

FiniteBlocklength 구조에서 Rate-Splitting Multiple Access의 유효성

신수빈, 박정훈*

경북대학교, *경북대학교

gbssb123@knu.ac.kr, *jeonghun.park@knu.ac.kr

Rate-Splitting Multiple Access for Low-latency Internet-of-Things Communications - Is It Still Usefull?

Shin Su Bin, Park Jeong Hun*

KyungPook National Univ., *KyungPook National Univ.

요약

최근 연구들을 통해 Rate-Splitting Multiple Access (RSMA)가 채널 추정 에러에 강인함을 보이고 있다. 한편, 5G통신에서 요구하는 기준들 중 하나인 초저지연성은 Finite Blocklength (FBL) 구조를 고려해야만 한다. 기존의 RSMA의 우수성을 입증하는 연구들은 Infinite Blocklength 구조 하에 이루어졌기 때문에 RSMA가 여전히 초저지연성을 만족하면서도 우수함을 나타내는지 확신할 수 없다. 이러한 이유로 본 논문은 RSMA가 FBL을 고려한 상황에서도 여전히 우수한 성능을 나타내는지 연구했다. FBL 구조로 인해 Spectral Efficiency(SE)의 식이 변하고 디코딩 에러는 무시할 수 없게 됐으며 Ergodic SE를 고려할 수 없기에 Average SE를 성능 기준으로 삼았다. 다만, sum SE를 최대화하는 문제는 non-smooth, non-convex이다. LogSumExp 기법으로 non-smooth 함수를 근사화하여 non-smooth를 해결하고, Rayleigh Quotient 형태로 재수식화한 뒤, 이어서 Generalized Power Iteration (GPI) 알고리즘을 적용하여 최적화 문제를 풀었다. 시뮬레이션 결과를 통해 Average Sum SE를 확인함으로써 FBL 구조에서도 여전히 RSMA가 기존의 방법들보다 에러에 강인함을 입증했다.

I. 서론

Multi-user multiple input multiple output (MU-MIMO) downlink 전송은 뛰어난 SE 이득을 얻을 수 있다 [1]. 다만, 이런 이득은 완전한 채널 정보를 가정했을 경우이며, 불완전한 채널 정보 하에서 이루어질 경우, SE 이득이 크게 사라질 수 있다. 따라서 불완전한 채널 정보에서도 큰 이득을 얻을 수 있는 전략을 취해야만 하고 이에 부합하는 전송 전략으로 RSMA가 있다 [2].

한편, 5G 시대에 들어서면서부터 많은 통신기법들이 새롭게 부상되고 있으며 그 중 대표적인 것이 Internet of Things (IoT)통신이다. IoT 통신은 초저지연성과 초고신뢰성을 요구하는 통신이며, 이를 만족하기 위해서는 블록 길이가 짧은 구조, 즉, FBL 구조를 고려해야만 한다 [3].

불완전한 채널 정보에서도 RSMA가 뛰어난 이득을 보이는 연구는 Infinite blocklength 가정 하에 이루어진 것이다. 따라서, FBL 구조를 고려해야만 하는 IoT 통신에서 RSMA가 여전히 적합한 전송 전략인지 확신할 수 없다.

따라서 본 논문은 RSMA가 FBL 구조에서도 여전히 뛰어난 성능을 보이는지를 연구했다. FBL을 고려할 시, 바뀌는 요소로는 세 가지가 있다. 첫 번째로 디코딩 에러를 무시할 수 없다. 두 번째로 SE의 수식에 backoff 항을 가진다 [4]. 세 번째로 ergodic SE를 생각할 수 없다. FBL에 뒤따라오는 세 가지 특성과 더불어, 불완전한 채널 정보와 RSMA에서의 코딩, 디코딩 방식을 고려하여 average sum SE의 lower bound를 수식화한 뒤, 최적화 문제를 설계한다.

다만, 설계한 최적화 문제는 min 함수를 포함하기에 non-smooth이며, 이를 LogSumExp 기법 [5]을 통해 근사화한다. Non-smooth가 해결됐을지라도, 여전히 non-convex 문제이다. 이를 해결하기 위해 각 유저의 data stream을 위한 프리코딩 벡터를 쌓아올린 새로운 벡터를 도입하여 Rayleigh Quotient 형태를 지닌 식으로 재수식화한다. 이어서, first-order KKT condition을 유도함으로써 최적화 문제는 일반화된 고유값 문제로 전환된다. 이 때 GPI 알고리즘을 이용하여 최적화 문제를 해결한다.

II. 본론

우리는 N개의 안테나가 장착된 기지국과 single 안테나 유저가 K 명인 single-cell downlink MIMO 시스템을 고려한다. 또한, 기지국은 불완전한 Channel State Information을 가지는 것으로 가정한다. 따라서 기지국이 가지는 유저 k에 대한 채널 벡터는 아래와 같이 나타낸다.

$$\hat{\mathbf{h}}_k = \mathbf{h}_k - \mathbf{e}_k \quad (1)$$

또한 에러는 Φ_k 의 공분산 행렬을 가지는 것으로 가정한다.

FBL을 고려하면 블록 길이가 유한하기 때문에 ergodic SE로 나타내지 못하고 디코딩이 실패할 확률이 존재한다. 또한, backoff 항이 붙는다. 이러한 특성들을 고려하여 얻을 수 있는 SE를 식으로 나타내면 다음과 같다 [4].

$$R \simeq \log_2(1 + \gamma) - \frac{1}{L} V(\gamma) Q^{-1}(\epsilon) \quad (2)$$

ϵ 은 디코딩이 실패할 확률이며 따라서 FBL을 고려하면 $1 - \epsilon$ 의 확률로 R의 rate를 가진다.

불완전한 CSIT와 FBL을 고려하여 average sum SE의 lower bound를 나타내면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{R}_\Sigma = \sum_{k=1}^K \overline{R}_k \quad (3)$$

$$\overline{R}_k = (1 - \epsilon_{c,k}) \frac{\min_k \overline{R}_{c,k}}{K} + (1 - \epsilon_{c,k})(1 - \epsilon_{p,k}) \overline{R}_{p,k} \quad (4)$$

$$\overline{R}_{i,k} = X_{i,k} \log_2(1 + \gamma_{i,k}) - Y_{i,k} \quad (5)$$

$$X_{i,k} = 1 - \frac{Q^{-1}(\epsilon_{i,k})}{\sqrt{L}} q(c_k) \quad (6)$$

$$Y_{i,k} = \frac{Q^{-1}(\epsilon_{i,k}) \log_2 e}{\sqrt{L}} r(c_k) \quad (7)$$

$$q(c_k) = \frac{1}{\sqrt{2c_k(1+c_k)}} \quad (8)$$

$$r(c_k) = \sqrt{\frac{2c_k}{1+c_k}} - q(c_k) \ln(1+c_k) \quad (9)$$

$$\gamma_{c,k} = \frac{|\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{f}_c|^2}{\mathbf{f}_c^H \Phi_k \mathbf{f}_c + \sum_{\ell=1}^K |\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{f}_\ell|^2 + \sum_{\ell=1}^K \mathbf{f}_\ell^H \Phi_k \mathbf{f}_\ell + \sigma^2/P} \quad (10)$$

$$\gamma_{p,k} = \frac{|\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{f}_k|^2}{\sum_{\ell \neq k} |\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{f}_\ell|^2 + \sum_{\ell=1}^K \mathbf{f}_\ell^H \Phi_k \mathbf{f}_\ell + \sigma^2/P} \quad (11)$$

lower bound를 최대화함으로써 average sum SE를 최대화할 수 있고 이를 다음과 같은 최적화 문제로 표현할 수 있다.

$$\max \overline{R}_\Sigma \quad (12)$$

$$\text{s.t. } \|\mathbf{f}_c\|^2 + \sum_{k=1}^K \|\mathbf{f}_k\|^2 \leq 1 \quad (13)$$

하지만 (12)는 min 함수를 포함하기 때문에 non-smooth하고 이를 LogSumExp 기법[5]을 이용해 근사화한다.

$$\overline{R}_\Sigma \simeq \sum_{k=1}^K (1-\epsilon_{c,k}) \log_2 \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \exp \left(\frac{\overline{R}_{c,k}}{-\alpha} \right) \right)^{-\frac{\alpha}{K}} + (1-\epsilon_{c,k})(1-\epsilon_{p,k}) \overline{R}_{p,k} \quad (14)$$

또한, $\bar{\mathbf{f}} = [\mathbf{f}_c^T, \mathbf{f}_1^T, \dots, \mathbf{f}_K^T]^T$ 를 이용해 각각의 lower bound를 Rayleigh Quotient 형태로 재수식화할 수 있다.

재수식화된 식에서 first-order optimality를 유도하면 아래와 같이 일반화된 고유값 문제 [6]와 동등해진다.

$$\mathbf{B}(\bar{\mathbf{f}})^{-1} \mathbf{A}(\bar{\mathbf{f}}) \bar{\mathbf{f}} = \lambda(\bar{\mathbf{f}}) \bar{\mathbf{f}} \quad (15)$$

식(15)를 풀기위해서 Power Iteration 알고리즘과 동일한 방식으로 진행하되, 매번 갱신되는 $\bar{\mathbf{f}}$ 에 따라 행렬 또한 갱신해주며 진행한다.

$$\bar{\mathbf{f}}_{(t)} \leftarrow \frac{\mathbf{B}(\bar{\mathbf{f}}_{(t-1)})^{-1} \mathbf{A}(\bar{\mathbf{f}}_{(t-1)}) \bar{\mathbf{f}}_{(t-1)}}{\|\mathbf{B}(\bar{\mathbf{f}}_{(t-1)})^{-1} \mathbf{A}(\bar{\mathbf{f}}_{(t-1)}) \bar{\mathbf{f}}_{(t-1)}\|} \quad (16)$$

GPI를 이용한 RSMA의 average sum SE와 마찬가지로 GPI를 이용한 기존의 방법들을 시뮬레이션 결과를 통해 비교해본다.

III. 결론

본 논문에서 우리는 불안정한 채널 정보와 FBL 구조를 가정한 downlink 시스템에서, RSMA의 average sum SE의 lower bound를 수식화하고 그에 따른 최적화 문제를 설계했다. 다만, 문제가 non-smooth하고 non-convex하기 때문에 LogSumExp 기법으로 non-smooth를 해결한 뒤, Rayleigh quotient 형태로 재수식화하여 GPI 알고리즘을 통해 문제를 풀었다.

시뮬레이션을 통해 RSMA를 Spatial Division Multiple Access (SDMA)와 Regularized Zero Forcing (RZF)와 비교했다. 세 가지 방법 모두 GPI 알고리즘을 이용하였으며 결과는 다음과 같다.

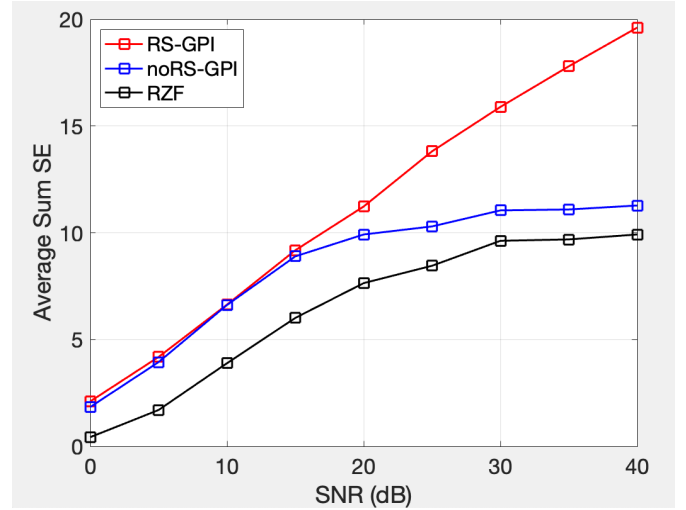


그림 1 N=6, K=4, L=100, common data 디코딩 에러율 = 10^{-8} , private data 디코딩 에러율 = 10^{-6} , SDMA와 RZF에서의 디코딩 에러율 = 10^{-8}

그림 1에서 볼 수 있듯이 RSMA가 기존의 두 가지 방법에 비해서 뛰어난 성능을 보임을 확인할 수 있다. 특히, SNR이 20dB인 시점부터는 SDMA보다 확연히 뛰어난 성능을 보인다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2022R1F1A1074391).

참고 문헌

- [1] G. Caire and S. Shamai, "On the achievable throughput of a multiantenna Gaussian broadcast channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 7, pp. 1691-1706, Jul. 2003.
- [2] M. Dai, B. Clerckx, D. Gesbert, and G. Caire, "A rate splitting strategy for massive MIMO with imperfect CSIT," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 7, pp. 4611-4624, 2016.
- [3] G. Durisi, T. Koch, and P. Popovski, "Toward massive, ultrareliable, and low-latency wireless communication with short packets," *Proc. IEEE*, vol. 104, no. 9, pp. 1711-1726, Sep. 2016.
- [4] Y. Polyanskiy, "Channel coding rate in the finite blocklength regime," *IEEE Trans. Info. Th.*, vol. 56, no. 5, pp. 2307-2359, May 2010.
- [5] C. Shen and H. Li, "On the dual formulation of boosting algorithms," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 32, no. 12, pp. 2216-2231, 2010.
- [6] Y. Cai, L.-H. Zhang, Z. Bai, and R.-C. Li, "On an eigenvector-dependent nonlinear eigenvalue problem," *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, vol. 39, no. 3, pp. 1360-1382, 2018.