

하드웨어 잡음이 존재하는 Massive MIMO 시스템의 하향링크 간섭 분석

김진영, 최경준, 황해광, 권중형, 김광순*
연세대학교 전기전자공학과

{sugundori, kyungjun.choi, goodream, hwang819, ks.kim}@yonsei.ac.kr

Downlink Interference Analysis of Massive MIMO System with Hardware Impairments

Jin Young Kim, Kyung Jun Choi, Hae Gwang Hwang, Jung Hyoung Kwon, Kwang Soon Kim
Department of Electrical & Electronical Engineering, Yonsei Univ.

요약

본 논문에서는 massive MIMO 시스템에서 파일럿을 재사용 할 경우 하드웨어 잡음의 효과를 확인하고, 하향 링크에서의 간섭이 파일럿 재사용을 많이 할 수록 영향이 작아짐을 보였다. massive MIMO 시스템에서는 안테나 수에 비해 한정된 파일럿 자원으로 파일럿 재사용을 하는데, 이는 파일럿 오염을 유발하여 정확한 채널 추정이 불가하게 된다. 더불어, 현실적인 하드웨어의 각종 잡음들로 인해 채널 추정의 오차는 커지고, 이는 채널용량의 한계로 작용한다. 본 논문에서는 기지국의 안테나가 무한히 많은 massive MIMO 시스템에서 하드웨어 잡음이 존재할 경우 파일럿 재사용을 할 때 하향 링크에서의 신호간섭비의 CCDF 를 시뮬레이션으로 구했다. 시뮬레이션을 통해 파일럿 재사용 인수가 어느 정도 큰 경우 파일럿 재사용을 늘리기보다 하드웨어 잡음을 보정하는 것이 더 중요함을 확인할 수 있었다.

I. 서론

최근 데이터 트래픽의 수요는 연마다 급증하고 있으며, 이에 따라 채널 용량을 획기적으로 증가시킬 수 있는 무선통신기술들이 활발히 연구되고 있다. Massive MIMO 기술은 수신/송신단에서 매우 많은 안테나를 사용함으로써 공간적으로 많은 자유도를 얻을 수 있어서 채널 용량의 증대를 기대할 수 있다. 또한, 정확한 채널 정보 이용이 가능할 경우 간단한 matched filter (MF)만으로도 small-scale fading의 효과를 없앨 수 있다 [1]. 하지만 실제 전송환경에서는 증폭기의 비선형성, IQ 불균형, 상 잡음 등 하드웨어의 잡음이 존재하기 때문에 정확한 채널을 추정하는 것이 불가능하다 [3]. 이는 많은 안테나를 사용하여 저렴한 하드웨어를 사용하는 massive MIMO 시스템에서는 더욱 치명적이며, 특히 채널의 호혜성을 이용하는 시분할 방식 시스템에서는 자유도를 모두 활용하는 것이 어렵게 된다.

본 논문에서는 하드웨어 잡음이 있는 massive MIMO 시스템 모형을 설명하고, 파일럿 재사용과 하드웨어 잡음이 존재할 경우 신호잡음비의 CCDF 를 시뮬레이션으로 구했다. 기지국과 사용자의 위치는 Poisson Point Process (PPP)로 임의의 위치에 분포시켰으며, 시뮬레이션의 결과 일정 수준 이상에서는 파일럿 재사용보다는 하드웨어 잡음을 보정하는 것이 더 중요함을 확인했다. 따라서, 하드웨어 잡음 모형화에 대한 추가적인 연구 및 보정기술의 연구가 필요하다.

II. 시스템 모형

그림 1 은 본 논문에서 고려하는 massive MIMO 시스템의 모형이다. 네트워크는 시분할 다중접속 방식을 사용하며, 채널의 코히런스 시간 내에 상향 채널 추정, 하향 데이터 전송, 상향 데이터 전송의 순서로 통신이

이루어진다. 본 모형에서는 간섭을 주요한 요인으로 보고 열잡음은 고려하지 않는다.

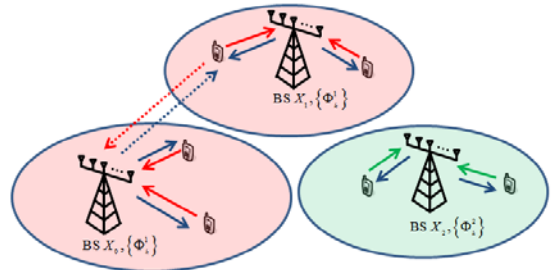


그림 1 Massive MIMO 시스템 모형

각 기지국 X_i 은 M 개의 안테나를 사용하며, 길이가 K 로 고정된 유니터리 행렬 $\{\Phi_k\}$ 을 파일럿 재사용 인수 N 으로 나눈 부집합 $\{\Phi_k^n\}_{1 \leq n \leq N, 1 \leq k \leq K/N}$ 을 사용한다. 각 기지국은 동시에 K/N 명의 사용자를 지원한다. 그림 1 에서 같은 파일럿 부집합을 사용하는 기지국들은 같은 색의 영역을 갖고 있다. 이 경우 파일럿 오염은 같은 부집합을 사용하는 기지국 내의 사용자들에게만 기인한다.

1 번째 기지국의 k 번째 사용자 $Y_i^{(k)}$ 는 n_i 번째 파일럿 부집합의 k 번째 파일럿을 사용하며 하나의 안테나를 갖고 있다. 이 때 X_i 과 $Y_i^{(k)}$ 간의 채널은 $\mathbf{h}_i^{(k)} = \sqrt{\beta_i^{(k)}} \mathbf{v}_i^{(k)}$ 인 열벡터로 정의된다. 여기서 $\beta_i^{(k)} = (r_i^{(k)})^{-\alpha}$ 은 거리에 따른 손실을, $\mathbf{v}_i^{(k)}(m) \sim \mathcal{CN}(0,1)$ 은 small-scale fading 을 나타낸다.

각 기지국과 사용자는 송신부와 수신부에 하드웨어 잡음을 갖고 있다. 이를 η 로 표기하며, 기지국일 경우 BS, 사용자의 경우 UE, 송신부일 경우 t, 수신부일 경우 r 로 구별한다. 각 잡음들은 송신/수신 전력에 비례한 분산을 가지며, 다음과 같이 모형화된다.

$$\begin{aligned} \eta_{t,l}^{UE,(k)} &= \left[\eta_{t,l}^{UE,(k)}(m) \right]_{m=1:K}, \eta_{t,l}^{UE,(k)}(m) \sim \mathcal{CN}\left(0, \kappa_{t,l}^{UE,(k)} \|\Phi\|^2\right) \\ \eta_{r,0}^{UE,(1)} &\sim \mathcal{CN}\left(0, \kappa_{r,0}^{UE,(1)} \|s\|^2 M \sum_l \beta_{l0}^{(1)}\right) \\ \eta_{r,l}^{BS} &= \left[\eta_{r,l}^{BS}(m) \right]_{m=1:K}, \eta_{r,l}^{BS}(m) \sim \mathcal{CN}\left(0, \kappa_{r,l}^{BS} \|\Phi\|^2 \sum_{k,l'} \beta_{ll'}^{(k)} \mathbf{I}_M\right) \\ \eta_{t,l}^{BS} &\sim \mathcal{CN}\left(0, \kappa_{t,l}^{BS} \|s\|^2 \mathbf{I}_M\right) \end{aligned}$$

$\kappa_{t,l}^{UE,(k)}, \kappa_{r,l}^{UE,(k)}, \kappa_{t,l}^{BS}, \kappa_{r,l}^{BS}$ 은 3GPP LTE 에서 요구하는 EVM 요구사항에 따른 상수로, 본 논문에서는 각 기지국과 사용자가 $(0, 0.15^2)$ 범위 내에서 값을 갖도록 설정했다.

M 이 무한히 증가할 때, 하드웨어 잡음이 없는 경우 신호간섭비의 분포는 다음과 같다 [1].

$$\text{SIR}_{DL} \xrightarrow{a.s.} \frac{(\beta_{00}^{(1)})^2}{\sum_{l \neq 0} (\beta_{l0}^{(1)})^2}$$

하드웨어 잡음과 파일럿 재사용을 고려한 경우, 하향 데이터 전송 단계에서 신호간섭비는 다음과 같다.

$$\text{SIR}_{DL} \xrightarrow{a.s.} \frac{(\beta_{00}^{(1)})^2}{\sum_{l \in N_{r,0}} (\beta_{l0}^{(1)})^2 + \frac{K}{N} \kappa_{t,0}^{UE,(1)} \sum_l (\beta_{l0}^{(1)})^2}$$

[2]의 결과와 같이, BS 의 하드웨어 잡음은 점근적으로 사라지며, 사용자의 송신부 잡음이 간섭에 영향을 미친다. 또한, 이는 주파수 재사용 인수를 크게 함으로써 줄이는 것이 가능하다.

III. 모의 실험

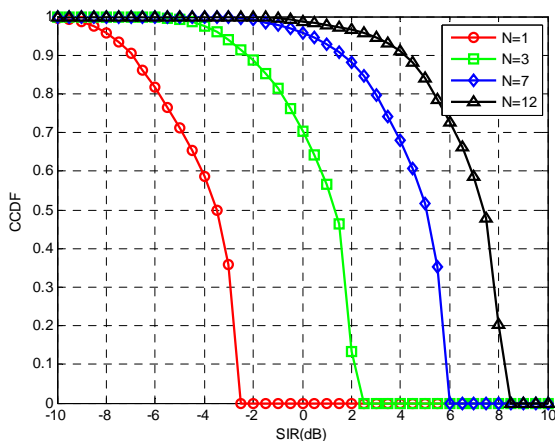


그림 2 K가 고정일 때 N에 따른 SIR CCDF

평균적으로 기지국이 20 개가 존재하는 지역에서 K=42 인 경우를 고려하여 시뮬레이션을 진행했다. 그림 2 는 $\kappa_{r,0}^{UE,(1)} = 0.15^2$ 로 고정하고, 주파수 재사용 인수 N 을 증가시켰을 때의 CCDF 를 구한 결과이다. 재사용 인수를 증가시키에 따라 사용자들의 신호간섭비는

증가하지만, N 이 커질수록 성능 개선의 비율은 감소하게 된다.

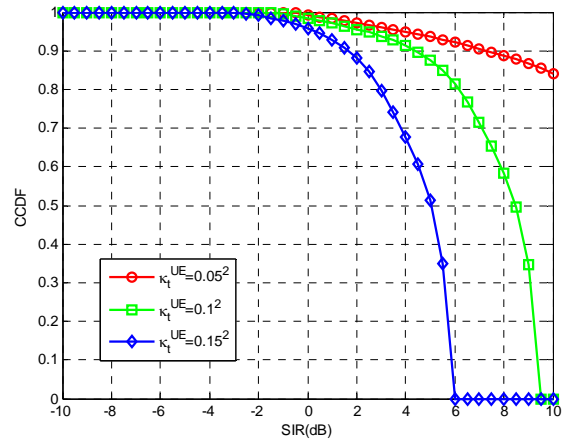


그림 3 N이 고정일 때 K에 따른 SIR CCDF

그림 3 은 파일럿 재사용 인수 N 이 7 일 때 $\kappa_{t,0}^{UE,(1)}$ 의 변화에 따른 CCDF 그래프이다. 결과에서 알 수 있듯이, 매우 작은 $\kappa_{t,0}^{UE,(1)}$ 의 변화에도 사용자의 성능에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 따라서, 이미 N 이 어느 정도 증가한 상황에서는 N 의 증가보다 오히려 하드웨어 잡음 보정이 SIR 성능 향상에 더 도움이 됨을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 하드웨어 잡음이 있는 massive MIMO 시스템 하향 링크에서 단말기의 송신 잡음만이 간섭에 영향을 미치며, 이는 파일럿 재사용으로 극복할 수 있음을 보였다. 하지만 이는 한 기지국이 지원하는 사용자의 수를 줄이는 것이기 때문에, 결과적으로 전체 채널 용량은 감소하게 된다. 또한, N 이 이미 큰 상황에서는 하드웨어 보정이 성능향상에 더 도움을 준다. 따라서, 추가적으로 잡음을 보정하는 기술의 개발이 필요할 것으로 보인다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 미래부가 지원한 2013 년 정보통신 • 방송(ICT) 연구개발사업의 연구결과로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 30, no. 1, pp. 40–60, Jan. 2013.
- [2] E. Bjornson, J. Hoydis, M. Kountouris, and M. Debbah, "Massive MIMO systems with non-ideal hardware: energy efficiency, estimation, and capacity limits," Submitted to *IEEE Trans. Inf. Theory*, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1307.2584>.
- [3] T. Bai and R. W. Heath, Jr., "Asymptotic coverage probability and rate in massive MIMO networks," Submitted to *IEEE Wireless Commun. Lett.*, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1305.2233>.