

저해상도 양자화기를 고려한 Full-Duplex MIMO 시스템의 성능 분석 실험

유승형[°], 박석준, 오민택, 최진석

울산과학기술원 전기전자공학과, 한국과학기술원 전기 및 전자공학부

seunghy@unist.ac.kr, sj.park@kaist.ac.kr, ohmin@kaist.ac.kr, jinseok@kaist.ac.kr

1. 서론

현대 무선 통신은 스펙트럼 효율과 에너지 효율의 향상을 중요한 과제로 직면하고 있으며, 이를 동시에 해결할 해결책으로 저해상도 양자화기를 고려한 full-duplex 기술이 활발히 연구되고 있다. 특히, 심각한 문제를 야기하는 자체간섭 (self-interference)을 완화하기 위한 다양한 아날로그 및 디지털 처리 방법들이 제안되었다 [1]. 이는 half-duplex 시스템에서의 양자화 잡음에 대한 분석과는 달리, ADC 양자화 잡음에 대한 자세한 분석이 필요하며, 동시에 아날로그 및 디지털 처리 방법의 영향을 고려한 연구의 필요성을 입증한다. 본 논문에서는 저해상도 ADC 및 DAC, ADC 동작 범위, 아날로그 및 디지털 처리 방법의 영향을 모두 고려하여 full-duplex MIMO 시스템에서의 성능을 분석한다.

2. 시스템 모델 및 시뮬레이션 결과

N_t 개의 송신 안테나, N_r 개의 수신 안테나를 갖는 기지국과 K_D 명의 하향링크 유저, K_U 명의 상향링크 유저가 존재하는 저해상도 full-duplex MIMO 시스템을 고려한다. 하향링크에서는 프리코더를 통과한 디지털 심볼 벡터를 $\mathbf{x}_D = \mathbf{W}\mathbf{s}_D$ 로 정의한다. 이후, \mathbf{x}_D 는 AQNM [2]을 기반으로 양자화되어 전송되는데, 동시에 채널간 간섭의 영향이 더해져 전송된다. 반면, 상향링크에서는 기지국에서 상향링크 유저의 심볼 벡터 \mathbf{s}_U 와 자체간섭 신호를 동시에 수신하는데, 아날로그 자체간섭 제거과정 이후 ADC에서 양자화가 된 다음, 디지털 자체간섭 제거과정과 컴바이너 \mathbf{F} 를 거친다. 따라서, 하향링크 및 상향링크의 각 유저 k 에 대한 전송률은 아래의 $R_{D,k}$ 와 $R_{U,k}$ 로 정의된다.

$$R_{D,k}(\mathbf{W}) = \log_2(1 + \text{SQINR}(b_{\text{DAC}}, \mathbf{W})),$$

$$R_{U,k}(\mathbf{W}, \mathbf{F}) = \log_2(1 + \text{SQINR}(b_{\text{ADC}}, b_{\text{DAC}}, \mathbf{W}, \mathbf{F}, \sigma_{\text{SI}}^2)).$$

각 링크의 SQINR은 ADC 및 DAC 비트, 프리코더 및 컴바이너, 아날로그 자체간섭 제거능력 σ_{SI}^2 의 함수이다. ADC의 동작 범위는 ADC 비트 수에 대한 함수 $DR(b_{\text{ADC}}) \approx 20 \log(\sqrt{3/2} \cdot 2^{b_{\text{ADC}}})$ 로 근사화 할 수 있으며 [3], 이를 바탕으로 고려된 시스템에서의 성능 분석을 진행한다.

시뮬레이션 세팅은 $N_t = N_r = 8$, $K_D = K_U = 4$, $P_D = 24 \text{dBm}$, $P_U = 23 \text{dBm}$ 이며, 프리코더와 컴바이너는 각각 RZF와 LMMSE 수신기를 사용한다.

그림 1은 ADC 및 DAC 양자화 비트 수에 따른 총 합 스펙트럼 효율의 변화를 나타낸다. Full-duplex 알고리즘의 총 스펙트럼 효율은 half-duplex 알고리즘 (HD) qWMMSE & qMMSE와 비교했을 때, 아날로그

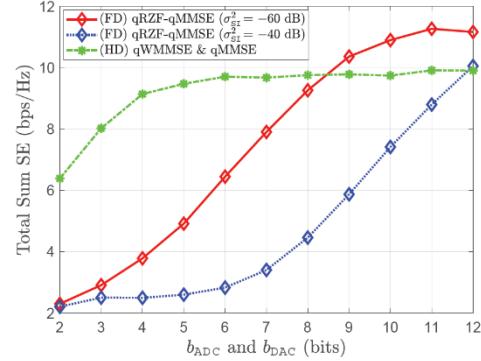


그림 1. 양자화 비트 수에 따른 총합 데이터 속도 자체간섭 제거능력에 따라서 각각 9 비트 ($\sigma_{\text{SI}}^2 = -60 \text{dB}$) 및 12 비트 ($\sigma_{\text{SI}}^2 = -40 \text{dB}$) 이상에서 우수한 성능을 보이고 있다. 결론적으로, full-duplex 시스템에서는 half-duplex 시스템과 비교하여 더욱 높은 비트 수에서 성능 포화를 겪을 수 있으며, $\sigma_{\text{SI}}^2 = -60 \text{dB}$ 을 기준으로 half-duplex의 성능을 뛰어넘기 위해서 최소 9 비트 이상이 필요하다. 이는 고려된 시스템에 국한된 결과이므로, 추후 더욱 포괄적인 시스템에서의 자세한 연구가 필요하다.

3. 결론

본 논문에서는 저해상도 양자화기를 고려한 full-duplex MIMO 시스템에서 아날로그 및 디지털 자체간섭 처리 능력에 따른 스펙트럼 효율을 분석했다. Half-duplex 시스템의 성능을 뛰어넘기 위해서는 기존의 half-duplex에서 사용하는 비트 수에 비해 더욱 많은 비트가 필요함을 보여주었다.

4. ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터사업의 연구결과로 수행되었음" (IITP-2023-RS-2023-00259991)

5. 참고 문헌

- [1] M. Duarte, C. Dick, and A. Sabharwal, "Experiment-Driven Characterization of Full-Duplex Wireless Systems," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 11, no. 12, pp. 4296–4307, 2012.
- [2] A. K. Fletcher, S. Rangan, et al, "Robust Predictive Quantization: Analysis and Design Via Convex Optimization," IEEE J. Sel. Topics Signal Process., vol. 1, no. 4, pp. 618–632, 2007.
- [3] R. H. Walden, "Analog-to-Digital Converter Survey and Analysis," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 17, no. 4, pp. 539–550, 1999.