 논문은 SIMO (single-input multiple-output) 셀룰러 하향링크 시스템에서 비직교 다중 접속 (non-orthogonal multiple access: NOMA) 기술에 대한 성능 분석을 다룬다. 구체적으로, 본 논문에서는 페이딩 (fading) 채널 환경에서 다중 수신 안테나를 갖는 두 개의 단말기가 존재하고 두 단말이 기지국 (Base Station: BS)로부터 임의의 서로 다른 거리에 존재하는 경우 각 단말에서 결합 최대 우도 검파 (joint maximum likelihood: JML) 기법을 사용하는 경우에 대한 비트 오류 확률을 수학적으로 분석한다. 시뮬레이션 결과를 통하여 본 논문에서 수학적으로 유도된 비트 오류 확률식이 정확함을 검증한다.

Ⅰ. 서 론

비직교 다중 접속 (NOMA)은 동일한 주파수 자원을 둘 이상의 단말기가 동시에 사용하여 주파수 효율성 (spectral efficiency)을 높이는 통신 방법으로 많은 연구가 진행되고 있다[1]. 이러한 연구들 중에서 시스템 환경, 검파 기법 등에 따라 NOMA 시스템의 오류 확률을 분석한 연구가 존재한다[2],[3]. 하지만 다중 안테나 수신기를 가지는 하향 링크 NOMA 시스템에서 최적의 검파 기법인 결합 최대 우도 검파 기법의 비트 오류 확률 (bit-error rate: BER) 분석에 대한 연구는 없으므로 본 논문에서 이에 대한 성능을 수학적으로 분석한다. 본 논문에서는 페이딩 채널 환경을 가정하며 모든 신호는 QPSK 변조된다.

Ⅱ. 시스템 모델

본 논문에서는 한 개의 기지국 (base staton: BS)이 한 개의 셀 중심 사용자 (cell-center user: CCU)와 한 개의 셀 외곽 사용자 (cell-edge user: CEU)에게 1개의 부반송파 (sub-carrier)를 이용하여 동시에 하향링크 통신을 하는 비직교 다중 접속 시스템을 고려한다. 각 사용자는 N 개의 안테나를 가지고 BS는 단일 안테나를 가지며 각 사용자에 대한 신호는 QPSK 변조된다고 가정한다. 또한, CCU와 CEU는 BS으로부터 각각 거리 d_{C} 과 d_{E}에 존재한다고 가정한다. 이때, $d_{\mathrm{C}} < d_{\mathrm{E}}$.이다.

BS은 두 개의 QPSK 신호를 중첩하기 전에 중첩신호가 Gray 매핑을 따르기 위해 다음과 같이 CCU의 i 번째 비트 ($b_{\mathrm{C},i}$)를 부호화한다.

$$\bar{b}_{\mathrm{C},i} = b_{\mathrm{C},i} \oplus b_{\mathrm{E},i}, \quad (i \in \{1,2\}), \tag{1}$$

$b_{\mathrm{E},i}$와 $\bar{b}_{\mathrm{C},i}$는 각각 CEU의 i번째 비트와 CCU의 부호화된 i 번째 비트를 의미한다. 이를 통해 BS은 두 개의 QPSK 심벌을 생성하고 각 심벌에 전력 분배 파라미터 $a(0 \le a \le 0.5)$에 따라 전력을 할당하여 중첩신호를 생성 한 후 신호를 전송한다. 각 사용자가 N개의 안테나로 수신한 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_{\mathrm{U}} = \sqrt{P d_{\mathrm{U}}^{-\alpha}}\,\mathbf{h}_{\mathrm{U}}\left(\sqrt{a}\,x_{\mathrm{C}} + \sqrt{1-a}\,x_{\mathrm{E}}\right) + \mathbf{n}_{\mathrm{U}}, (\mathrm{U} \in \{\mathrm{C},\mathrm{E}\}), \tag{2}$$

본 논문에서는 기호 U가 가지는 기호 C 는 CCU를 의미하며 E는 CEU를 의미한다. $\mathbf{y}_{\mathrm{U}}$, 는 사용자 U의 수신 신호 벡터, $\mathbf{h}_{\mathrm{U}}$는 BS로부터 사용자 U까지 무선 채널 벡터이며 모든 채널은 $\mathcal{CN}(0,1)$의 분포를 따른다고 가정한다. 본 논문에서 각 사용자는 BS의 파일럿 신호에 의해 자신의 채널을 완벽하게 알고 있다고 가정한다. $\mathbf{n}_{\mathrm{U}}$는 사용자 U의 가우시안 잡음으로 $\mathcal{CN}(0,N_0)$의 분포를 따른다고 가정한다. P는 BS의 송신 전력이고 x_{U}는 사용자 U의 QPSK 심벌을 의미한다. 각 사용자는 수신 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio: SNR)를 최대화하는 기법인 최대 비 결합을 다음과 같이 수행한다.

$$\bar{y}_{\mathrm{U}} = \frac{\mathbf{h}_{\mathrm{U}}^{\mathrm{T}}}{\sqrt{P d_{\mathrm{U}}^{-\alpha}}\,\|\mathbf{h}_{\mathrm{U}}\|^2}\mathbf{y}_{\mathrm{U}} = \sqrt{a}\,x_{\mathrm{C}} + \sqrt{1-a}\,x_{\mathrm{E}} + \bar{n}_{\mathrm{U}}, \tag{3}$$

여기서 $\bar{n}_{\mathrm{U}}$은 $\mathcal{CN}(0, N_0/(\|\mathbf{h}_{\mathrm{U}}\|^2 P d_{\mathrm{U}}^{-\alpha}))$의 분포를 따른다. 그리고 본 논문에서는 각 사용자가 신호를 검파하기 위해 일반적으로 중첩 신호를 검파 기법으로 사용되는 연속 간섭 제거 (successive interference cancellation) 기법이 아닌 식 (4)와 같이 결합 최대 우도 검파 (JML) 기법을 사용한다.

$$(\hat{x}_{\mathrm{C}}, \hat{x}_{\mathrm{E}}) = \underset{(x_{\mathrm{C}}, x_{\mathrm{E}}) \in \mathcal{C}^{2\times 1}}{\arg\min}\ \bar{y}_{\mathrm{U}} - \left(\sqrt{a}\,x_{\mathrm{C}} + \sqrt{1-a}\,x_{\mathrm{E}}\right). \tag{4}$$

JML 검파 기법의 BER 성능은 각 사용자의 첫 번째 비트 ($b_{\mathrm{U},1}$)에 대해 분석하며 이 결과는 모든 비트에 일반화된다. 이에 대한 분석 결과는 다음 식 (5), (6)과 같이 CEU ($P_{b,\mathrm{E}}$)와 CCU ($P_{b,\mathrm{C}}$)에 따라 다르게 유도된다.

$$\psi(c) \triangleq \left(1-\sqrt{\frac{\rho c}{2+\rho c}}\right)^N \sum_{i=0}^{N-1}\binom{N-1+i}{i}\left(\frac{1}{2}\right)^{N+i+1}\left(1+\sqrt{\frac{\rho c}{2+\rho c}}\right)^i,$$

$$P_{b,\mathrm{E}} = \sum_{i=0}^{1}\psi\left(\frac{d_{\mathrm{E}}^{-\alpha}}{2}\left(\sqrt{1-a}+(-1)^i\sqrt{a}\right)^2\right), \tag{5}$$

$$P_{b,\mathrm{C}} = 2\psi\left(\frac{d_{\mathrm{C}}^{-\alpha}}{2}a\right) - \sum_{i=0}^{1}(-1)^i\psi\left(\frac{d_{\mathrm{C}}^{-\alpha}}{2}\left(2\sqrt{1-a}+(-1)^i\sqrt{a}\right)^2\right) \tag{6}$$

Ⅲ. 시뮬레이션 결과 및 결론

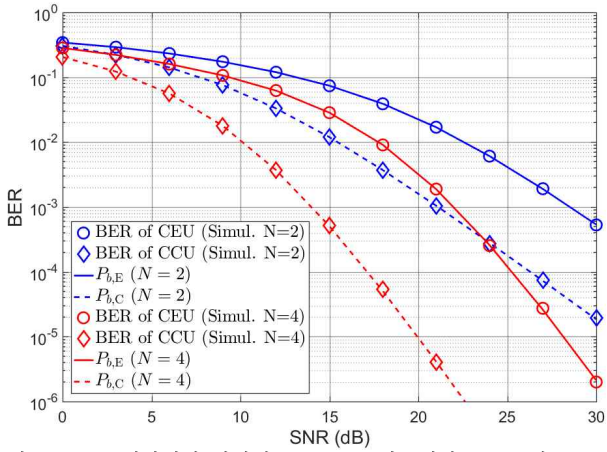

그림 1 JML 검파기반 하향링크 NOMA시스템의 BER 성능 분석

그림 1은 각 사용자의 BER 분석과 시뮬레이션 결과를 SNR에 대하여 보여주며 전력 분배 파라미터 $\alpha = 0.2$, 사용자들의 안테나 개수 $N = 2, 4$일 때의 결과이다. 전체 SNR 구간에 대해 시뮬레이션 결과들은 수학적으로 분석한 $P_{b,\mathrm{E}}$, $P_{b,\mathrm{C}}$와 정확히 일치하는 것을 볼 수 있다.

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).

참 고 문 헌

[1] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, C. -L. I and Z. Wang, "Non-orthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 9, pp. 74-81, Sep. 2015.

[2] F. Kara and H. Kaya, "BER performances of downlink and uplink NOMA in the presence of SIC errors over fading channels," *IET Communications*, vol. 12, no. 15, pp. 1834 - 1844, Sept. 2018.

[3] 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.