

다중 셀 환경에서의 RSMA 를 위한 최적의 MIMO 전송 기법

이운진, 김홍석, 채찬병
서강대학교, 연세대학교

yj11@sogang.ac.kr, hongseok@sogang.ac.kr, cbchae@yonsei.ac.kr

Optimal MIMO Transmission for Rate-Splitting Multiple Access in Multi-cell Environments

Yoonjin Lee, Hongseok Kim, Chan-Byoung Chae
Sogang University, Yonsei University

요약

본 논문은 다중셀 MIMO 시스템 환경에서 RSMA (Rate-Split Multiple Access)를 위한 최적의 기법을 제안한다. 본 제안하는 기법은 기존의 iterative 한 기법의 반복성과 불확실성의 문제를 해결할 수 있다. 인접한 두 셀은 정보가 공유되어, Interference-Aware 한 Coordinative transmission 이라는 환경 아래, zero-interference 조건으로 precoder 와 decoder(postcoder)를 구했다. 본 제안하는 최적의 RSMA 의 MIMO 기법은 minimum mean squared error-interference rejection combining(MMSE-IRC) 기법과 sum rate 을 비교하여 성능이 좋을음을 보여준다.

I. 서론

최근 5 세대 통신 (5G)에서 space division multiple access (SDMA) 의 적용과 더불어, power domain 까지 추가한 non-orthogonal multiple access (NOMA) 가 나오면서 데이터 전송 속도 향상 기법에 대한 새로운 기술에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 그러나 NOMA 의 경우는 실제로는 이상적인 single-input single-output (SISO) 에서 효율이 제일 좋으며, 다중안테나 (multiple-input multiple-output, MIMO) 환경에서는 성능 저하가 발생한다.[1]

6G 로 가기 위해서는 반드시 절대적으로 요구하는 데이터량과 전송속도는 기존의 5G 보다 크며, 이에 따라 massive MIMO (mMIMO) 환경은 필연적이고, 이러한 환경에서 적합한 다중 액세스 기법으로 rate-splitting multiple access (RSMA) 가 주목받고 있다. 이는 보내야 하는 정보를 private (개인) 과 common (공통) 으로 분리하여 효율적으로 채널모델링이 가능해진다[1]. 또한 나아가서, RSMA 의 다중셀 환경에서의 coordinative transmission (협력 통신) 기술의 접목은 mMIMO 환경에서 채널 상태 정보는 절대적으로 중요한 상황에서 채널정보를 공유하는 것은 큰 장점이다[2][3].

기존의 RSMA 는 주로 MISO 환경에서 대부분 연구가 이루어졌지만, 현재 보급된 단말기는 복수개의 안테나로, 이에 대하여 어떠한 MIMO 기법이 최적인지는 알려져 있지 않다[2]. 특히, 송신기의 precoder 와 수신기의 postcoder/combiner 는 서로 연관되어 있어 그간 iterative 해법에 의존하였으며, 이 해법의 수렴 등은 아직 미해결 문제로 남아 있다. 이에 본 연구는 RSMA 의 최적의 MIMO 기법을 제시하며, 특히 다중셀 (multi-cell) 환경을 고려하여 해법을 제안한다. 제안하는 기술은 iterative 기법과 달리 계산 복잡도 역시 매우 낮아 실제 시스템에 적용하는데 문제가 없다. 2005년 이후 orthogonal multiple access (OMA) 환경에서 개발된 coordinated beamforming 을 뛰어 넘어

private/common 메시지 혼재 상황에서의 최적해를 보인 것에 의의가 크다고 할 수 있다.

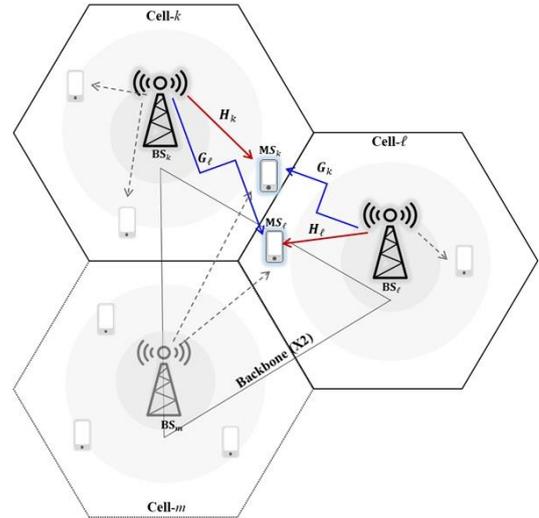


그림 1. RSMA in multi-cell environments

II. 본론

RSMA 는 하향링크 혹은 상향링크에서 모두 효율적인 기법으로, 보내고자 하는 메시지를 2 개 혹은 다중으로 나누어 정보를 전송하는 기법이다. 전송하는 정보를 나누어 처리하기 때문에 인접 셀로부터 오는 신호 중 일부는 노이즈 혹은 간섭으로 간주하였던 기존의 데이터처리가 아닌, 인접 셀간에 공유되는 common 한 정보로 수신하여, 단말기의 통신 성능을 높일 수 있다 (Interference-Aware). 본 논문은 private 정보와 common 정보로 분리하여 보내는 RSMA 를 다중셀 환경에서 셀간에 협력 송출할 때를 구성하였다.

II.1 MIMO System Model with RSMA

그림 1 과 같이 다중셀 MIMO 시스템 환경에서 기지국 (base station, BS) 은 개의 송신안테나로 구성되어 있고, 단말기 (mobile station, MS) N_t 는 N_r 개의 수신안테나로 구성되어 있다고 가정한다. $x_{p,k}$ 는 k 번째 기지국에서 보내는 private 신호이며, x_c 는 인접한 셀간에 공유하는 common 신호이다. k 번째 기지국과 k 번째 단말기 ($k=1\sim r$) 사이의 채널은 H_k 로 표현하며, ℓ 번째 기지국과 k 번째 단말기 ($k, \ell=1$ or $2, k \neq \ell$) 사이의 채널은 G_{ℓ} 로 정의하며, 이 두 채널 매트릭스 사이즈는 $N_r \times N_t$ 이다. k 번째 단말은 H_k 와 G_k 를 하향링크의 레퍼런스 심볼을 통해 추정 가능하며, k 번째 기지국은 이를 피드백 링크를 통해 알 수 있다. k 번째 단말기에 들어가는 백색잡음(AWGN)은 n_k 으로 표현했다.

k 번째 기지국에서 precoder 는 private 메시지와 common 메시지를 나누어 다르게 부호화해서 송출한다. 이는 $f_{p,k} \in C^{N_t \times 1}$ 는 private 메시지, $f_{c,k} \in C^{N_t \times 1}$ 는 common 메시지의 precoder 로 표현하였다. 이렇게 분리되어 송신된 신호는 단말기에서 각각 $w_{p,k} \in C^{N_r \times 1}$, $w_{c,k} \in C^{N_r \times 1}$ 로 표현된 postcoder 로 복호화한다. 이에 따라 이 시스템 모델에서의 k 번째 수신기에서 받은 신호는 $y_k = H_k f_{p,k} x_{p,k} + (H_k f_{c,\ell} + G_{\ell} f_{c,\ell}) x_c + G_{\ell} f_{p,\ell} x_{p,\ell} + n_k$ 로 표현할 수 있고, 수신단에서 필터를 거쳐 복원한 신호는 $\hat{x}_{p,k} = w_{p,k}^* y_k$, $\hat{x}_{c,k} = w_{c,k}^* y_k$ 이다.

이 때 precoder 와 postcoder 를 설계할때, 유념할 부분은 k 번째 단말기에 들어오는 ℓ 번째 기지국으로부터 전송된 common 메시지는 제거해야 할 데이터가 아닌 신호로 처리하는 것이다. 나아가 private 데이터의 postcoder 설계 시에는 k 번째 기지국에서 전송된 private 데이터 외에는 모두 간섭으로 간주한다. 이는 다음 2.2 절에서 최적의 기법을 찾는 데에 유용하다.

II.2 Precoder/Postcoder Design

Private 신호의 postcoder 인 $w_{p,k}$ 는 간섭이 없다는 조건(zero-interference)에서 SNR 이 0 으로, private 신호의 채널 이득을 최대화하는 방법으로 maximum ratio combining (MRC) 를 적용하여 아래와 같이 얻을 수 있다. 이는 zero-interference 조건에서 최적의 수신 기법이다:

$$w_{p,k} = \frac{H_k f_{p,k}}{\|H_k f_{p,k}\|}.$$

Private 신호의 precoder 는 zero-interference 조건과 위 수식을 통해, k 번째 수신기에서 받은 k 번째 송신기로부터 받은 private 신호와 ℓ 번째 송신기에서 보낸 private 신호는 직각관계가 된다. ($H_k f_{p,k} \perp G_{\ell} f_{p,\ell}$, $H_{\ell} f_{p,\ell} \perp G_k f_{p,k}$) 이에 따라 아래와 같은 generalized eigen (일반화된 고유법) 문제에서의 최적의 eigen vector 가 precoder 이다:

$$H_k^* G_{\ell} f_{p,\ell} = \lambda G_k^* H_{\ell} f_{p,\ell}.$$

Common 신호의 precoder 는 private 신호를 제거하기 위해 수직성을 이용하여 $w_{p,k} \perp (H_k f_{c,k} + \alpha_{\ell}^k G_{\ell} f_{c,\ell})$, 아래와 같이 설계할 수 있다:

$$f_{c,k} = \lambda_{c,k} A_k B_k f_{c,k}.$$

이때, $A_k = (f_{p,k}^* H_k^* H_k)^{\dagger} (f_{p,k}^* H_k^* G_{\ell})$, $B_k = (f_{p,\ell}^* H_{\ell}^* H_{\ell})^{\dagger} (f_{p,\ell}^* H_{\ell}^* G_k)$ 이고, $f_{c,k}$ 는 $(I_{N_t}, A_k B_k)$ 의 normalized eigenvector 이다.

마지막으로, common 신호의 postcoder 는 zero-interference 조건을 위해, private 신호를 무효화해야 하며,

이는 interference nulling common postcoder 이며, 아래와 같이 설계할 수 있다:

$$w_{c,k} = \frac{H_{\ell} f_{p,\ell} \times G_{\ell} f_{p,k}}{\|H_k f_{p,k}\| \|G_{\ell} f_{p,\ell}\|}.$$

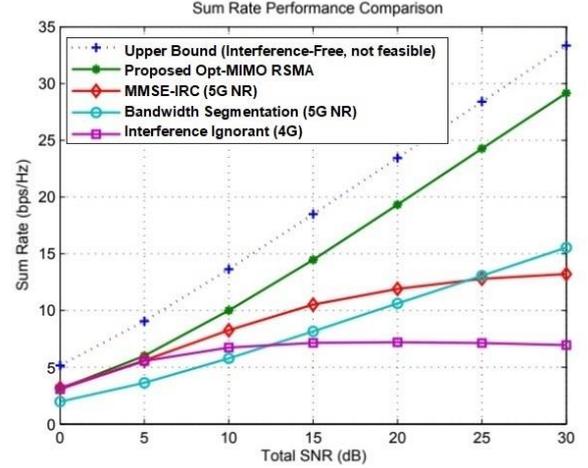


그림 2. Performance evaluation.

II.3 Performance Evaluations

제시한 다중셀에서 최적의 MIMO 기법을 적용한 RSMA 기술이 얼마나 효율적인지는 sum rate 을 통해 시뮬레이션 결과를 얻었으며, 기존의 기법인 MMSE-IRC 기법, bandwidth segmentation 기법과 성능을 비교해보았다. Sum rate 은 broadcast 채널과 multicast 의 혼합으로, $R_{sum} = [Y_{p,k} + Y_{p,\ell} + \min(Y_{c,k}, Y_{c,\ell})]$ 을 이용하였다. [4]

시뮬레이션 결과는 그림 2 와 같이 본 논문에서 제시한 Opt-MIMO RSMA 가 5G 에 적용되고 있는 기법보다도 성능이 좋음을 확인할 수 있다.

III. 결론

6G 에서 mMIMO 환경은 필연적이며, 이는 통신성능에 영향을 주는 채널 정보에 대한 중요도가 높아진다. 이에 따라 인접셀간에 협력통신에 용이한 RSMA 기법은 매우 유리하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 본 논문은 private 메시지와 common 메시지가 혼재되어 있는 다중셀 RSMA 환경에서 최적의 MIMO 송수신 기법을 제안하였다. 이는 그간 iterative 해법에 기반한 고 복잡도의 기술, 5G NR 에서 사용하는 MMSE-IRC, bandwidth segmentation 기법과 비교하여 우수한 성능을 보임을 확인하였다. 6G RSMA 환경에 최적의 해법을 제시한 것이 본 논문의 기여이다.

참 고 문 헌

- [1] Mishra, A. et al., "Rate-Splitting Multiple Access for 6G: Part I Principles Applications and Future Works," IEEE Comm. Lett., vol.26, Issue 10, pp. 2232-2236 (2022).
- [2] Clerckx, B. et al., "A Primer on Rate-Splitting Multiple Access Tutorial Myths and Frequently Asked Questions," IEEE JSAC, vol.41, Issue 5, pp.1265-1308 (2023).
- [3] Dahrouj, H. et al., "Coordinated beamforming for the multi cell multi-antenna wireless systems," IEEE Trans. Wirel. Commun., vol.9, Issue 5, pp. 1748-1759 (2010).
- [4] Jindal, N. et al., "Capacity limits of multiple antenna multicast," IEEE Int. Symp. Info. Th., July 2006, pp. 1841-1845