

# 제한된 피드백 Massive MIMO Rician 페이딩 채널 환경에서 사용자 거리에 따른 양자화 오차 성능 분석

강진호, 최완\*

한국과학기술원, \*서울대학교

jinho\_kang@kaist.ac.kr, \*wanchoi@snu.ac.kr

## Performance Analysis on Quantization Error according to User Distance in Massive MIMO Rician Fading Channels with Limited Feedback Environment

Jinho Kang, Wan Choi\*

Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST),

\*Seoul National University (SNU)

요약

최근 6G 이동통신 시스템의 핵심 기술로서 Massive MIMO 시스템에 관한 관심이 높아지고 있으며, Massive MIMO 시스템과 밀리미터파 대역의 물리적인 특성인 Line-of-Sight (LoS) 성분이 반영된 공간적 채널 모델로서 Rician 페이딩 채널 환경에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. LoS 성분과 non-LoS (NLoS) 성분으로 구성된 Rician 페이딩 채널 환경에서 대규모 안테나로부터 발생하는 피드백 오버헤드를 저감 하기 위해서는 LoS 성분 크기에 따른 효율적인 채널 상태 정보 양자화가 필요하며, 이때 채널 방향 정보의 양자화 오차 (Quantization error) 성능은 기지국과 사용자 간의 거리에 영향을 받는다. 본 연구에서는 Massive MIMO 시스템에서 통신 성능을 극대화하기 위한 셀 설계 및 셀 커버리지 분석을 위해 Rician 페이딩 채널 양자화를 위한 효율적인 코드북을 활용하여 기지국과 사용자 거리에 따른 양자화 오차 성능을 분석한다.

### I. 서론

Massive multiple-input multiple-output (MIMO) 시스템은 6G 이동통신 시스템과 군 전술 통신망 등 차세대 무선통신 시스템의 핵심 기술로서 고려되고 있다 [1,2]. 기지국에서 대규모 안테나를 사용하는 Massive MIMO 시스템은 간단한 선형 송수신기를 기반으로 사용자 간의 간섭을 거의 완벽히 제거할 수 있지만, 기지국에서 정확한 채널 상태 정보를 획득하는 것이 중요하다 [1]. 주파수 분할 방식 (Frequency Division Duplex, FDD)의 Massive MIMO 시스템에서는 기지국이 채널 상태 정보를 얻기 위해 사용자로부터 피드백을 받는다 [2]. 하지만, 정확한 채널 상태 정보를 얻기 위해서는 대규모 안테나로 인한 대량의 피드백 오버헤드가 발생한다. 이러한 피드백 오버헤드 문제를 극복하기 위해서는 채널 통계 (Channel statistics)를 활용한 효율적인 코드북 활용이 필요하다 [3].

한편, Massive MIMO 시스템과 밀리미터파 대역 시스템의 물리적인 특성인 Line-of-Sight (LoS) 성분이 반영된 공간적 채널 모델 (Spatial Channel Model, SCM)로서 Rician 페이딩 채널이 폭넓게 고려되고 있다. 이러한 Rician 페이딩 채널 환경에서 피드백 오버헤드 저감을 위해서는 채널 상태 정보 양자화 시 LoS 성분과 non-LoS (NLoS) 성분을 모두 고려해야 하며, LoS 성분 크기에 따른 효율적인 채널 상태 정보 양자화가 필요하다 [3]. 이와 더불어, Rician 페이딩 채널에서 LoS 성분과 NLoS 성분 크기를 나타내는 통계적 성분인 Rician factor는 주로 기지국과 사용자 간의 거리에 의해 영향을 받는다 [4]. 이로 인해, Rician 페이딩 채널 환경에서 채널 방향 정보의 양자화 오차 (Quantization Error) 성능은 기지국과 사용자 간의 거리에 따라 달라진다. 따라서, Rician 페이딩 채널 환경의 FDD Massive MIMO 시스템에서 통신 성능을 극대화하기 위한 셀 설계 (Cell Planning) 및 셀 커버리지 (Cell Coverage) 분석 시 기지국과 사용자 거리에 따른 양자화 오차를 고려해야 한다. 이를 위해, 본 논문에서는 제한된 피드백 (Limited feedback) Massive MIMO Rician 페이딩 채널

환경에서 LoS 성분 크기에 따른 효율적인 채널 상태 정보 양자화 코드북을 활용하여 기지국과 사용자 거리에 따른 양자화 오차 성능을 분석한다.

### II. 본론

#### 가. 시스템 모델

본 논문에서는  $M$  개의 대규모 안테나로 구성된 기지국이 한 개의 안테나를 가지는  $U$  명의 사용자를 지원하는 단일 셀 Massive MIMO 시스템을 고려한다. 기지국에서 전송하는 데이터를  $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_U]$ , 선형 프리코더를  $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_U]$  라 하면,  $u$  번째 ( $u \in \mathbf{U} = \{1, \dots, U\}$ ) 사용자가 수신하는 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y_u = \sqrt{\gamma_u} \mathbf{h}_u^\dagger \mathbf{v}_u s_u + \sum_{l \in \mathbf{U} \setminus u} \sqrt{\gamma_u} \mathbf{h}_u^\dagger \mathbf{v}_l s_l + n_u \quad (1)$$

위 식에서  $\gamma_u$ 와  $\mathbf{h}_u \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 각각 경로 손실에 따른 수신전력과 채널 벡터이며,  $n_u$ 는 복소 가우시안 잡음이다.

기지국은 프리코더 설계를 위한 채널 상태 정보를 얻기 위해 다음과 같이 각 사용자로부터 채널 방향 정보를 피드백 받는다.

$$\hat{\mathbf{h}}_u = \arg \max_{\mathbf{c} \in \mathbf{C}_u} |\hat{\mathbf{h}}_u^\dagger \mathbf{c}|^2, \forall u \in \mathbf{U} \quad (2)$$

위 식에서  $\tilde{\mathbf{h}}_u = \mathbf{h}_u / \|\mathbf{h}_u\|$ 이며,  $\mathbf{C}_u = \{\mathbf{c}_{u,1}, \dots, \mathbf{c}_{u,2^B}\}$ 는 기지국과 사용자 간 공유한  $B$  비트의 채널 방향 정보 코드북이다. 식 (2)로부터 얻은  $u$  번째 사용자의 채널 방향 정보의 양자화 오차는 다음과 같이 정의된다.

$$Z_u = 1 - |\hat{\mathbf{h}}_u^\dagger \tilde{\mathbf{h}}_u|^2 \in [0, 1] \quad (3)$$

#### 나. Rician 페이딩 채널 환경에서 사용자 거리에 따른 양자화 오차 성능 분석

본 논문에서는 Massive MIMO 시스템과 밀리미터파 대역 시스템의 채널 특성인 LoS 성분이 반영된 공간적 채널 모델로서 폭넓게 쓰이는 Rician 페이딩 채널 환경을 고려한다. 사용자  $u$ 의 Rician 페이딩 채널은 결정론적 (Deterministic) LoS 성분과 랜덤한 Non-LoS (NLoS) 성분으로 다음과 같이 구성된다.

$$\mathbf{h}_u = \sqrt{\frac{K_u}{K_u+1}} \mathbf{h}_u^{\text{LoS}} + \sqrt{\frac{1}{K_u+1}} \mathbf{h}_u^{\text{NLoS}} \quad (4)$$

위 식에서  $K_u$ 는 LoS 성분과 NLoS 성분 크기의 비율을 나타내는 Rician factor이며,  $\mathbf{h}_u^{\text{LoS}}$ 는  $\|\mathbf{h}_u^{\text{LoS}}\|^2 = M$ 을 만족하는 LoS 성분이다.  $\mathbf{h}_u^{\text{NLoS}}$ 의 각 성분은 독립적인 복소 가우시안, 즉,  $CN(0,1)$ 를 따른다.

식 (4)를 통해 Rician 페이딩 채널의 분포는  $\mathbf{h}_u^{\text{LoS}}$ 와  $K_u$ 의 영향을 받을 수 있다. Rician 페이딩 채널 환경에서 대규모 안테나에 의한 피드백 오버헤드를 저감하기 위해서는 효과적인 채널 방향 정보 양자화를 위해 Rician 페이딩 채널의 통계적 정보인  $\mathbf{h}_u^{\text{LoS}}$ 와  $K_u$ 를 활용하여야 한다 [3]. 이때,  $\mathbf{h}_u^{\text{LoS}}$ 의 경우는 고정된  $K_u$ 에 대해서 Rician 채널의 분포를 동일한 분포를 갖도록 회전시킨다. 반면, LoS 성분과 NLoS 성분 크기의 비율을 나타내는  $K_u$ 는 Rician 채널, 즉,  $\mathbf{h}_u$ 의 분포를 직접 변화시키므로, 채널 방향 정보를 효율적으로 양자화하기 위해서는  $K_u$ 에 적응적인 (Adaptive) 코드북이 필요하다 [3]. 이와 같이, Rician 페이딩 채널 방향 정보의 효율적인 양자화를 위해, NLoS 성분 피드백 방법 (NLoS component feedback method), 왜곡된 코드북 (Skewed codebook), 그리고 밴드 구조의 비균질 코드북 (Band-structured Non-homogeneous codebook)을 활용할 수 있다 [3].

결정론적 성분인  $\mathbf{h}_u^{\text{LoS}}$ 와  $K_u$ 는 다음과 같이 주로 사용자의 위치에 따라 결정된다.  $\mathbf{h}_u^{\text{LoS}}$ 는 기지국의 안테나 어레이 (Antenna array) 구조와 기지국과 사용자 간의 방위각 (Angle-of-departure, AoD)에 의해 결정된다. 한편,  $K_u$ 는 주로 기지국과 사용자 간의 거리에 의해 영향을 받는다. 특히나 3GPP (Third Generation Partnership Project) 표준의 MIMO 시뮬레이션에 의한 공간적 채널 모델을 위한 기술보고서 (Technical Report)에서는, 도시 마이크로 셀 (Urban Micro Cell) 시나리오에서 거리에 따른 Rician factor의 영향을 단순화된 버전 (Simplified version)으로 묘사하기 위해 아래와 같은 표현을 고려한다 [3].

$$K_u = 13 - 0.03d_u \quad (\text{dB}) \quad (5)$$

위 식에서  $d_u$ 는 기지국과  $u$  번째 사용자 간의 거리 (m)를 나타낸다. 위 수식에서 알 수 있듯이 Rician factor는 사용자의 거리에 직접적인 영향을 받는다. 따라서, 본 연구에서는 Rician 페이딩 채널 환경 FDD Massive MIMO 시스템에서 통신 성능을 극대화하기 위한 셀 설계 및 셀 커버리지 분석을 위해 Rician 페이딩 채널 환경에서 LoS 성분 크기에 따른 효율적인 채널 상태 정보 양자화 코드북을 활용하여 식 (5)를 기반으로 기지국과 사용자 간의 거리에 따른 양자화 오차 성능을 모의실험을 통해 다음과 같이 분석한다.

모의실험에서는 64개의 대규모 안테나로 구성된 기지국이 단일 안테나로 구성된 사용자를 서비스하는 단일 셀 Massive MIMO 환경을 고려하였다. 기지국에서는  $8 \times 8$ 의 균일 평면 배열 안테나 (Uniform planar array) 어레이를 고려하였으며, 사용자의 수직 및 수평 방위각을  $45^\circ$ , 피드

백 양을 10 비트인 환경을 고려하였다. 그림 1은 다양한 사용자 거리에 따른 평균 양자화 오차 성능을 보여준다. 기존의 랜덤 벡터 양자화 코드북 (RVQ codebook)의 경우 거리에 따라 동일한 양자화 오차 성능을 보여주며, 양자화 오차가 매우 큼을 알 수 있다. 반면, Rician factor에 적응적인 코드북의 경우 양자화 오차 성능이 거리에 따라 비선형 (Non-linear)하게 증가함을 알 수 있다. 특히나, 밴드 구조의 비균질 코드북의 양자화 오차 성능이 다른 코드북들에 비해 매우 우수함을 확인할 수 있다. 그림 1의 분석을 바탕으로 10 비트의 피드백 오버헤드 환경에서 평균 양자화 오차 0.5의 성능을 기준으로 셀 설계 및 셀 커버리지 분석 시, NLoS 성분 피드백 방법으로는 300 m, 왜곡된 코드북의 경우는 350 m, 밴드 구조의 비균질 코드북의 경우 450 m의 셀 커버리지 설정을 할 수 있음을 확인하였다.

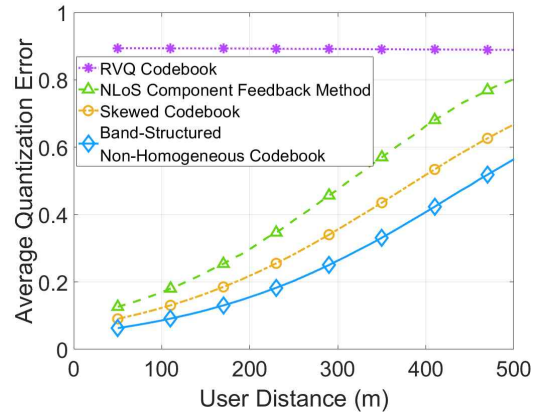


그림 1. 사용자 거리에 따른 양자화 오차 성능 분석.

### III. 결론

본 논문에서는 Rician 페이딩 채널 환경의 FDD Massive MIMO 시스템에서 셀 설계 및 셀 커버리지 분석을 위해 LoS 성분 크기에 따른 효율적인 채널 상태 정보 양자화 코드북을 활용하여 기지국과 사용자 거리에 따른 양자화 오차 성능을 분석하였다. 본 연구는 Rician 페이딩 채널 환경의 다중 셀 Massive MIMO 시스템에서 네트워크 통신 성능 향상을 위한 협업기반 프리코더 설계에 활용할 수 있다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크 기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.(UD190033ED)

### 참고 문헌

- [1] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong, and J. C. Zhang "What will 5G be?," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 32, no. 6, pp. 1065 - 1082, Jun. 2014.
- [2] J. Kang, J. H. Lee, and W. Choi, "Dimension-optimized two-stage precoder design for massive MIMO systems with limited feedback," in Proc. IEEE MILCOM, Oct. 2018, pp. 530-535.
- [3] J. Kang and W. Choi, "Novel codebook design for channel state information quantization in MIMO Rician fading channels with limited feedback," IEEE Transactions on Signal Processing, early access, May 07, 2021, doi: 10.1109/TSP.2021.3077807.
- [4] 3GPP Technical Specification, Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulations, 3GPP TR 25.996 version 16.0.0, Sep. 2020.