

양자화 효과를 고려한 환경에서 비직교 다중 접속 시스템의 성능분석

임도규[°] 정희상^{°°}

한국전자통신연구원 6G무선엑세스시스템연구실^{°°°}

dglim@etri.re.kr hschung@etri.re.kr

Performance Analysis of Non-Orthogonal Multiple Access Systems under Quantization Effects

Lim Dogyu[°] Heesang Chung^{°°}

Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

본 논문에서는 저해상도 ADC/DAC 환경에서 NOMA 시스템의 성능을 분석하기 위해 AQNM 기반 Q-NOMA 모델을 고려한다. 이상적인 NOMA 시스템과의 공정한 비교를 위해 동일한 빔포머를 사용하여 SINR 표현식 차이에 따른 성능 변화를 분리하여 분석하였다. 이를 통해 양자화 잡음과 신호 왜곡 항이 시스템 성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 또한 Q-NOMA 환경을 고려한 최적 빔포머를 적용함으로써, 저해상도 ADC/DAC 환경에서도 QoS 요구사항을 만족할 수 있음을 수치적으로 확인하였다.

I. 서론

비직교 다중 접속(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)은 동일한 시간 및 주파수 자원을 다수의 사용자가 공유함으로써 주파수 효율을 향상시킬 수 있는 기술로, 5G-Advanced 및 차세대 6G 이동통신 시스템에서 유망한 다중 접속 기법으로 주목받고 있다. NOMA 시스템에서는 사용자 간 채널 상태 정보(Channel State Information, CSI)를 기반으로 서로 다른 전력을 할당하고, 수신단에서 순차적 간섭 제거(Successive Interference Cancellation, SIC)를 수행함으로써 각 사용자의 신호를 복호한다. 일반적으로 채널 상태가 양호한 사용자는 채널 상태가 열악한 사용자들의 신호를 먼저 복호 및 제거한 후 자신의 신호를 마지막으로 복호하게 되며, 이러한 SIC 과정의 성공 여부는 사용자 간 전력 할당 전략에 크게 의존한다. 따라서 NOMA 시스템의 성능을 극대화하기 위해서는 효율적인 전력 제어 및 빔포밍 설계가 필수적이다.

아날로그-디지털 변환기(Analog-to-Digital Converter, ADC)와 디지털-아날로그 변환기(Digital-to-Analog Converter, DAC)는 무선 통신 송·수신단에서 필수적으로 사용되는 핵심 하드웨어 모듈이다. 일반적으로 상용 통신 시스템에서는 약 7~8비트 해상도의 ADC/DAC가 사용되는 것으로 알려져 있으나, 하드웨어의 물리적 특성상 해상도 비트 수가 증가할수록 소모 전력은 지수적으로 증가하는 경향을 보인다. 이러한 전력 소모 문제는 기지국 및 단말의 에너지 효율을 제한하는 주요 요인으로 작용하며, 이에 따라 최근에는 통신 성능 저하를 감수하더라도 ADC/DAC의 해상도 비트 수를 낮추어 전력 효율을 향상시키고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

기존 NOMA 기술을 다룬 논문들에서는 이러한 양자화 효과를 무시했지만, [1]에서는 이러한 양자화 효과를 분석하기 위해 Additive Quantization Noise Model (AQNM)을 기반으로 한 Q-NOMA 모델 수식인 Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR) 및 사용자 Rate 수식이 제안되었다. 해당 모델은 양자화로 인한 왜곡을 선형 스케일링 계수

와 추가적인 잡음 항으로 근사함으로써 저해상도 ADC/DAC 환경에서도 비교적 간단한 수학적 분석을 가능하게 한다. 나아가 이러한 상황에서 최적 빔포머를 수학적 모델로 만들었다.

본 연구에서는 [1]에서 제안한 시스템 모델의 성능 분석을 수행하고, 빔포머를 사용한 QoS 달성을 확인해, 이상적인 하드웨어 환경과 비교하여 양자화가 요구 송신 전력 및 시스템 성능에 미치는 영향을 정량적으로 규명하고자 한다.

II. 본론

[2]에서는 다중 안테나 송신기와 단일 안테나 수신기를 고려한 MISO-NOMA (Multiple-Input Single-Output Non-Orthogonal Multiple Access) 시스템을 분석하고, 해당 시스템에서의 사용자별 SINR을 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$\frac{\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H \mathbf{h}_k}{\sigma^2 + \sum_{j=1}^{k-1} \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_j \mathbf{w}_j^H \mathbf{h}_k} \quad \text{식(1)}$$

식(1)에서 \mathbf{h}_k 는 사용자 채널 벡터, \mathbf{w}_k 는 사용자 빔포밍 벡터, σ^2 는 수신단에서의 간섭 및 잡음의 분산을 나타낸다.

이때 각 사용자의 SINR은 채널 벡터와 빔포밍 벡터 간의 내적을 기반으로 표현되며, 순차적 간섭 제거(SIC) 순서에 따라 간섭 항이 결정된다. 또한 사용자별 QoS (Quality of Service) 요구사항을 만족하기 위한 최적 빔포밍 벡터는 채널 상태 정보(Channel State Information, CSI)와 최소 SINR 제약에 따라 달라지며, [2]에서는 이러한 QoS 제약 하에서의 최적 빔포밍 벡터를 폐형식(closed-form)으로 도출하였다. 본 연구에서는 이상적인 하드웨어 환경에서 도출된 해당 최적 빔포밍 벡터를 기준 빔포머로 활용한다.

실제 통신 시스템에서는 송신단의 DAC 및 수신단의 ADC에서 발생하는 양자화 오차를 무시할 수 없으며, 이러한 하드웨어 비이상성을 반영하기

위해 [1]에서는 Additive Quantization Noise Model (AQNM)을 기반으로 한 Q-NOMA 시스템을 제안하였다. AQNM에서는 양자화 효과를 선형 스케일링 계수와 추가적인 양자화 잡음 항으로 근사함으로써, 저해상도 ADC/DAC 환경에서도 SINR의 분석적 표현을 가능하게 한다. 이에 따라 ADC/DAC의 양자화 영향을 고려한 사용자 k의 SINR은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\frac{\gamma_k^2 |\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{f}_k|^2}{\gamma_k^2 \sum_{i=1}^{k-1} |\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{f}_i|^2 + \gamma_k^2 \mathbf{h}_k^H \mathbf{R}_q \mathbf{h}_k + \gamma_k^2 \sigma^2 + \gamma_k \theta_k \mathbb{E}[y_k y_k^H]} \quad \text{식(2)}$$

식 (2)에서 \mathbf{h}_k 는 사용자 채널 벡터, \mathbf{f}_k 는 사용자 빔포밍 벡터, γ_k 는 ADC에 의한 factor, Φ 와 \mathbf{R}_q 는 DAC에 의한 factor, y_k 는 수신 신호를 의미한다. 식 (2)는 이상적인 하드웨어 환경에서의 SINR 표현식인 식 (1)에 비해, ADC/DAC 양자화로 인한 신호 감쇠 및 추가 잡음 항이 포함된 형태임을 확인할 수 있다.

[2]에서 제안한 빔포머로 두 시스템에서 동일하게 고정함으로써, SINR 표현식의 차이로부터 발생하는 성능 변화를 분리하여 분석하였다. 이러한 설정을 통해 양자화 잡음 및 신호 왜곡 항이 추가됨에 따라 SINR이 어떻게 변화하는지를 명확히 관찰할 수 있다. 또한 동일한 빔포머를 기반으로 비교함으로써, Q-NOMA 환경에서 기존 이상적 NOMA 설계가 갖는 한계를 보다 직관적으로 확인할 수 있다. 나아가 [1]에서 제안된 최적 빔포머를 사용하여, 이상적인 NOMA 시스템과 ADC/DAC를 고려한 Q-NOMA 시스템 간 성능 비교를 수행하였다.

III. 결론

QoS는 사용자 당 1 [bps/Hz]로 설정했고, 그림 1,3은 Rayleigh 페이딩 채널 환경에서의 결과를 나타내며, 그림 2,4는 Rician 페이딩 채널을 사용한 결과로 Rician factor는 5로 설정하였다. 사용자 수는 2명, 전송 안테나 수는 4개로 설정하였고, DAC와 ADC의 해상도 비트 수는 동일하게 DAC = ADC ∈ {1,2,...,8}로 가정했다.

그림 1과 2에서 확인할 수 있듯이, [2]에서 제안된 최적 빔포머를 그대로 적용할 경우 AQNM 모델 하에서는 QoS 요구사항을 만족하지 못함을 확인할 수 있다. 반면, [1]에서 제안한 Q-NOMA 빔포머를 적용하면, 양자화 오류가 존재하는 환경에서도 QoS를 안정적으로 달성한다.

또한 그림 3과 4에서는 AQNM 시스템에서 QoS 달성을 위해 요구되는 빔포밍 전력을 비교하였다. 특히, 비트 수가 1인 경우 QoS를 만족하기 위해 필요한 Q-NOMA 빔포밍 전력은 각각 9.2 W와 8.8 [W]임을 수치적으로 확인하였다.

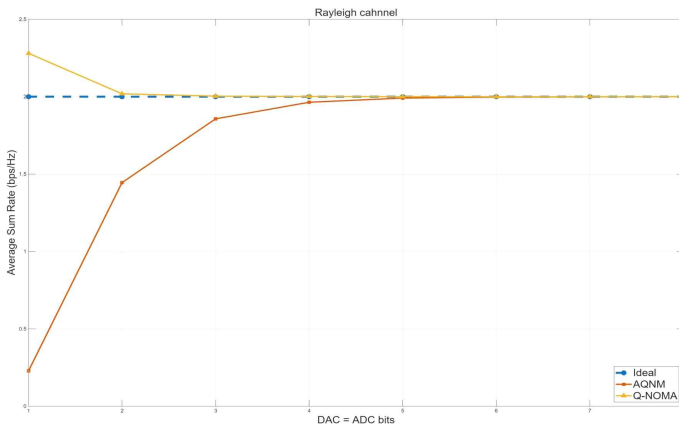


그림1. Rayleigh channel에서의 Average sum rate

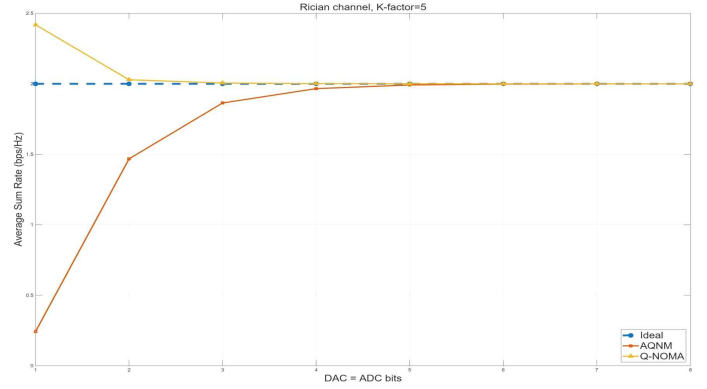


그림2. Rician channel에서의 Average sum rate

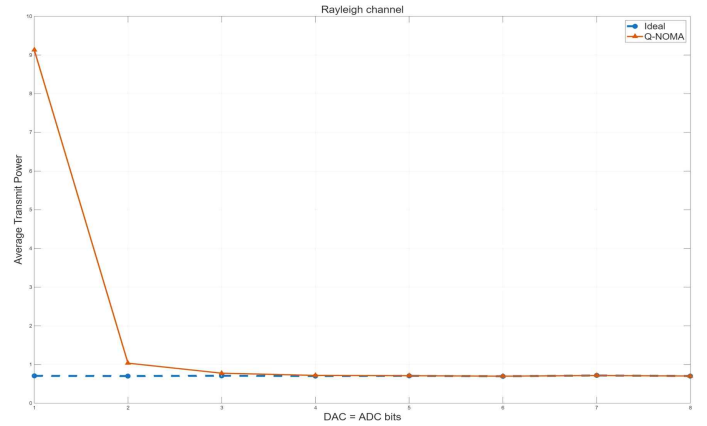


그림3. Rayleigh channel에서의 Total transmit power

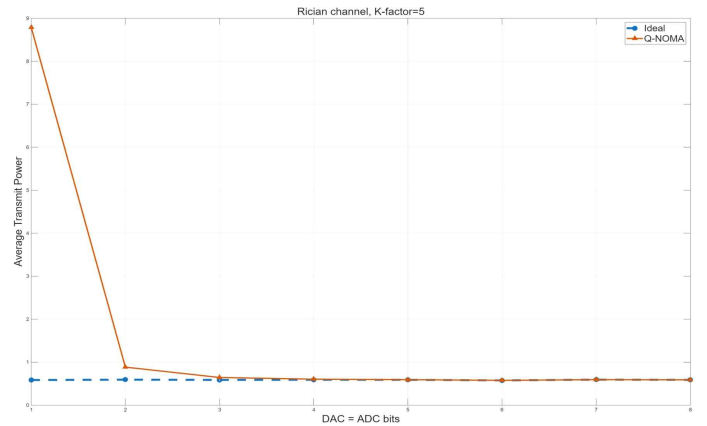


그림4. Rician channel에서의 Total transmit power

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00216221, 지능형 재구성 안테나 기반 5G-Advanced 이동통신 서비스 커버리지 확대 기술 개발).

참 고 문 헌

- [1] Lim, Dogyu, Jeongbin Kim, and Moonsik Min. "Optimized Beamforming for Multi-Antenna Downlink NOMA With Low-Resolution DACs and ADCs." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (2025).
- [2] Zhu, Jianyue, et al. "On optimal beamforming design for downlink MISO NOMA systems." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 69.3 (2020).