

6G 통신에서의 안테나 결함 탐지 기반 다중사용자 MIMO 시스템 성능 분석

김가영, 김나현, 장석빈, 이병주
인천대학교

{gykim7, nhkim, todghkfsla, bjlee}@inu.ac.kr

Antenna Fault Detection based 6G Multiuser User MIMO Systems

Gayeong Kim, Nahyun Kim, Sukbin Jang, Byungju Lee
Incheon National University

요약

차세대 통신 네트워크에서는 다중사용자 시스템에서 높은 데이터 전송률과 지향성 이득을 달성할 수 있는 대규모 다중입출력(multiple-input multiple-output, MIMO) 기술 활용이 주목받고 있다. 대규모 MIMO 기술은 주로 위상 배열 안테나를 사용하고 많은 RF 체인을 요구함에 따라, 시스템 운용 비용 및 안테나 결함과 같은 하드웨어 결함에 따른 유지 보수 비용도 증가하게 된다. 본 논문에서는 안테나 결함 탐지 기술 동향 및 안테나 결함이 다중사용자 MIMO 시스템에 미치는 성능 열화를 살펴본다.

I. 서론

5G 및 6G 통신 시스템에서는 밀리미터파(mmWave) 및 테라헤르츠(THz)와 같은 고주파 대역의 효과적인 활용을 위한 대규모 다중입출력(multiple-input multiple-output, MIMO) 기술 활용이 많은 관심을 얻고 있다 [1]. 대규모 MIMO 기술은 다수의 안테나를 활용함에 따라 안테나 결함 발생률이 높아지고 그에 따른 유지 보수 비용이 증가하게 된다. 또한, 안테나 결함으로 인한 실제 채널 상태 정보(channel state information, CSI)와의 불일치로 인해 다중사용자 MIMO 시스템에서 성능 열화가 발생한다 [2].

본 논문에서는 안테나 결함 탐지 기술 동향에 대해 살펴보고 안테나 결함 요소가 다중사용자 MIMO 시스템 성능에 미치는 영향을 분석한다.

II. 안테나 결함 탐지 기술 동향

본 장에서는 안테나 결함 탐지 기술 동향을 살펴본다. [3]의 연구에서는 평면 배열 안테나에서 안테나 결함 요소를 탐지하는 최적화 기법을 제안한다. 입자 군집 최적화(particular swarm optimization, PSO), 패턴 검색(pattern search) 기법들에 대한 정확도와 처리시간을 비교한다. [4]에서는 딥러닝 기반 안테나 결함 탐지 기법을 제안한다. 제안된 기법은 송신 신호 중 사용된 일부의 훈련 신호와 수신단의 수신 신호와의 잔여 신호 분포를 통해 결함 여부를 판단한다. 평면 배열 안테나에서 합성곱 신경망(convolutional neural network, CNN) 네트워크를 통해 블록 검출 및 해당 블록 내 안테나 결함 위치를 탐지한다. 안테나 결함 탐지 이후에는 결함의 원인을 파악하고 적절한 대응이 제시되어 효율적인 시스템 운용이 될 수 있게 해야 한다.

III. 안테나 결함에 따른 MIMO 시스템 성능 분석

본 장에서는 M 개의 송신 안테나를 사용하는 기지국이 단일 안테나를 사용하는 K 명의 사용자에게 정보를 전송하는 다중사용자 하향링크 시스템을 고려한다. k 번째 사용자에서의 수신 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y} = (\mathbf{H} \odot \mathbf{F})\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

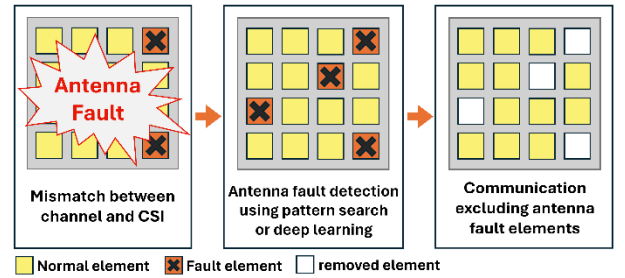


그림 1. 안테나 결함 탐지에 따른 CSI 불일치 완화 방안

$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1^T, \mathbf{h}_2^T, \dots, \mathbf{h}_K^T]^T \in \mathbb{C}^{K \times M}$ 는 채널 행렬이고 $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ 는 k 번째 사용자의 채널 벡터이다. $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_M]^T \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 유닛파워 조건 ($E[\|\mathbf{x}\|^2] = 1$)에 의해 정규화된 송신 신호 벡터이다. 그리고 $\mathbf{n} = [n_1, \dots, n_M]^T \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 은 복소 가우시안 잡음벡터이다 ($\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_n^2 \mathbf{I})$). 연산자 \odot 는 아다마르 곱(Hadamard product)으로 같은 크기인 두 행렬의 원소 별 곱을 의미한다. $\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1^T, \mathbf{f}_2^T, \dots, \mathbf{f}_K^T]^T \in \mathbb{C}^{K \times M}$ 는 안테나 결함 정보 행렬을 나타내며 k 번째 사용자의 안테나 결함 정보 벡터 $\mathbf{f}_k = [f_{k,1}, \dots, f_{k,m}] \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ 의 각 원소 값은 다음과 같다 [3].

$$f_{k,m} = \begin{cases} 0, & \text{if the } m\text{-th antenna is faulty} \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

안테나 결함 요소가 없는 경우, $\mathbf{f}_k = [1, 1, \dots, 1] \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ 와 같이 표현된다. 또한, 안테나 결함은 하드웨어 결함에 해당되기 때문에 모든 사용자의 안테나 결함 정보 벡터는 동일하다 ($\mathbf{f}_1 = \mathbf{f}_2 = \dots = \mathbf{f}_K$).

안테나 결함 위치를 정확하게 탐지한 경우, 그림 1 과 같이 안테나 결함 요소를 제외한 유효 채널 행렬을 구성하여 시스템을 운용할 수 있다. i 개의 안테나 결함 요소가 있는 경우, 채널 행렬 \mathbf{H} 에서 안테나 결함 요소를 제외하고 결함이 없는 요소로 구성된 유효 행렬을 $\tilde{\mathbf{H}} \in \mathbb{C}^{K \times (M-i)}$ 이라 한다.

송신 신호를 생성할 때, 잘 알려진 채널 역변환(Channel inversion, CI) 기법은 송신단에서 간섭을 제거하기 위해 정보벡터에 채널 행렬의 유사 역행렬인 $\mathbf{P} = \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} \in \mathbb{C}^{M \times K}$ 을 곱한다. 이 기법에

의해 기지국에서의 송신 신호벡터 \mathbf{x} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{x} = \frac{\mathbf{P}\mathbf{s}}{\sqrt{Y}} = \frac{1}{\sqrt{Y}}\mathbf{H}^H(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1}\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{M \times 1} \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_K]^T$ 는 QAM 등의 변조를 거친 정보 벡터이고, $\gamma = \|\mathbf{H}^H(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1}\|^2$ 는 유닛과워 전송을 위해 이용된다. 수신 신호벡터는

$$\mathbf{y} = \frac{1}{\sqrt{Y}}(\mathbf{H} \odot \mathbf{F})\mathbf{H}^H(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (4)$$

로 표현된다. 안테나 결함 위치를 정확하게 탐지한 경우, 유효 행렬의 유사 역행렬은 $\tilde{\mathbf{P}} = \tilde{\mathbf{H}}^H(\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H)^{-1} \in \mathbb{C}^{(M-i) \times K}$ 로 표현되고 송신 신호벡터 $\tilde{\mathbf{x}}$ 와 수신 신호벡터 $\tilde{\mathbf{y}}$ 는

$$\tilde{\mathbf{x}} = \frac{\tilde{\mathbf{P}}\mathbf{s}}{\sqrt{Y}} = \frac{1}{\sqrt{Y}}\tilde{\mathbf{H}}^H(\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H)^{-1}\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{(M-i) \times 1} \quad (5)$$

$$\tilde{\mathbf{y}} = \frac{1}{\sqrt{Y}}\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H(\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H)^{-1}\mathbf{s} + \tilde{\mathbf{n}} \quad (6)$$

로 표현된다.

안테나 결함이 대규모 MIMO 시스템에 미치는 영향을 확인하기 위해 16×128 다중사용자 하향링크 시스템에서의 비트 에러율(bit error rate, BER)과 처리량(throughput)을 확인하였다. QPSK 변조와 Rayleigh fading 의 하향채널을 고려하였다. 또한, 채널 추정 오류 반영을 위해 $\mathbf{H} = \mathbf{H}_{est} + \mathbf{H}_{err}$ 의 가산 채널 추정 오류 모델을 사용하였다. 여기서 $\mathbf{H}, \mathbf{H}_{est}, \mathbf{H}_{err}$ 는 실제 채널 행렬, 추정된 채널 행렬, 추정 오류 행렬을 나타내고 \mathbf{H}_{err} 의 요소는 평균이 0 이고 분산이 $\sigma_{e,h}^2$ 인 독립 정규 분포를 따른다. 안테나 결함 정보를 반영한 유효 채널의 경우도 $\tilde{\mathbf{H}} = \tilde{\mathbf{H}}_{est} + \mathbf{H}_{err}$ 모델을 적용하였다. 두 경우 모두 $\sigma_{e,h}^2 = 0.05$ 를 고려하였다.

먼저, 안테나 결함 비율 20%의 경우를 고려한다. 비교를 위해 1) 안테나 결함이 없을 때의 채널 역변환, 2) 안테나 결함이 발생하였는데 안테나 탐지 정보가 없을 때의 채널 역변환, 3) 안테나 결함이 발생하였는데 안테나 결함 위치 정보를 정확히 아는 경우의 채널 역변환을 고려한다. 그림 2 는 앞서 기술한 세 가지 경우에 대해 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)의 함수로서 BER 을 비교하였다. 2)의 경우는 1) 대비 CSI 불일치로 인해 10^{-2} 의 BER 에서 약 3 dB 의 성능 열화를 보인다. 3)의 경우는 안테나 결함 정보 기반으로 유효 채널 행렬 $\tilde{\mathbf{H}}$ 을 활용하는 2)의 경우 대비 약 2 dB 의 이득을 얻는 것을 보인다.

그림 3 은 QPSK 변조를 사용하는 16 명 사용자에 대해 안테나 결함 비율의 함수로서 앞서 기술한 세 가지 경우에 대해 처리량을 비교하였다. 2)의 경우 안테나 결함이 없어 일정한 처리량을 보여주는 1)대비 안테나 결함 비율 증가에 따라 성능 열화가 커지게 된다. 안테나 결함 탐지 정보를 활용하는 3)의 경우에는 2) 대비 상당한 처리량 이득을 보인다.

IV. 결론

본 논문에서는 안테나 결함 탐지 기술 동향을 살펴보고, 안테나 결함이 다중사용자 대규모 MIMO 시스템에 미치는 영향을 분석하였다. 안테나 결함 탐지 정보를 활용하면 안테나 유지 보수가 어려운 상황에서 안테나 결함에 강인한 시스템 운용을 할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서, 기존 통신 시스템의 채널 추정, 채널 피드백, 빔포밍 최적화 등의 문제에 안테나

결함 탐지 기술을 결합하여 안테나 결함에 강인한 시스템 연구가 추후 주요 기술 이슈로 생각된다.

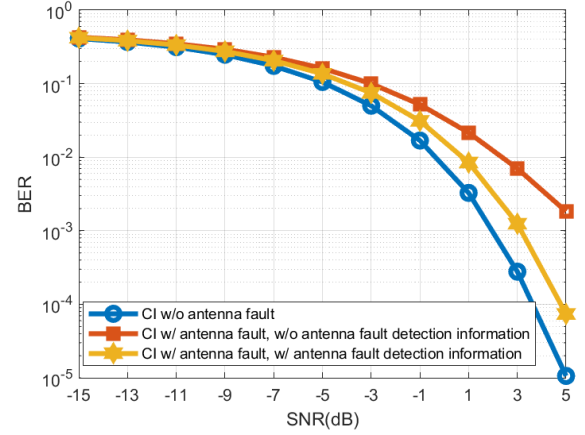


그림 2. 16×128 다중 사용자 하향링크 시스템에서의 SNR 에 따른 BER (안테나 결함 비율 20%)

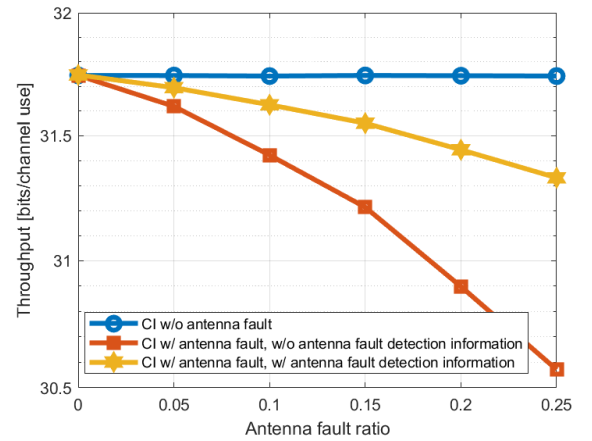


그림 3. 16×128 다중 사용자 하향링크 시스템에서의 안테나 결함 비율에 따른 처리량 (SNR(dB)=0)

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT 연구센터사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2024-RS-2023-00259061), 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-002524).

참고 문헌

- [1] H. Lee, B. Lee, H. Yang, J. Kim, S. Kim, W. Shin, B. Shim, and H. V. Poor, "Towards 6G Hyper-Connectivity: Vision, Challenges, and Key Enabling Technologies," *IEEE/KICS Journal of Communications and Networks*, vol. 25, no. 3, pp. 344-354, Jun. 2023.
- [2] P. Zhang, L. Gan, C. Ling, and S. Sun, "Atomic Norm Denoising-Based Joint Channel Estimation and Faulty Antenna Detection for Massive MIMO," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 2, pp. 1389-1403, Feb. 2018.
- [3] N. Boopalan, A. K. Ramasamy, and F. Nagi, "A comparison of faulty antenna detection methodologies in planar array," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 6, pp. 3695, 2023.
- [4] K. Chen, W. Wang, X. Chen, and H. Yin, "Deep Learning Based Antenna Array Fault Detection," *IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring)*, pp. 1-5, Apr. 2019.