

제한된 피드백 환경의 협업 Massive MIMO 시스템에서 Rician 페이딩 채널을 위한 적응적 피드백

강진호*, 최완^o

Adaptive Feedback for Rician Fading Channel in Cooperative Massive MIMO Systems with Limited Feedback Environment

Jinho Kang*, Wan Choi^o

요약

최근 6G 이동통신 시스템의 핵심 기술로서 Massive MIMO 시스템에 관한 관심이 높아지고 있다. 또한, massive MIMO 시스템과 밀리미터파 대역 시스템, 비지상 네트워크의 물리적인 특성인 Line-of-Sight (LoS) 성분이 반영된 공간적 채널 모델로서 Rician 페이딩 채널이 폭넓게 고려되고 있다. 특히, 제한된 피드백 환경의 협업 massive MIMO 시스템에서는 채널 상태 정보 획득을 위한 피드백 오버헤드 뿐만 아니라 채널 상태 정보 공유를 위한 백홀 오버헤드를 저감하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 Rician 페이딩 채널을 효과적으로 양자화시킬 수 있는 밴드 구조의 비균질 코드북을 활용하여 피드백 오버헤드와 백홀 오버헤드를 저감하는 적응적 피드백 기법을 제안한다. 셀 내 사용자 채널과 인접 셀 간섭 채널의 LoS 성분 크기에 따른 양자화 오차가 전송률에 미치는 영향을 분석하여, 이를 기반으로 최적의 피드백 비트 할당을 닫힌 형태로 도출한다. 모의실험을 통해 제안하는 기법이 기존 기법들보다 평균 전송률 성능을 상당히 증가시킴을 확인하였다.

Key Words : Cooperative Massive MIMO, Interference Coordination, Rician Fading Channel, Adaptive Feedback, Optimization

ABSTRACT

Recently, massive multiple-input multiple-output (MIMO) systems have been touted as a core technology for 6G mobile communication systems. Also, Rician fading channels are extensively considered as spatial channel models reflecting the line-of-sight (LoS) component which is a physical characteristic of massive MIMO systems, millimeter wave band systems, and non-terrestrial network. In particular, it is vital to reduce feedback overhead for channel state information (CSI) acquisition and backhaul overhead for CSI sharing in cooperative massive MIMO systems with limited feedback. In this study, we propose an adaptive feedback scheme to reduce the feedback overhead and backhaul overhead by leveraging the band-structured non-homogeneous codebook for effective quantization of a Rician fading channel. By analyzing the impact of the quantization error on achievable sum rate according to the magnitude of the LoS component in intra-cell user channels and other-cell interfering channels, we derive the optimal feedback bit allocation in a closed-form. Numerical results show that the proposed scheme considerably increases the average sum rate compared to the existing schemes.

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.(UD190033ED)

• First Author : Satellite Wide-Area Infra Research Section, Radio & Satellite Research Division, Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), jinhokang@etri.re.kr, 정희원

o Corresponding Author : Institute of New Media and Communications and Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University (SNU), wanchoi@snu.ac.kr, 종신희원

논문번호 : 202106-148-A-RN, Received June 30, 2021; Revised August 30, 2021; Accepted September 28, 2021

I. 서 론

최근 6G 이동 통신 시스템과 군 전술 통신망과 같은 차세대 무선통신 시스템의 핵심 기술로서 massive MIMO (Multiple-input multiple-output) 시스템이 큰 주목을 받고 있다¹⁻³. 기지국에서 대규모 안테나를 사용함으로써 간단한 선형 송수신기를 기반으로 사용자 간 간섭을 거의 완벽히 제거하여 높은 전송률을 달성할 수 있지만, 정확한 채널 상태 정보 획득이 중요하다¹⁻³. 한편, 다중 셀 massive MIMO 시스템에서는 셀 내 사용자 간 간섭뿐만 아니라 인접 셀로부터의 간섭이 전송률 성능에 영향을 미치므로, 채널 상태 정보를 공유함으로써 이러한 간섭을 모두 제거하는 협업 기반의 간섭 조정 (Interference coordination)이 필요하다⁴⁻⁶.

주파수 분할 듀플렉스 (Frequency Division Duplex, FDD) 방식의 massive MIMO 시스템에서 기지국은 사용자로부터 피드백을 통해 채널 상태 정보를 획득하며, 요구되는 피드백 양이 안테나 수에 따라 증가한다^{2,7}. 이런 이유로, 협업 massive MIMO 시스템에서는 채널 상태 정보를 얻기 위한 피드백 오버헤드와 셀 간 간섭 제어를 위해 기지국 간 채널 상태 정보 공유를 위한 백홀 오버헤드가 대량으로 발생한다^{5,6}. 이러한 한계를 극복하기 위해, 협업 기반 FDD massive MIMO 시스템에서 채널 통계를 활용한 적응적 피드백 기법에 연구되었다^{5,6}. 상관관계 레일레이 채널 환경에서 왜곡된 코드북 기반의 피드백 비트 할당 최적화 기법이 제안되었으며⁵, 광선기반 채널 환경에서 Angle-of-Departure (AoD) 부분 공간 코드북 기반의 피드백 할당 최적화 기법이 연구되었다⁶.

이와 더불어, 최근 massive MIMO 시스템과 밀리미터파 대역 시스템, 비지상 네트워크 (Non-Terrestrial Network)의 물리적인 특성인 Line-of-Sight (LoS) 성분이 반영된 공간적 채널 모델인 Rician 페이딩 채널이 폭넓게 고려되고 있다⁸⁻¹⁰. 이와 같은 Rician 페이딩 채널 환경의 FDD 시스템에서 피드백 오버헤드 저감을 위해, 채널 상태 정보 양자화 시 LoS 성분과 non-LoS (NLoS) 성분을 동시에 고려함으로써 LoS 성분 크기에 따라 효율적으로 양자화하는 밴드 구조의 비균질 (Band-Structured Non-Homogeneous) 코드북이 제안되었다¹⁰. 하지만, Rician 페이딩 채널 환경의 협업 기반 FDD massive MIMO 시스템에서 피드백 오버헤드와 백홀 오버헤드를 모두 저감하기 위한 효율적인 피드백 기법에 관한 연구는 미비하다.

본 연구에서는 Rician 페이딩 채널 환경의 다중 셀

FDD massive MIMO 시스템에서 협업 기반의 간섭 제어 시, 피드백 오버헤드와 백홀 오버헤드 저감을 위한 적응적 피드백 기법을 연구한다. 효율적인 채널 정보 양자화를 위해 Rician 페이딩 채널을 위한 밴드 구조의 비균질 코드북을 활용하여, 네트워크의 평균 합 전송률을 최대화하는 피드백 비트 할당 최적화 기법을 제시한다. 셀 내 사용자 채널과 인접 셀 간섭 채널의 LoS 성분 크기에 따른 양자화 오차가 전송률에 미치는 영향을 수학적으로 분석하며, 이를 기반으로 최적의 피드백 비트 할당을 닫힌 형태 (Closed-form)로 도출한다. 모의실험을 통해 본 연구에서 제안하는 Rician 페이딩 채널을 위한 적응적 피드백 기법이 기존 기법들보다 우수한 전송률 성능을 달성함을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 Rician 페이딩 채널 환경의 협업 기반 massive MIMO 시스템 모델과 채널 상태 정보 피드백을 설명한다. III장에서는 네트워크 전송률 향상을 위한 적응적 피드백 기법을 제안한다. IV장에서는 모의실험을 통해 제안하는 기법의 성능을 검증하고, V장에서 본 연구의 결론을 제시한다.

II. 시스템 모델

2.1 네트워크 모델

본 논문은 그림 1과 같이 제한된 피드백 환경의 협업 기반 N 셀 massive MIMO 네트워크를 고려하며, 각 셀에서는 단일 기지국이 U 명의 사용자들을 서비스한다. 기지국은 M ($\gg 1$) 개의 안테나를, 각 사용자는 하나의 안테나를 가지며, 기지국들은 백홀 링크를 통해 연결되어 있다. n 번째 기지국에서 보내는 전송 데이터를 $\mathbf{s}_n = [s_{1,n}, \dots, s_{U,n}]^T$ ($n \in \mathbb{N} \triangleq \{1, \dots, N\}$), 선형 프리코더를 $\mathbf{V}_n = [\mathbf{v}_{1,n}, \dots, \mathbf{v}_{U,n}]$ 로 정의하면, 전

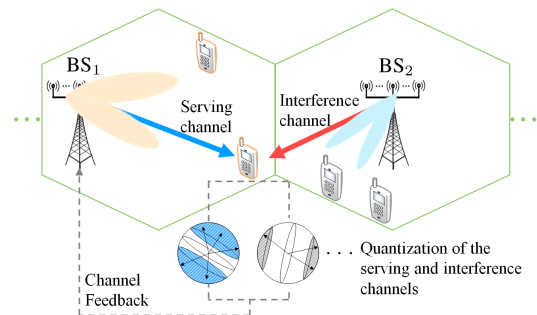


그림 1. 시스템 모델.
Fig. 1. System model.

송 신호는 $\mathbf{x}_n = \mathbf{V}_n \mathbf{s}_n$ 로 표현된다. 본 연구에서는 n 번째 기지국이 서비스하는 u 번째 사용자를 (u, n) 으로 표현한다. 각 기지국은 모든 사용자에게 동일한 전력을 할당하며, 사용자 (u, n) 을 지원하는 빔포밍 벡터는 크기 $\|\mathbf{v}_{u,n}\|^2 = 1$ 을 만족한다^{5,6}. 이때, 사용자 (u, n) 의 수신 신호는 아래와 같다.

$$y_{u,n} = \sqrt{\gamma_{u,n,n}^r} \mathbf{h}_{u,n,n}^\dagger \mathbf{v}_{u,n} s_{u,n} + \sum_{l \in \mathbf{U} \setminus u} \sqrt{\gamma_{u,n,l}^r} \mathbf{h}_{u,n,l}^\dagger \mathbf{v}_{l,n} s_{l,n} + \sum_{i \in \mathbf{N} \setminus n} \sqrt{\gamma_{u,n,i}^r} \mathbf{h}_{u,n,i}^\dagger \sum_{j \in \mathbf{U}} \mathbf{v}_{j,i} s_{j,i} + n_{u,n} \quad (1)$$

위 식에서 $\mathbf{h}_{u,n,i} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 i 번째 기지국과 사용자 (u, n) 간의 채널이며, $\gamma_{u,n,i}^r$ 는 경로 손실이 반영된 수신전력이다. $n_{u,n} \sim CN(0, \sigma^2)$ 는 추가적인 복소 가우시안 잡음이다.

2.2 채널 모델

본 논문에서는 massive MIMO 시스템과 밀리미터 파 대역 시스템, 비지상 네트워크 채널의 물리적인 특성인 LoS 성분이 반영된 Rician 페이딩 채널을 고려한다. Rician 페이딩 채널은 정해진 LoS 성분과 랜덤한 Non-LoS (NLoS) 성분으로 구성되며, i 번째 기지국과 사용자 (u, n) 간의 채널은 아래와 같이 표현된다⁸⁻¹⁰.

$$\mathbf{h}_{u,n,i} = \sqrt{\frac{K_{u,n,i}^{\text{LoS}}}{K_{u,n,i}^{\text{LoS}} + 1}} \mathbf{h}_{u,n,i}^{\text{LoS}} + \sqrt{\frac{1}{K_{u,n,i}^{\text{LoS}} + 1}} \mathbf{h}_{u,n,i}^{\text{NLoS}} \quad (2)$$

위 식에서 $\mathbf{h}_{u,n,i}^{\text{LoS}}$ 는 결정론적 LoS 성분이며, 크기 $\|\mathbf{h}_{u,n,i}^{\text{LoS}}\|^2 = M$ 을 만족한다. $\mathbf{h}_{u,n,i}^{\text{NLoS}}$ 는 랜덤한 NLoS 성분이며, $\mathbf{h}_{u,n,i}^{\text{NLoS}}$ 의 각 요소는 독립적인 복소 가우시안 분포인 $CN(0, 1)$ 을 따른다. $K_{u,n,i}$ 는 Rician factor 이며, LoS 성분과 NLoS 성분 크기의 비율을 의미한다.

본 논문에서는 다른 문헌들처럼 각 기지국들과 사용자들은 각 채널의 LoS 성분인 $\mathbf{h}_{u,n,i}^{\text{LoS}}$ 와 Rician factor인 $K_{u,n,i}$ 를 완벽히 안다고 가정한다⁸⁻¹⁰. LoS 성분과 Rician factor는 주로 각 기지국과 사용자의 위치에 따라 결정된다. $\mathbf{h}_{u,n,i}^{\text{LoS}}$ 는 기지국의 안테나 어레이 구조와 방위각에 따라 결정되며, $K_{u,n,i}$ 는 주로 기지국과 사용자의 거리에 따라 결정된다⁸⁻¹⁰. 또한, 본 연

구에서 사용자는 파일럿을 통해 채널을 추정함으로써 각 기지국과의 채널을 완벽히 안다고 가정한다. 사용자 (u, n) 은 추정된 채널 상태로부터 각 기지국 사이의 표본 채널을 통해 MUSIC 알고리즘과 최대 우도 추정 기법으로 각 기지국과의 방위각과 Rician factor 를 얻을 수 있으며⁸⁻¹⁰, 이를 각 기지국으로 피드백한다. 방위각과 Rician factor는 장기적인 (Long-term) 채널 통계이므로, 기지국은 낮은 피드백 오버헤드로 사용자로부터 피드백 받을 수 있다⁶.

2.3 협력적 제로-포싱 빔포밍

수식 (1)에서 알 수 있듯이, 사용자 (u, n) 의 전송률 성능을 향상하기 위해서는 셀 내부 사용자 간 간섭 (Inter-user interference, IUI)과 다른 셀로부터의 간섭 (Other-cell interference, OCI)을 제거해야 한다. 이처럼 IUI와 OCI를 동시에 제거하기 위해 본 연구에서는 협력적 제로-포싱 빔포밍 (Coordinated zero-forcing beamforming, C-ZFBF) 기법을 활용하며, (u, n) 사용자를 지원하는 빔포밍 벡터를 아래와 같이 설계한다^{4,6}.

$$\mathbf{v}_{u,n} = \frac{(\mathbf{H}_n \mathbf{H}_n^\dagger)^{-1} \mathbf{h}_{u,n,n}}{\|(\mathbf{H}_n \mathbf{H}_n^\dagger)^{-1} \mathbf{h}_{u,n,n}\|} \quad (3)$$

위 식에서 $\mathbf{H}_n = [\mathbf{H}_{n,n}, [\mathbf{H}_{i,n}^{\text{OCI}}]_{i \in \mathbf{N} \setminus n}]$ 은 n 번째 기지국에서 셀 내부 채널들인 $\mathbf{H}_{n,n} = [\mathbf{h}_{1,n,n}, \dots, \mathbf{h}_{U,n,n}]$ 와 인접 셀에 있는 사용자들을 향하는 간섭 채널들을 의미하는 $\mathbf{H}_{i,n}^{\text{OCI}} = [\mathbf{h}_{1,i,n}, \dots, \mathbf{h}_{U,i,n}]$ ($i \in \mathbf{N} \setminus n$)로 구성된다. 이때, 인접 셀 간섭 채널들인 $[\mathbf{H}_{i,n}^{\text{OCI}}]_{i \in \mathbf{N} \setminus n}$ 는 백홀 링크를 통해 기지국 간의 협업으로 얻게 되며, 간섭을 완벽히 제거할 수 있도록 기지국의 안테나 수는 $M \geq NU$ 를 고려한다.

2.4 밴드 구조의 비균질 코드북 기반 제한된 피드백

본 연구에서는 제한된 피드백 환경을 고려하며, 각 기지국은 피드백 링크를 통해 사용자로부터 채널 방향 정보를 피드백 받는다. 기지국에서 협력적 제로-포싱 빔포밍을 설계하기 위해 (u, n) 사용자는 n 번째 기지국과의 채널 방향 정보뿐만 아니라 인접 셀 기지국들과의 채널 방향 정보를 피드백하며, 이를 위해 N 개의 코드북을 활용한다. 각 기지국과의 채널 방향 정보 양자화를 위해 할당된 피드백 양을 $b_{u,n,i}$ 라 하면, 각 코드북은 아래와 같이 M 차원의 단위 크기 벡터들

로 구성된다.

$$\mathbf{C}_{u,n,i} = \{\mathbf{c}_{u,n,i,1}, \dots, \mathbf{c}_{u,n,i,2^{b_{u,n,i}}}\}, \forall i \in \mathbf{N} \quad (4)$$

사용자 (u,n) 은 $\mathbf{C}_{u,n,i}$ 를 기반으로 i 번째 기지국과 채널 방향 정보를 아래와 같이 양자화한다.

$$\hat{\mathbf{h}}_{u,n,i} = \underset{\mathbf{c} \in \mathbf{C}_{u,n,i}}{\operatorname{argmax}} \left| \hat{\mathbf{h}}_{u,n,i}^\dagger \mathbf{c} \right|^2, \forall i \in \mathbf{N} \quad (5)$$

위 식에서 $\hat{\mathbf{h}}_{u,n,i} = \frac{\mathbf{h}_{u,n,i}}{\|\mathbf{h}_{u,n,i}\|}$ 이며, 채널 방향을 의미한다. 이때, 사용자 (u,n) 의 i 번째 기지국과의 채널 양자화 오차는 아래와 같이 정의된다.

$$Z_{u,n,i} = 1 - \left| \hat{\mathbf{h}}_{u,n,i}^\dagger \hat{\mathbf{h}}_{u,n,i} \right|^2 \quad (6)$$

단위 크기 벡터들로 구성된 코드북 $\mathbf{C}_{u,n,i}$ 를 기반으로 단위 크기의 채널 방향 정보를 양자화하므로, 위 식의 양자화 오차는 $Z_{u,n,i} \in [0,1]$ 을 만족한다.

본 연구에서는 대규모 안테나에 의한 피드백 오버헤드를 저감하기 위해 LoS 성분 크기에 따라 Rician 페이딩 채널을 효율적으로 양자화하는 밴드 구조의 비균질 (Band-Structured Non-Homogeneous, BS NH) 코드북을 활용한다¹⁰⁾. 밴드 구조의 비균질 코드북은 대역 내 (In-band) 코드북과 대역 외 (Out-of-band) 코드북으로 구성되며, 각 코드북 설계 변수들은 Rician factor에 따라 최적화된다¹⁰⁾. 이와 같은 밴드 구조의 비균질 코드북 사용 시 평균 양자화 오차의 상한은 Rician factor에 따라 아래와 같이 주어진다¹⁰⁾.

$$E[Z_{u,n,i}] < I(\gamma_{K_{u,n,i}}) \frac{M}{M-1} 2^{-\frac{b_{u,n,i}}{M-1}} \quad (7)$$

위 식에서 $\gamma_{K_{u,n,i}}$ 는 밴드 구조의 비균질 코드북의 최적화된 설계 변수이며, Rician factor인 $K_{u,n,i}$ 에 따라 결정된다¹⁰⁾. 사용자 (u,n) 과 i 번째 기지국 간의 밴드 구조의 비균질 코드북은 LoS 성분 $\mathbf{h}_{u,n,i}^{\text{LoS}}$ 과 Rician factor $K_{u,n,i}$ 에 따라 구성된다.

N 개의 양자화 코드북 기반의 채널 방향 정보 피드백을 위해 사용자 (u,n) 에게 할당된 피드백 벡터를 $\mathbf{b}_{u,n} = [b_{u,n,1}, \dots, b_{u,n,N}]$ 로 표현하고 총 피드백 양을

B_\dagger 라 하면, $\sum_{i \in \mathbf{N}} b_{u,n,i} = B_\dagger$ 을 만족한다.

각 기지국은 셀 내 사용자들로부터 피드백 받은 후 양자화된 인접 셀 간섭 채널 방향 정보를 백홀 링크를 통해 공유하며, 이를 기반으로 협력적 재포밍 빔포밍을 설계한다. 따라서, 사용자 (u,n) 의 전송률은 아래와 같다.

$$R_{u,n} = \log_2 \left(1 + \frac{\rho_{u,n,n}^r \left| \mathbf{h}_{u,n,n}^\dagger \mathbf{v}_{u,n} \right|^2}{J_{u,n,n}^{\text{IUI}} + J_{u,n,n}^{\text{OCI}} + 1} \right) \quad (8)$$

위 식에서 $J_{u,n,n}^{\text{IUI}} = \sum_{l \in \mathbf{U} \setminus u} \rho_{u,n,n}^r \left| \mathbf{h}_{u,n,n}^\dagger \mathbf{v}_{l,n} \right|^2$ 는 셀 내 간섭음, $J_{u,n,n}^{\text{OCI}} = \sum_{i \in \mathbf{N} \setminus n} \sum_{j \in \mathbf{U}} \rho_{u,n,i}^r \left| \mathbf{h}_{u,n,i}^\dagger \mathbf{v}_{j,i} \right|^2$ 는 셀 간 간섭이며, $\rho_{u,n,i}^r = \frac{\gamma_{u,n,i}^r}{\sigma^2}$ 는 수신 신호 대 잡음비 (Signal-to-noise ratio, SNR)를 의미한다. 결과적으로, 네트워크의 평균 합 전송률은 다음과 같다.

$$R_s = \sum_{n \in \mathbf{N}} \sum_{u \in \mathbf{U}} E[R_{u,n}] \quad (9)$$

III. 네트워크의 전송률 향상을 위한 적응적 피드백

3.1 적응적 피드백을 위한 최적화 문제

식 (8)에서 알 수 있듯이 사용자 (u,n) 의 전송률은 $J_{u,n,n}^{\text{IUI}}$ 와 $J_{u,n,n}^{\text{OCI}}$ 의 영향을 받으며, 이들은 사용자가 피드백하는 셀 내 채널과 인접 셀 간섭 채널의 양자화 오차에 영향을 받는다. 또한, 본 연구와 같이 Rician 페이딩 채널을 위해 밴드 구조의 비균질 코드북 사용 시 양자화 오차는 각 채널의 Rician factor, 즉, LoS 성분 크기에 영향을 받는다. 따라서, 네트워크 평균 합 전송률을 향상하기 위해서는 셀 내에서 서비스하는 사용자 채널과 인접 셀 간섭 채널의 LoS 성분 크기에 따른 양자화 오차가 전송률 성능에 미치는 영향을 고려한 적응적 피드백이 필요하다. 이를 위해, 본 연구에서는 아래와 같이 평균 합 전송률을 최대화하는 피드백 비트 할당 최적화 문제를 제시한다.

$$\begin{aligned} P1 : & \underset{\{b_{u,n,i}\}_{u=1}^N}{\operatorname{maximize}} && \sum_{n \in \mathbf{N}} \sum_{u \in \mathbf{U}} E[R_{k,n}] \\ & \text{subject to} && \mathbf{b}_{u,n} = [b_{u,n,1}, \dots, b_{u,n,N}], \\ & && \sum_{i \in \mathbf{N}} b_{u,n,i} = B_\dagger, \forall u \in \mathbf{U}, n \in \mathbf{N}, \\ & && b_{u,n,i} \in \mathbb{Z}^{0+}. \end{aligned}$$

문제 P1에서 Z^{0+} 는 음이 아닌 정수의 집합을 나타낸다. 문제 P1은 전체 네트워크 사용자들의 피드백 비트 할당 벡터가 목적 함수에 공동으로 영향을 미치는 조합 문제이므로, 최적의 솔루션을 직접 얻는 것은 매우 어렵다^{5,6}. 반면, 최적의 피드백 비트 할당 벡터를 얻기 위해 몬테카를로 시뮬레이션 (Monte-Carlo simulation) 기반의 $(N-1)N$ -차원 수치 탐색 활용할 수 있다. 하지만, 몬테카를로 시뮬레이션의 수치 탐색은 복잡도가 매우 높으므로 실제 시스템에서 사용하기에 많은 시간과 자원 소모가 요구된다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 낮은 복잡도로 피드백 비트 할당 벡터를 도출할 수 있는 수학적 분석 기반의 적응적 피드백 기법을 다음과 같이 제시하고자 한다.

3.2 전송률 손실 분석

본 연구에서는 전송률 손실을 분석함으로써 셀 내에서 서비스하는 사용자 채널과 인접 셀 간섭 채널의 LoS 성분 크기에 따른 양자화 오차가 전송률에 미치는 영향을 다음과 같이 파악한다. 양자화 오차에 의한 사용자 (u,n) 전송률 손실은 아래와 같다^{4,7}.

$$\Delta R_{u,n} = E[R_{u,n}^{\text{PCSI}} - R_{u,n}] \quad (10)$$

위 식에서 $R_{u,n}^{\text{PCSI}}$ 은 기지국에서 완벽한 채널 상태 정보 (Perfect CSI, PCSI)를 기반으로 C-ZFBF 벡터 ($\mathbf{v}_{u,n}^{\text{PCSI}}$) 설계 시 얻을 수 있는 전송률이며, 아래와 같다^{4,7}.

$$R_{u,n}^{\text{PCSI}} = \log_2 \left(1 + \rho_{u,n}^r \left| \mathbf{h}_{u,n,n}^\dagger \mathbf{v}_{u,n}^{\text{PCSI}} \right|^2 \right) \quad (11)$$

식 (10)에 식 (8)와 (11)을 대입한 후 전개하면, 아래와 같은 전송률 손실의 상한을 얻을 수 있다^{4,6}.

$$\Delta R_{u,n} \leq \log_2 \left(E[J_{u,n}^{\text{UI}}] + E[J_{u,n}^{\text{OCI}}] + 1 \right) \quad (12)$$

또한, 식 (12)의 $E[J_{u,n}^{\text{UI}}]$ 와 $E[J_{u,n}^{\text{OCI}}]$ 의 상한을 도출함으로써 다음과 같이 사용자 (u,n) 전송률 손실을 분석할 수 있다. 밴드 구조의 비균질 코드북 활용 시, $E[J_{u,n}^{\text{UI}}]$ 의 상한을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} E[J_{u,n}^{\text{UI}}] &= \sum_{l \in \mathbf{U} \setminus u} \rho_{u,n}^r E \left[\left| \mathbf{h}_{u,n,n}^\dagger \mathbf{v}_{l,n} \right|^2 \right] \\ &< \sum_{l \in \mathbf{U} \setminus n} \rho_{u,n}^r E \left[\left\| \mathbf{h}_{u,n,n} \right\|^2 \right] E[Z_{u,n}] \end{aligned} \quad (13)$$

$$= (U-1) M \rho_{u,n}^r \Gamma(\gamma_{K_{u,n,n}}) \frac{M}{M-1} 2^{-\frac{b_{u,n,n}}{M-1}} \quad (14)$$

위 식에서 식 (13)는 양자화된 채널을 기반으로 협력적 제로-포싱 빔포밍 설계 시, 사용자 간 간섭의 상한으로부터 도출할 수 있다^{2,7}. 식 (14)은 Rician 페이딩 채널 환경에서 $E[\left\| \mathbf{h}_{u,n,n} \right\|^2] = M$ 와 밴드 구조의 비균질 코드북 사용 시 양자화 오차의 상한인 식 (7)를 기반으로 도출할 수 있다.

식 (14)과 동일한 과정을 통해, $E[J_{u,n}^{\text{OCI}}]$ 의 상한을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} E[J_{u,n}^{\text{OCI}}] &< \sum_{i \in \mathbf{N} \setminus n} U M \rho_{u,n,i}^r \Gamma(\gamma_{K_{u,n,i}}) \frac{M}{M-1} 2^{-\frac{b_{u,n,i}}{M-1}} \end{aligned} \quad (15)$$

식 (12)에 식 (14)과 식 (15)를 대입하여 전개하면, 사용자 (u,n) 의 전송률 손실의 상한을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta R_{u,n} &\leq \log_2 \left((U-1) M \rho_{u,n}^r \Gamma(\gamma_{K_{u,n,n}}) \frac{M}{M-1} 2^{-\frac{b_{u,n,n}}{M-1}} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i \in \mathbf{N} \setminus n} U M \rho_{u,n,i}^r \Gamma(\gamma_{K_{u,n,i}}) \frac{M}{M-1} 2^{-\frac{b_{u,n,i}}{M-1}} + 1 \right) \\ &= \Delta R_{u,n}^{\text{Upper}} \end{aligned} \quad (16)$$

식 (16)에서 알 수 있듯이, Rician 페이딩 채널 환경에서의 전송률 손실의 상한이 사용자의 수신 SNR $\rho_{u,n,i}^r$ 과 Rician factor $K_{u,n,i}$ 에 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서, Rician 페이딩 채널 환경에서 전송률을 향상하기 위해서는, 기존의 레일레이 채널 또는 광선 기반 채널 환경에서의 전송률 손실 분석^{5,6}과는 달리, Rician factor에 적응적인 피드백 비트 할당이 필요하다.

3.3 낮은 복잡도의 적응적 피드백 기법

본 논문에서는 도출한 식 (16)과 정수 제약 조건에 대한 연속 완화 기법¹⁴을 기반으로 낮은 복잡도의 적응적 피드백 기법을 다음과 같이 제안한다. 사용자 (u,n) 의 전송률 손실의 상한을 최소화하는 피드백 할당 최적화 문제를 다음과 같이 제시한다.

$$P2: \underset{b_{u,n,1}, \dots, b_{u,n,N} \in \mathbb{R}^{0+}}{\text{minimize}} \quad \Delta R_{u,n}^{\text{Upper}} \quad \nu_i b_{u,n,i} = 0, \forall i \in \mathbf{N} \quad (22)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{i \in \mathbf{N}} b_{u,n,i} = B_t$$

문제 P2에서 \mathbb{R}^{0+} 는 음이 아닌 실수의 집합을 나타낸다. 문제 P2의 목적 함수에서 최적화 변수와 무관한 항들을 각각

$$t_{u,n,n} = (U-1)M\rho_{u,n,n}^r \Gamma(\gamma_{K_{u,n,n}})^{\frac{M}{M-1}} \text{ 와}$$

$t_{u,n,i} = UM\rho_{u,n,i}^r \Gamma(\gamma_{K_{u,n,i}})^{\frac{M}{M-1}} \quad (\forall i \in \mathbf{N} \setminus n)$ 로 정의하면, log 함수가 단조 증가이므로 문제 P2는 아래의 문제 P3와 동치이다.

$$P3: \underset{b_{u,n,1}, \dots, b_{u,n,N}}{\text{minimize}} \quad \sum_{i \in \mathbf{N}} t_{u,n,i} 2^{-\frac{b_{u,n,i}}{M-1}}$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{i \in \mathbf{N}} b_{u,n,i} = B_t$$

$$b_{u,n,i} \geq 0, \forall i \in \mathbf{N}$$

문제 P3는 블록 최적화 문제이며, 다음과 같이 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 최적화 조건을 기반으로 최적의 솔루션을 도출할 수 있다^{4,5,11}. 문제 P3의 라그랑주 함수를 아래와 같이 정의할 수 있다¹¹.

$$L = \sum_{i \in \mathbf{N}} t_{u,n,i} 2^{-\frac{b_{u,n,i}}{m}} + \lambda \left(\sum_{i \in \mathbf{N}} b_{u,n,i} - B_t \right) - \sum_{i \in \mathbf{N}} \nu_i b_{u,n,i} \quad (17)$$

위 식에서 λ 는 라그랑주 승수이며, $m = M-1$ 이다. 식 (17)과 제약 조건들을 기반으로 KKT 최적화 조건들을 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$\frac{\partial L}{\partial b_{u,n,i}} = -\frac{t_{u,n,i} \ln 2}{m} 2^{-\frac{b_{u,n,i}}{m}} + \lambda - \nu_i = 0, \forall i \in \mathbf{N} \quad (18)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = \sum_{i \in \mathbf{N}} b_{u,n,i} - B_t = 0 \quad (19)$$

$$b_{u,n,i} \geq 0, \forall i \in \mathbf{N} \quad (20)$$

$$\nu_i \geq 0, \forall i \in \mathbf{N} \quad (21)$$

식 (18)-(22)를 기반으로, 문제 P3의 최적의 솔루션을 닫힌 형태로 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$b_{u,n,i}^* = \max \left\{ 0, \frac{B_t}{N} + m \log_2 \left(\frac{t_{u,n,i}}{\left(\prod_{j \in \mathbf{N}} t_{u,n,j} \right)^{1/N}} \right) \right\}, \quad \forall i \in \mathbf{N} \quad (23)$$

닫힌 형태의 솔루션으로 도출한 식 (23)은 정수가 아니므로, 정수 제약 조건을 만족하기 위해 실수 부분을 정수로 내림함으로써 피드백 할당량을 아래와 같이 도출한다.

$$b_{u,n}^* = [b_{u,n,1}^*, \dots, b_{u,n,N}^*] \quad (24)$$

$$b_{u,n,i}^* = \left\lfloor \max \left\{ 0, \frac{B_t}{N} + m \log_2 \left(\frac{t_{u,n,i}}{\left(\prod_{j \in \mathbf{N}} t_{u,n,j} \right)^{1/N}} \right) \right\} \right\rfloor$$

위 식에서 $\lfloor x \rfloor = \max\{z \in \mathbb{Z} \mid z \leq x\}$ 를 의미하며, \mathbb{Z} 는 정수 집합을 나타낸다. 식 (24)에서 실수를 정수로 내림하였기 때문에, 할당된 피드백 양의 합이 $\sum_{i \in \mathbf{N}} b_{u,n,i}^* < B_t$ 가 된다. 이를 극복하기 위해, $[b_{u,n,i}^*]_{i \in \mathbf{N}}$ 중에서 내림한 소수점의 크기가 큰 값들을 순차적으로 1 bit씩 증가시킴으로써 $\sum_{i \in \mathbf{N}} b_{u,n,i}^* = B_t$ 를 만족하게 한다.

도출한 식 (24)에서 알 수 있듯이, 사용자 (u,n)의 적응적 피드백 할당량이 $[t_{u,n,j}]_{j \in \mathbf{N}}$ 에 따라 달라짐을 알 수 있다. 즉, 각 기지국 ($\forall j \in \mathbf{N}$)과 사용자 (u,n) 간의 경로 손실이 반영된 수신전력인 $\gamma_{u,n,j}^r$ 와 Rician factor인 $K_{u,n,j}$ 에 따라 결정되는 양자화 오차인 $\Gamma(\gamma_{K_{u,n,j}})$ 에 의해 결정됨을 알 수 있다. 특히, 기존의 협업기반 FDD massive MIMO 시스템에서 제안되었던 상관관계 레일레이 채널 환경과 광선기반 채널 환경에서의 적응적 피드백 기법^{5,6}과는 달리, 본 연구에서 고려하는 Rician 페이딩 채널 환경에서는 Rician factor에 따라 피드백 할당량을 다르게 해야한다는 사실을 도출한 식 (24)로부터 확인할 수 있다. 결과적으로 본 논문에서는, 사용자 (u,n)의 피드백 할당량

을 셀 내 사용자 채널과 인접 셀 간섭 채널의 LoS 성분 크기, 즉, $K_{u,n,j} (\forall j \in \mathbb{N})$ 에 따라 식 (24)을 통해 조절하는 적응적 피드백 기법을 제안한다.

IV. 모의실험

모의실험을 통해 본 연구에서 제안하는 적응적 피드백 기법의 성능을 검증하였다. 64 개의 균일 선형 안테나를 가지는 기지국이 12 명의 사용자들을 지원하는 협업기반 2셀 massive MIMO 네트워크를 고려하였다. 500 m의 셀 반경을 고려하였으며, 셀 1의 사용자들은 기지국 1로부터 거리 450m, 방위각 $-\frac{4\pi}{15} + \frac{\pi}{45}u$ 에 위치하며, 셀 2의 사용자들은 기지국 2로부터 거리 450m, 방위각 $\pi + \frac{\pi}{45}u$ ($u \in \{1, \dots, 12\}$)에 위치하는 환경을 고려하였다. 이때, 인접 기지국과의 거리는 기지국들과 사용자들의 위치에 의해 계산되었다. 아래와 같은 전력 하락 손실 모델이 고려되었다⁶⁾.

$$\gamma_{u,n,i}^f = \gamma^f \left(\frac{d_0}{d_{u,n,i}} \right)^f \quad (25)$$

γ^f 는 송신 전력을 의미하며, 기준거리 d_0 를 1m, 경로 손실 계수 f 를 2.7로 고려하였다. 거리에 따른 Rician factor의 영향을 단순화된 버전 (Simplified version)으로 묘사한 3GPP 표준의 MIMO 시뮬레이션을 위한 공간적 채널 모델 기술보고서를 참고하여, 아래와 같은 모델을 고려하였다⁹⁾.

$$K_{u,n,i} = 13 - 0.03d_{u,n,i} \quad (26)$$

성능 평가를 위한 비교 기법들로서 다음과 같이 i) Random Vector Quantization (RVQ) 코드북⁷⁾ 기반의 동일한 비트 할당 기법 (EB with RVQ), ii) RVQ 코드북 기반의 적응적 비트 할당 기법 (AB with RVQ)⁴⁾, iii) 밴드 구조의 비균질 코드북 기반의 동일한 비트 할당 기법 (EB with BS NH), iv) 본 연구에서 제안하는 밴드 구조의 비균질 코드북 기반 낮은 복잡도의 적응적 피드백 기법 (Proposed scheme), v) 몬테카를로 시뮬레이션 수치 탐색 기반으로 도출한 문제 P1의 최적의 솔루션 (Optimal scheme) 기법이 고려되었다. 또한, 성능 평가를 위한 평균 전송률을 얻

기 위해 Rician 페이딩 채널에서 랜덤한 NLoS 성분을 변화함으로써 1,000 채널을 생성하여 평균을 취하였다. 이때, 모든 기법들에 대해 동일한 NLoS 성분과 동일한 RVQ 코드북을 고려하였다. 몬테카를로 시뮬레이션의 경우, 문제 P1의 제약조건을 만족하는 고정된 피드백 비트 할당량에 대해 1,000 채널을 생성함으로써 각 피드백 비트 할당에 대한 평균 합 전송률을 얻은 후, $(N-1)NU$ -차원의 수치 탐색을 통해 평균 합 전송률을 최대화함으로써 최적의 솔루션을 도출하였다.

그림 2는 사용자의 피드백 양이 8 비트일 때 ($B_f = 8$) 수신 SNR에 따른 평균 합 전송률 결과를 나타낸다. 수신 SNR의 경우 사용자가 셀 반경에 위치하였을 때의 경로 손실을 고려한 SNR을 의미한다^{4,6)}. Rician 페이딩 채널 환경에서 밴드 구조의 비균질 코드북 사용 시 기존 RVQ 코드북에 비해 전송률 성능이 크게 향상됨을 확인할 수 있다. 또한, 본 논문에서 제안한 수식 (24)로부터 얻은 낮은 복잡도의 적응적 피드백 기법이 동일한 비트 할당 기법보다 전송률 성능이 증가시킴을 확인하였다. 또한, 수식 (24)로부터 얻은 피드백 할당 양과 몬테카를로 시뮬레이션 수치 탐색 기반의 최적의 솔루션과의 평균 피드백 양 오차를 아래와 같이 확인할 수 있다.

$$\Delta B = \frac{1}{UN^2} \sum_{n \in \mathbb{N}} \sum_{u \in \mathbb{U}} \sum_{i \in \mathbb{N}} |b_{u,n,i}^{\text{Opt}} - b_{u,n,i}^{\text{Proposed}}| \quad (27)$$

그림 2의 경우 식 (27)로부터 얻은 평균 피드백 양 오차는 1bit 임을 확인하였으며, 이를 통해 기존의 연구들에서 확인된 것처럼, 본 논문에서 제안하는 전송

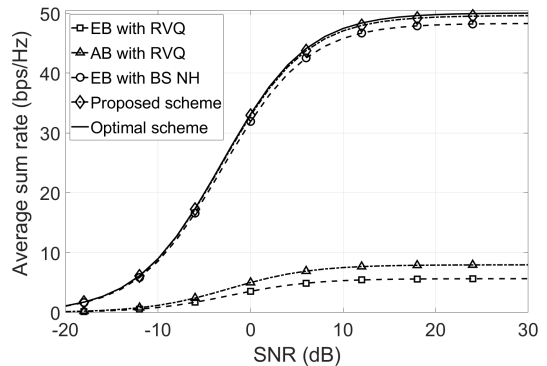


그림 2. 사용자의 피드백 양이 8 비트일 때 다양한 기법들에 따른 평균 합 전송률.
Fig. 2. Average sum rate of various schemes when the feedback bit of a user is 8 bits.

를 손실 분석 기반의 피드백 양 할당 최적화 기법이 몬테카를로 시뮬레이션 수치 탐색 기반의 최적의 솔루션 기법과 유사한 성능을 달성함을 확인하였다.

그림 3은 사용자의 피드백 양이 16비트일 때 ($B_f = 16$) 수신 SNR에 따른 평균 합 전송률 결과를 나타낸다. 마찬가지로, 본 연구에서 제안한 낮은 복잡도의 적응적 피드백 기법이 기존 기법들에 비해 전송률을 크게 향상시키며, 최적의 솔루션과 동일한 성능을 달성함을 확인하였다. 그림 2의 결과와 비교해보았을 때 사용자의 총 피드백 양이 커질 시, 제안하는 적응적 피드백 기법과 동일한 비트 할당 기법과의 전송률 성능 향상 차이가 더 증가함을 확인할 수 있다. 그림 3의 경우 식 (27)로부터 얻은 평균 피드백 양 오차는 0.67 bit임을 확인하였으며, 본 논문에서 제안하는 전송률 손실 분석 기반의 피드백 양 할당 최적화 기법이 몬테카를로 시뮬레이션 수치 탐색 기반의 최적의 솔루션 기법과 거의 근접한 성능을 달성함을 확인하였다.

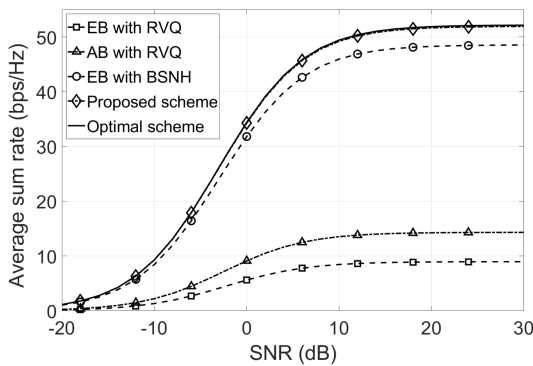


그림 3. 사용자의 피드백 양이 16 비트일 때 다양한 기법들에 따른 평균 합 전송률.
Fig. 3. Average sum rate of various schemes when the feedback bit of a user is 16 bits.

V. 결론

본 논문에서는 Rician 페이딩 채널 환경의 다중 셀 FDD massive MIMO 네트워크에서 밴드 구조의 비균질 코드북을 활용한 적응적 피드백 기법을 제안하였다. 전송률 손실 분석을 통해 협업기반 간섭 조정 시 셀 내 사용자 채널과 인접 셀 간섭 채널의 LoS 성분 크기에 따른 양자화 오차가 전송률에 영향을 미침을 확인하였다. 분석을 기반으로 Rician 페이딩 채널 환경에서 셀 내 사용자 채널과 인접 셀 간섭 채널의 LoS 성분 크기에 따른 최적의 피드백 비트 할당을 단

한 형태로 도출하였다. 모의실험을 통해 제안하는 기법이 기존 기법들보다 전송률 성능을 매우 증가시킴을 확인하였다.

References

- [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] W. Shen, L. Dai, Y. Zhang, J. Li, and Z. Wang, "On the performance of channel-statistics based codebook for massive MIMO channel feedback," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 8, pp. 7553-7557, Aug. 2017.
- [3] 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*, pp. 530-535, Oct. 2018.
- [4] N. Lee and W. Shin, "Adaptive feedback scheme on K-cell MISO interfering broadcast channel with limited feedback," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 2, pp. 401-406, Feb. 2011.
- [5] J. Kang and W. Choi, "Channel statistics based adaptive feedback for cooperative massive MIMO systems," in *Proc. 2020 Int. Conf. ICTC*, pp. 872-874, Oct. 2020.
- [6] J. Kang, and W. Choi, "Feedback bit allocation optimization for cooperative massive MIMO networks with ray-based channel environment," *J. KICS*, vol. 46, no. 3, pp. 440-449, Mar. 2021.
- [7] M. Jindal, "MIMO broadcast channels with finite-rate feedback," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 11, pp. 5045-5060, Nov. 2006.
- [8] X. Li, S. Jin, H. A. Suraweera, J. Hou, and X. Gao, "Statistical 3-D beamforming for large-scale MIMO downlink systems over rician fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 64, no. 4, pp. 1529-1543, Apr. 2016.

- [9] 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.
- [10] J. Kang and W. Choi, "Novel codebook design for channel state information quantization in MIMO rician fading channels with limited feedback," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 69, pp. 2858-2872, May 2021.
- [11] S. Boyd, L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2004.

최 완 (Wan Choi)



1996년 2월 : 서울대학교 전자공학 학사

1998년 2월 : 서울대학교 전자공학 석사

2006년 12월 : University of Texas at Austin, Department of Electrical and Computer Engineering 박사

2007년 1월~2020년 2월 : 한국과학기술원 (KAIST) 전기 및 전자공학부 조교수, 부교수, 정교수

2020년 3월~현재 : 서울대학교 전기정보공학부 정교수
<관심분야> 무선통신, 정보이론, 머신러닝

[ORCID:0000-0003-3930-7088]

강 진 호 (Jinho Kang)



2013년 2월 : 한국과학기술원 (KAIST) 기계공학전공 학사

2015년 2월 : 한국과학기술원 (KAIST) 기계공학전공 석사

2021년 8월 : 한국과학기술원 (KAIST) 전기 및 전자공학부 박사

2021년 8월~현재 : 한국전자통신연구원 (ETRI) 전파·위성연구본부 위성광역인프라연구실 연구원

<관심분야> 위성통신, 무선통신, 머신러닝

[ORCID:0000-0003-2513-3304]