

# 밀리미터파 대역의 수신 성능을 개선하기 위한 5G 시스템에 대한 연구

## A Study of 5G Systems to Improve Receiver Performance in the mmWave Band

김 명 생<sup>1</sup> · 김 동 옥<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>ICT 폴리텍대학 정보통신학과

<sup>2</sup>ICT 폴리텍대학 IT융합학과

Myeong-saeng Kim<sup>1</sup> · Dong-ok Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Information and Communication, ICT Polytech Institute of Korea, Gyeonggi-do, 12777, Korea

<sup>2\*</sup>Department of IT Convergenc, ICT Polytech Institute of Korea, Gyeonggi-do, 12777, Korea

### [요 약]

본 논문에서는 대용량 MIMO에서 하향링크 성능을 향상시키기 위해 전송할 때 방향성 프리코딩 방식과 전방위 프리코딩 방식의 성능을 조사하였다. 전방위 프리코딩은 동기나 제어 신호와 같은 공통 신호를 모든 사용자에게 브로드캐스트하기 위해 사용하였으며, 전방위 프리코딩의 주된 목적은 하향링크에서 전송되는 신호가 모든 방향에서 동일하고 최대 에너지로 방출되도록 프리코딩 행렬을 설계하는 것이다. 본 논문에서는 공간 커버리지 범위를 120도 미만으로 설정할 수 있는 전차원 거대 MIMO를 위한 유연한 전방향 프리코딩 방법을 제안하고, 제안하는 방법의 부호화 행렬을 설계하기 위해 모든 안테나의 전방향성, 등 송신 전력 및 최대 송신 속도의 제약 조건을 두어 안테나 어레이에서 안테나 사이의 거리를 변경하여 안테나 어레이의 공간 커버리지 변경을 고려한 공간 커버리지 측면에서 성능을 측정하였다.

### [Abstract]

In this paper, we investigated the performance of directional and omnidirectional precoding schemes when transmitting to improve downlink performance in massive MIMO. Omnidirectional precoding was used to broadcast a common signal, such as a synchronization or control signal, to all users. The main purpose of omnidirectional precoding is to design the precoding matrix so that the signal transmitted in the downlink is the same in all directions and emitted with maximum energy. We propose a flexible omnidirectional precoding method for full-dimensional massive MIMO that can set the spatial coverage range to less than 120 degrees. The constraints of omnidirectionality of all antennas, equal transmit power, and maximum transmit rate are used to design the encoding matrix of the proposed method. The performance was evaluated in terms of spatial coverage by considering changing the spatial coverage of the antenna array by changing the distance between neighboring antennas in the antenna array.

**Key word** : 5G, Millimeter wave, Spatial multiple, MIMO, High speed train.

<https://doi.org/10.12673/jant.2024.28.3.362>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 30 May 2024; Revised 26 June 2024

Accepted (Publication) 28 June 2024 (30 June 2024)

\*Corresponding Author; Dong-ok Kim

Tel: +82-31-760-3361

E-mail: dokim@ict.ac.kr

## I. 서론

최근 예측에 따르면 모바일 데이터의 엄청난 증가가 예상되며, 향후 몇 년 동안 모바일 데이터 트래픽이 약 10배 증가할 것으로 예상된다[1].

2018년부터 2022년까지 이러한 데이터 트래픽의 급증으로 인해 더 좋은 무선통신 기술이 필요로 하며, 이러한 수요를 충족하기 위해 다중 사용자 다중 입력 다중 출력(MU-MIMO)은 가장 유망한 방식 중 하나이다. LTE에 처음 도입된 이후 릴리스 8에서 더욱 개선되었다[2].

MU-MIMO는 높은 데이터 속도와 낮은 지연 시간, 그리고 다음과 같은 기능을 구현하여 더 좋은 스펙트럼 효율의 범포밍, 시공간 코딩 및 공간 멀티플렉싱과 같은 기능을 구현하여 더 좋은 스펙트럼 효율을 제공하고 있다. 모두 통합되어 메시브 MIMO를 형성하였으며, 다중 안테나 어레이가 베이스 스테이션에 배치된 메시브 MIMO는 여러 개의 독립적인 데이터 전송을 보장한다[3],[4].

다양한 전송 안테나를 통해 여러 사용자를 향한 스트림 안테나 이것이 공간 다중화 전송이다. 기법으로 전체 스펙트럼 효율을 향상 시킨다[5],[6]. 이러한 강력한 MU-MIMO 프레임워크는 종종 공간과 같은 다양한 소규모 장애로 이용자가 어려움을 받고 있다. 더 큰 배열을 설정 하는데 있어 간섭 및 장애물 높은 전력 소비를 유발하는 다중 안테나 시스템, 작동 및 채널 상태 정보 감지 복잡성. 일부 엄격한 연구에서는 이미 특정 문제를 인식하고 더 좋은 서비스 품질을 보장하기 위한 다양한 방안을 휴리스틱 솔루션의 입자 군집 최적화를 사용하여 전송을 위한 최소 안테나 요소 안테나 수 목적, 함께 속도 극대화를 목표로 하는데 사용자를 위한 프리코딩 기법이 포함된 SUS 및 JASUS 알고리즘을 채택했다[7],[8]. 선택 및 안테나 스케줄링을 위한 프리코딩 기법이 적용된 SUS 및 JASUS 알고리즘을 채택했으며, 또 다른 CSI 분석을 통한 안테나 선택 방법이 제안되었다. 메시브 MIMO의 에너지 효율을 향상 시키기 위한 구조의 에너지 효율을 향상시키기 위해 제안되었으며, 또한, 최적의 안테나 선택을 위해 딥러닝 기법이 최적의 안테나 선택을 위해 딥러닝 기법을 적용하여 더 좋은 성능을 추출하기 위해 최적의 안테나 선택을 위해 딥러닝 기법을 사용하였다.

본 논문은 고속 이동시스템 모델을 설계하고, 고속 이동시스템의 성능을 평가하며 결론을 맺는다.

## II. 선행연구

MIMO-OFDM 기반 이동통신 표준에서는 SU-MIMO와 MU-MIMO를 포함한 MIMO의 사용을 표준화하고 있다. 여기서 SU-MIMO는 한 사용자에게 기지국의 안테나 리소스 모두를 할당하는 방식이고 MU-MIMO는 다수의 사용자에

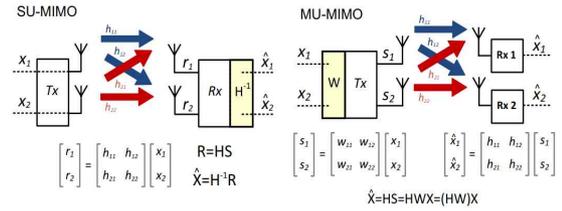


그림 1. SU-MIMO, MU-MIMO 시스템 블록 다이어그램  
Fig. 1. SU-MIMO, MU-MIMO system block diagram.

게 안테나 리소스 또는 무선 공간 자원을 분배하는 방식이다.

MIMO는 사용자 장비(UE)와 기지국(BS)이 모두 여러 개의 안테나를 사용하는 방식이다. 이 채널 조건에 따라 다양한 유형의 전송 모드를 지원할 수 있다. 그림 1에서 전송 다이버시티는 두 가지 경우로 구분된다.

여러 안테나에서 동시에 전송하여 SNR을 높이는 전송 다이버시티와 공간 멀티플렉싱 각 안테나에서 독립적인 데이터 스트림을 전송하여 용량을 늘리는 경우가 있다[9].

SU-MIMO는 현재 LTE 네트워크에서 사용된다. 이 방식은 다중 스트림 전송으로 인한 간섭으로, 수신되는 서로 다른 데이터 스트림을 분리해야 하는 복잡성을 가지고 있다. 예를 들어, 채널 행렬 H(채널 경로 계수로 구성된 행렬)에 대한 지식은 송신기 측에서는 필요하지 않지만, 수신기 측에서는 수신된 신호를 디코딩하는 데 필요하다. 수신기는 프리앰블 또는 파일럿 데이터를 디코딩하여 채널 지식을 개발한다. 이를 위해서는 많은 역 채널 행렬 H-1을 계산하는 데 많은 연산 능력이 필요하다. 그러나 수신기가 모바일 기기 경우 배터리 제약으로 인해 이러한 모든 계산을 수행하는 것은 효율적이지 않다.

디바이스인 경우 이러한 모든 계산을 수행하는 것은 효율적이지 않다. MU-MIMO에서는 사용자 간의 수신 신호 간섭을 줄이는 precoding을 통하여 정확한 채널 추정을 함으로써 단말기 간의 간섭을 효율적으로 제거해준다.

메시브 MIMO를 위한 스케줄링 및 피드백적교 주파수 분할 다중화 시스템에서는 기준 신호는 채널을 추정하는데 사용한다[10]. 그림 2에 표시된 피드백 루프에서 UE는 모바일이 동일한 주파수 리소스에서 동시에 처리할 수 있는 정보 스트림의 수를 나타내는 순위 표시를 계산한다.[11]

SNR이 낮으면 모바일은 낮은 RI (Rank Indicator/Rank Index) 파라미터 값을 반환한다. 이 경우 기지국의 모든 안테나에서 동일한 스트림이 전송되며 이를 통해 커버리지 채널 품질 표시기는 SNR을 설명하는 데 사용되는 매개변수이며, 이는 UE(User Equipment)가 기지국에 송신한다. 그런 다음 CQI(Chanel Quality Indicator/Indication)는 기지국에서 적절한 변조 및 부호화 체계 지수로 변환된다. MCS(Modulation Coding Scheme) 인덱스는 다음과 같다. 링

크 품질을 유지하기 위해 사용해야 하는 변조 방식과 전송 속도를 나타낸다. 또한, 프리코딩 매트릭스 표시기는 최상의 프리코딩을 수신하는 데 사용하고, 매트릭스를 기지국에 보고하는 데 사용한다[12]. 또한 기지국에 정보를 프리코딩하는 방법을 알려준다.

정보를 각 안테나로 전송하기 전에 기지국에 알려주어 UE(User Equipment)가 이 정보를 가장 잘 복구할 수 있도록 한다. 따라서 PMI(Precoding Matrix Indicator)는 코드북(Codebook)의 인덱스이다.

MIMO는 기지국과 단말기가 여러 개의 안테나를 사용하여 안테나 간에 정보를 분배하거나 통신할 수 있는 데이터 용량을 늘려 이동통신 간에 채널 손실과 사용 간의 간섭을 최소화한 방식으로 UE는 복잡한 채널 계산을 피하고 동일 주파수에서 신호를 분리하여 채널의 용량을 대량으로 전송할 수 있다[13].

UE는 전송된 기준 신호로 인해 채널 조건을 알고 있다. PMI 파라미터는 현재 전송을 위해 기지국에서 사용하는 프리코딩 행렬을 SU-MIMO 및 MU-MIMO 모두에 대해 정의한다.

신호가 LTE 릴리스 10 TM9(8계층 공간 다중화)에 도입되었다[14]. 이는 채널 상태 정보 참조 신호(CSI-RS)로, 셀의 모든 사용자에게 공통으로 적용되는 셀의 모든 사용자에게 공통인 채널 상태 정보 참조 신호와 복조 참조 신호 각 UE 전용이다. CSI-RS는 UE에서 계산 및 보고하고 통보하는 데 사용된다. 반면, DMRS는 신호 복조에 사용되며 릴리스 9 듀얼 레이어 빔포밍에서 이미 빔포밍에 사용하는 MIMO 시스템의 성능은 정확한 CSI 측정과 피드백에 의해 제한된다. 따라서 주요 기술 개선 사항에는 아날로그 CSI 피드백을 사용하여 프리코딩 매트릭스 피드백 정확도를 개선하고 더 빠른 CQI 피드백을 사용하는 것이 포함한다. 이렇게 하면 사전 예약된 CQI를 측정할 때 실제 채널 품질이 향상된다.

CSI-RMU-MIMO에서의 스케줄링은 일련의 채널 벡터를 UE에 할당하는 것을 기반으로 하지만 채널 벡터 세트를 할당하고 CSI의 정확도에 따라 달라지지만, 대규모 MIMO에서는 UE가 여러 그룹으로 그룹별로 채널 피드백이 보고되는 2단계 UE 스케줄링 및 피드백 방법을 고려하는 것이 좋다.

전체 기지국이 모든 UE의 CSI를 수집하는 방식 및 부분 CSI 피드백 방식과 같은 다른 기존 방식을 비교한 것입니다. 그림2에서 볼 수 있듯이 부분 CSI 피드백 방식에서는 피드백의 양은 상대적으로 적지만 다운링크 전송 성능은 일반적으로 전체 CSI 접근 방식보다 낫다. 반면에 2단계 방식은 부분 CSI 방식에 비해 피드백의 양은 적지만 전체 CSI 피드백 방식에 매우 근접한 스펙트럼 효율을 달성한다.

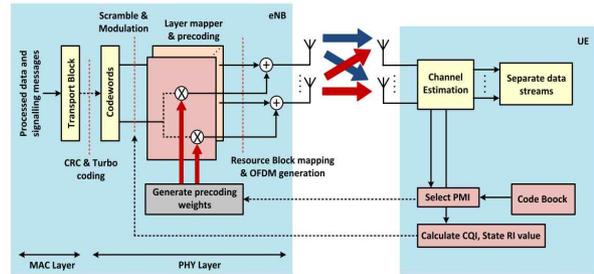


그림 2. UE 피드백 체계도  
Fig. 2. UE Feedback Schemati.

### III. 시스템 모델 설계

유연한 무지향성 프리코딩 제안은 실제로 셀 내 사용자가 제한된 각도로 배치되는 조건이 있다고 가정하였다. 예를 들어, 도시 환경에 거주하는 사용자를 커버하는 것이 목표인 경우, 커버하는 고도 각도는 제한되어 있으며 전체 각도를 커버할 필요가 없는 가정이다. 제약 조건을 적용하는 한 가지 방법은 제한된 각도 패턴을 가진 안테나를 사용하는 것인데,  $\theta \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$  이는 하드웨어 제약으로 이어지고 유연성이 없고 완전히 호환되지 않는 등의 문제가 있을 경우는 없다는 가정이다.

#### 3-1. 모의실험

제한된 방법의 성능을 평가하기 위해 시뮬레이션 결과를 제안하고 검토하였다. 결과는 사용자 측에서 수신된 평균 전력을 기준으로 한다. 이를 위해 전송되는 신호의 주파수를 2.8GHz,  $r = 10$ 으로 선택했다.

첫 번째 실험에서는 64개의 안테나 ( $M_x = M_z = 8$ ) 그리고  $u_0 = 0.12 \text{ rad}$ 를 적용하면 값은 다음과 같다.

High Speed Train (HST) 시스템을 위한 신뢰성 있는 무선 통신 서비스는 제5세대 (5G) 무선통신 시스템에서 중요한 문제로 고려하였다. 따라서, 다중 매시브 MIMO는 RF 체인 수가 증가함에 따라 이러한 전력 증폭기의 효율은 대규모 MIMO 시스템의 에너지 효율 요구 사항을 충족하는 데 매우 중요하다.

송신기에서 t 번째 안테나는 N 개의 데이터 심볼 블록  $X_n^{(t)}; n = 0, 1, \dots, N-1, X_n^{(t)}; n = 0, 1, \dots, N-1$ 은 r 번째 수신기의 안테나에서 수신된 블록이다. 또한 전체 채널 임펄스 응답보다 긴 길이의 주기적 접두사가 각 전송 블록에 추가되고 수신기에서 제거된다. 이러한 조건에서 해당 주파수 도메인 수신 블록은 다음과 같이 주어진다.

$$Y_k = Y_k^{(R)} ; k = 0, 1, \dots, N-1$$

$$Y_k = [Y_k^{(1)} \dots Y_k^{(R)}]^T = H_k X_k + N_k$$

(1)  $N_k$ 는  $k$ 번째 AWGN(Additive White Gaussian Noise)이며, ZF 코딩 신호 벡터이며 다음과 같이 표현된다.

$$x = \frac{1}{\sqrt{Y}} V q_r$$

$$(2) \quad q = [q_1 \dots q_2 \dots q_k]^T ZF$$

프리코딩 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = H(H^H H)^{-1}, V \in C^{N \times K}, y$$

(3)

이를 확인하기 위해  $Tr((HH^H)^{-1} (*)^H E(\|x\|)^2) = 1$  전체 기지국(BS) 전송 전력이 최대이면 전력 정규화 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$r = \frac{P_d}{Y} \tag{4}$$

수신된 신호 대 잡음비(SNR)가 모든 사용자에 대해 동일하다고 가정하면 수신된 SNR은 다음과 같다.

$$SNR = \frac{\Gamma}{\alpha_n^2} = \frac{P_d}{Tr(H_{kN} H_{kN}^H)^{-1} \alpha_n^2} \tag{5}$$

$$(S^j S^{jH})^{-1} = \begin{bmatrix} (S_{1\bar{L}}^j)^2 & \dots & S_{1\bar{L}}^j S_{k\bar{L}}^j & \dots & S_{1\bar{L}}^j S_{K\bar{L}}^j \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{k\bar{L}}^j S_{1\bar{L}}^j & \dots & (S_{k\bar{L}}^j)^2 & \dots & S_{k\bar{L}}^j S_{K\bar{L}}^j \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{K\bar{L}}^j S_{1\bar{L}}^j & \dots & S_{K\bar{L}}^j S_{k\bar{L}}^j & \dots & (S_{K\bar{L}}^j)^2 \end{bmatrix}^{-1} \tag{6}$$

$$\gamma_j = \sum_{i=1}^k g_n^j \tag{7}$$

여기서  $g_{ii}^j$ 는 3번째 행  $G^j$ 의 3번째 열에 있는 요소이다.

따라서 모든 후보 송신 안테나 서브세트에 대해  $\gamma$ 의 값이 계산되고, 가장 작은 값을 생성하는 송신 안테나 서브세트는 다음과 같이  $g_{ii}^j G^j$ 가 선택된다.

RF 증폭 단계에서 NL 전력 증폭기를 사용하면 전력 소비를 최소화할 수 있다. 전력 소비를 최소화할 수 있으며, 특히 높은 비트 전송률 시나리오에서 중요하며 기가비트 데이터 전송률 이상에서 특히 기가비트 데이터 속도 이상에서 중요하다. 그러나 NL 증폭기에서 신호 왜곡을 방지하려면, 전송된 신호의 PAPR이 낮아야 하는데, 이는 달성하기 어렵다. 고차 구성 또는 고도의 선택적 필터링을 사용하는 OFDM 신호 또는 SC 신호에서 필터링하여 적용하였다. 따라서 레코딩 및 PAPR 감소 기술을 사용하는 것이 필수적이지만 앞서 언급한 바와 같이, PAPR 감소 기술에는 한계가 있으며 일반적으로 처리 복잡성 증가 또는 처리 복잡성 그리고 비선형 왜곡이 증가된다. 이러한 전력 효율적인 증폭기 제약으로 인해 프리코딩 기술을 사용해야 할 수 있다.

복잡성과 전력 소비로 인해 전체 시스템의 에너지 효율이 저하될 수 있는 점을 고려하였다.

그림 3과 그림 4의 SC 변조는 이론적으로 대규모 MIMO에서 최적에 가까운 채널 전력 지연 프로파일과 구별되는 낮은 송신 전력 대 수신기 잡음 전력 비율로 작동하는 대규모 MIMO 시스템에서 합계 속도 성능의 이퀄라이제이션이 없는 수신기를 사용하였다. 이미 언급한 바와 같이, SC 변조는 본 논문은 5G 이동통신 시스템에 맞춰 5G New radio (NR) frame을 구성하고 mmwave대역에서 고속으로 이동하는 환경인 HST(high speed train) 채널 조건하에서 mobile relay station (MRS)의 업링크 및 다운링크의 성능을 평가하였다. 다양한 사용자 이동성에 대해 다음과 같은 안테나 조합을 포함하고 있다.

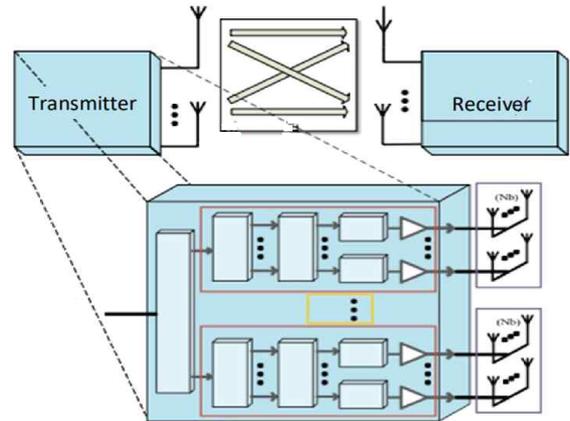


그림 3. MIMO 송신기 구조도  
Fig. 3. MIMO transmitter structure chart.

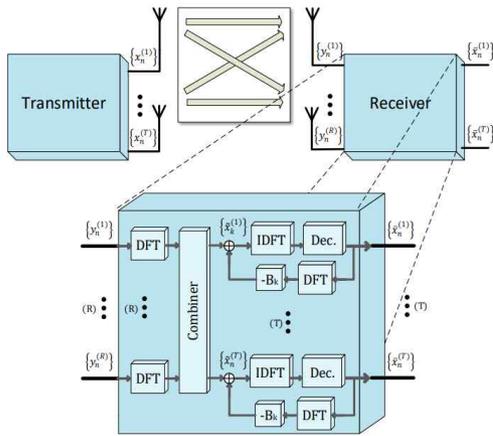


그림 4. SC-FDE 수신기 시스템  
 Fig. 4. SC-FDE receiver system.

해당 송신 안테나보다 더 많은 수의 수신 안테나를 가지고 있으며, 송신결합된 방식을 편광 빔 분할 다중 액세스라고 한다.

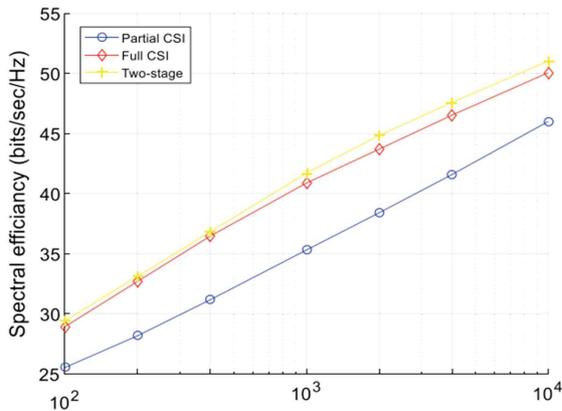


그림 5. 편파 안테나 요소 유형 비교  
 Fig. 5. Polarized antenna element type comparison

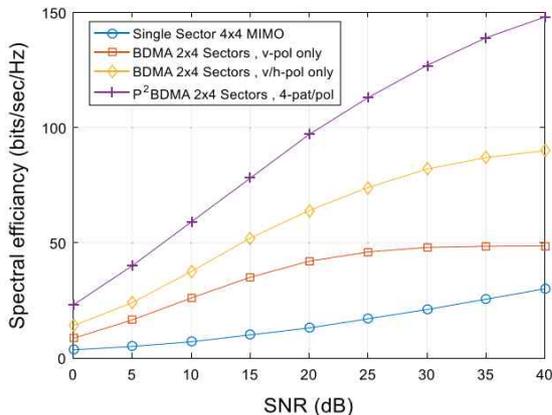


그림 6. 스펙트럼 SNR과 효율 비교  
 Fig. 6. Spectrum SNR and Efficiency Comparison

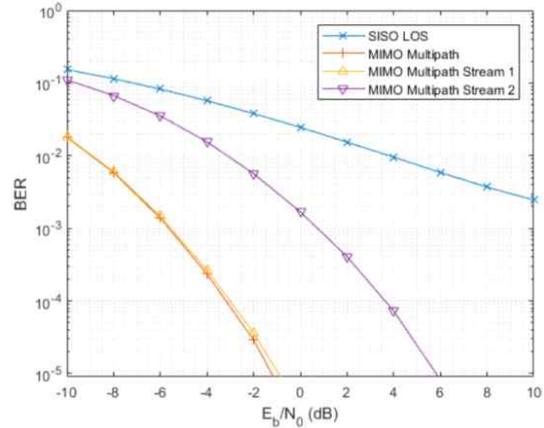


그림 7. 다중 경로의 BER 개선 비교  
 Fig. 7. Comparison of BER improvements in multipaths

그림 5는 편파 안테나 요소의 네 가지 유형(K=4)을 보이고 있다. 편파 안테나 어레이는 K 개의 가상 안테나 어레이로 분해되고 각 어레이는 빔을 생성하여 요소 유형별 성능을 확인하였다.

그림 6은 기존 3섹터 시스템(N=4)의 단일 120° 섹터와 수직 편파를 가진 단일 안테나 어레이로 구성된 8 섹터 시스템이다. (BDMA: K=1, N=1). 또한 두 개의 가상 안테나 어레이로 구성된 8 섹터 시스템으로 스펙트럼 SNR과 효율 비교를 하였다.

안테나 어레이의 하나는 수직 편파, 다른 하나는 수평 편파로 구성된 8 섹터 시스템으로 하여 성능을 분석하였다 (BDMA: K=2, N=2). 마지막으로 서로 다른 패턴/편파를 가진 4개의 가상 안테나 어레이로 구성된 8섹터 시스템이다 (P<sup>2</sup>BDMA: K=4, N=4).

그림 7은 다중 경로 환경에서 단일 LOS 데이터 스트림의 처리량을 단일 LOS 데이터 스트림의 처리량과 다중 경로 환경에서 여러 데이터 스트림 처리량을 비교하였다. 스트림은 첫 번째 스트림 만큼 높은 이득을 제공하지는 않지만 서브채널을 사용하기 때문에 전체 정보 처리량은 항상 된다. 결과적으로 비어 있는 채널을 개선할 수 있으며, 또한 이 개념은 더 많은 채널로 쉽게 확장할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 전차원 다중입출력 시스템의 다운링크 경로에서 공통 신호를 전송하기 위한 유연한 무지향성 매시브 MIMO의 성능향상을 구조의 에너지 효율을 향상시키기 위해 제안되었으며, 또한, 최적의 안테나 선택을 위해 딥러닝 기법을 적용하여 더 좋은 성능을 추출하였다. 가상 각도 u, v를 기준으로 수신 평균 전력에서 지정된 유한 각도 코팅을 달성하도록 설계하여 성능을 확인하였다. 향후

대규모 MIMO 네트워크에서 성능향상을 위한 안테나 시스템 구성하기를 연구 계획이다.

## Acknowledgments

본 연구는 2024년도 과학기술정보통신부의 초고속인력양성 사업으로 ICT 폴리텍대학 지원에 의하여 이루어진 연구로서 관계부처에 감사드립니다.

## References

[1] J. W. Noh, E. J. Cho, J. T. Kim, and S. H. Lee, "A study on the implementation of simple portable directional finding system for 5G mobile communication," *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)* Vol. 20, No. 3, pp.25-30, Jun. 30, 2020. DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2020.20.3.25>.

[2] H. Yang, and T. L. Marzetta. "Performance of conjugate and zero forcing beamforming in large-scale antenna systems" *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 31, No. 2, pp. 172-179, Feb. 2013. DOI: 10.1109/JSAC.2013.130206

[3] J. C. Marinello and T. Abrao, "Pilot distribution optimization in multi-cellular large scale MIMO systems," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 70, No. 8, pp. 1094-1103, Aug. 2016. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.aeue.2016.05.007>

[4] Y. Nan, L. Zhang and X. Sun, "Efficient downlink channel estimation scheme based on block-structured compressive sensing for TDD massive MU-MIMO systems," *IEEE Wireless Communications Letters*, Vol. 4, No. 4, pp. 345~348, Aug. 2015. DOI: 10.1109/LWC.2015.2414933.

[5] E.G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T.L. Marzetta "Massive MIMO for next generation wireless systems," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 52, No. 2, pp. 185-195, Feb. 2014. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6736761.

[6] J. Zhang, B. Zhang, S. Chen, X. Mu, M. E. Hajar, and L.

Hanzo "Pilot contamination elimination for large-scale multiple-antenna aided OFDM systems," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Vol. 8, No. 5, pp. 759-772, Oct. 2014. DOI: 10.1109/JSTSP.2014.2309936.

[7] F. Rusek, D. Persson, B. K.Lau, EG Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays," *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 30, No. 1, pp. 40-60, Jan. 2013. DOI: 10.1109/MSP.2011.2178495.

[8] T. Kim, K. Min, and M. Jung "Scaling laws of optimal training lengths for TDD massive MIMO systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 67, No. 8, pp. 7128-7142, Aug. 2018. DOI: 10.1109/TVT.2018.2827935.

[9] W. Guo, J. Fan, G. Y. Li, Q. Yin, and X. Zhu "Adaptive SU/MU-MIMO scheduling schemes for LTE-A downlink transmission," *IET Communications*, Vol. 11, No. 6, pp. 783-792, Mar. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-com.2016.0456>.

[10] L. Ge, Y. Zhang, G. Chen, and J. Tong, "Compression-based LMMSE channel estimation with adaptive sparsity for massive MIMO in 5G systems," *IEEE Systems Journal*, Vol. 13, No. 4, pp.3847~3857, Dec. 2019. DOI: 10.1109/JSYST.2019.2897862.

[11] F. Zheng, Y. Chen, B. Pang, C. Liu, S. Wang, D. Fan, and J. Zhang, "An efficient CSI feedback scheme for dual-polarized massive MIMO," *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 23420~23430, Mar. 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2811838.

[12] J. Penttinen, *The Telecommunications Handbook Engineering Guidelines for Fixed Mobile and Satellite Systems*, 1st ed. New York, NY: Wiley, 2015.

[13] C. M. Li and K. J. Huang, "Dual-codebook precoding selection for LTE-A system," *IEEE Systems*, Vol. 13, No. 1, pp. 110-116, Mar. 2019. DOI: 10.1109/JSYST.2018.2870117.

[14] H. Tran, T.A. Mai, D. H. Vuong, and N. Nguyen, "On improvement of channel estimation for the uplink of large scale MU-MIMO using DMRS," in *IEEE 5G World Forum (5GWF)*, Silicon Valley:CA, pp. 294-298, July. 2018. DOI: 10.1109/5GWF.2018.8517022.



**김명생(Myeong-Saeng Kim)**

1992년 : 경상국립대학교 전자공학(학사),  
2007년 : 공주대학교 대학원 (박사수료),  
2003년~현재 ICT 폴리텍대학 정보통신학과 부교수  
※ 관심분야: 광네트워크, 회로설계, 5G

2000년 : 건국대학교 대학원(석사)  
1997년~2002년 : 정보통신교육원



**김동옥(Dong-ok Kim)**

1988년~ 1995 Danco!, Inc. RF Engineer,  
2002년 항공대학교 정보통신공학과 (공학박사),  
2003년~ 현재 ICT 폴리텍대학 IT융합학과 교수  
※ 관심분야: 5G, WiFi Mesh, 네트워크

1995년 ~ 2003년 서울이동통신(주)