

하이브리드 사용자 클러스터로의 동시 전송을 위한 다중안테나 기반 비직교 다중접속

신창용

선문대학교 스마트정보통신공학과

Multi-Antenna Based Non-Orthogonal Multiple Access for Simultaneous Transmission to a Hybrid User Cluster

Changyong Shin

Department of Smart Information and Communications Engineering, Sun Moon University

요약 본 논문에서는 주파수 효율을 향상하기 위해 기지국이 한명의 셀 중심 사용자와 다수의 셀 경계 사용자로 구성된 하이브리드 클러스터에 동시에 데이터 스트림을 전송하는 다중안테나 기반 비직교 다중접속 방식(NOMA)을 제안한다. 이 방식은 신호 대 잡음비(SNR)가 높은 셀 중심 사용자에게는 효과적으로 송신전력이 할당된 다수의 데이터 스트림을 전송한다. 그리고 제안 방식은 SNR이 낮은 셀 경계 사용자들의 수신 신호 전력을 향상하면서 동시에 셀 경계 사용자 간의 간섭을 제거하도록 결합적으로 설계된 프리코더와 수신 빔포밍 벡터를 이용하여 각 셀 경계 사용자에게는 단일 데이터 스트림을 전송한다. 시뮬레이션을 통해 제안 방식이 하나의 사용자 클러스터 혹은 다수의 사용자 클러스터에 동시에 데이터 스트림을 전송하는 기존의 다중안테나 기반 NOMA 방식보다 모든 사용자에서 우수한 총합 전송률 성능을 달성함을 보인다.

Abstract This paper presents a multi-antenna based non-orthogonal multiple access (NOMA) technique in which a base station (BS) simultaneously transmits data streams to a hybrid cluster that consists of one cell-center user and multiple cell-edge users to improve spectral efficiency. This technique effectively allocates the transmission power to multiple data streams that are transmitted to a cell-center user with a high signal-to-noise ratio (SNR). Precoder and receive beamforming vectors are jointly designed to improve the received signal power for cell-edge users with low SNR and to cancel out the interference between cell-edge users. Using this method, the proposed technique transmits a single data stream to each cell-edge user. Simulation results show that the proposed technique achieves better sum rate performance for all users than the existing multi-antenna based NOMA techniques that simultaneously transmit data streams to one user cluster or multiple user clusters.

Keywords : Beamforming, Interference, Multi-Antenna, NOMA, Spectral Efficiency

1. 서론

6G와 같은 차세대 무선통신 시스템은 초고속, 초저지연, 초연결을 복합적으로 요구하는 다양한 무선 서비스를 지원하는 것이 중요하다 [1-3]. 현재의 상용 다중접속

방식은 무선접속 사용자에게 서로 직교하는 주파수 자원을 할당하여 서비스를 제공하고 있다. 이 방식은 시스템 설계를 단순하게 하는 장점은 있으나 서비스 트래픽이 증가하고 무선접속 사용자가 증가함에 따라 방대한 양의 주파수 자원을 필요로 한다. 그러나 무선통신에 유용한

Corresponding Author : Changyong Shin(Sun Moon Univ.)

email: cyshin@sunmoon.ac.kr

Received April 11, 2023

Accepted June 2, 2023

Revised May 8, 2023

Published June 30, 2023

주파수 자원은 한정되어 있어 현존 방식으로는 이러한 서비스 요구를 충족시키기 어렵다. 따라서 한정된 주파수 자원을 효율적으로 활용하여 이 문제를 극복하는 새로운 패러다임의 다중접속 기술에 대한 필요성이 대두되고 있다.

이러한 다중접속 방식으로 다수의 무선접속 사용자에게 동일한 주파수 자원을 동시에 중복 할당하여 서비스를 제공하는 비직교 다중접속(non-orthogonal multiple access: NOMA) 방식에 대한 관심이 증가하고 있다 [4-8]. 주요 NOMA 방식들을 기술하면 다음과 같다. [9]에서 제안된 다중안테나 기반 NOMA 방식은 동시에 전송할 클러스터 내 사용자 데이터에 대해 기지국이 중첩 코딩(superposition coding)을 적용하고 랜덤 빔포밍(random beamforming)을 이용하여 전송한다. 사용자는 SIC(successive interference cancellation)을 이용하여 수신 신호로부터 자신의 데이터를 복원한다. 그러나 이 기법은 사용자 클러스터 간 간섭으로 인해 성능 열화가 발생할 수 있다.

사용자 클러스터가 기지국 근처에 위치한 한명의 셀 중심 사용자(cell-center user)와 셀 가장자리에 위치한 한명의 셀 경계 사용자(cell-edge user)로 구성될 때, 사용자 클러스터 간 간섭을 제거하기 위해 [10]의 다중안테나 기반 NOMA 기법에서 사용자는 다른 클러스터로부터의 간섭과 직교하는 수신 빔포밍 벡터를 사용한다. 또한 [10]의 기법보다 적은 수의 수신안테나를 이용하여 클러스터 간 간섭을 제거하기 위해 [11]의 NOMA 방식은 클러스터 내의 사용자 채널을 정렬하는 수신 빔포밍 벡터와 클러스터 간 간섭을 제거하는 기지국의 프리코더(precoder)를 이용한다. [10]과 [11]의 방식은 동시에 다수의 사용자 클러스터를 지원할 수 있으나 각 사용자에게 하나의 데이터 스트림만 전송할 수 있다.

한편 클러스터 내의 각 사용자에게 다수의 데이터 스트림을 동시에 전송하는 다중안테나 기반 NOMA 방식이 [12-16]에서 개발되었다. [12-15]의 방식은 GSVD (generalized singular value decomposition) [17]을 이용하여 셀 중심 사용자와 셀 경계 사용자의 MIMO (multiple-input multiple-output) 채널을 다수의 정렬된 SISO(single-input single-output) 채널로 변환하여 SISO 기반 NOMA 방식을 적용한다. 또한 [16]의 방식은 계층 전송(layered transmission) [18,19]와 각 사용자의 데이터 스트림 계층별 송신전력할당을 이용한다. 이 방식들은 각 사용자에게 다수의 데이터 스트림을 동시에 전송할 수 있으나 한 번에 한명의 셀 중심 사용자

와 한명의 셀 경계 사용자로 구성된 하나의 클러스터만 지원할 수 있다.

본 논문에서는 주파수 효율을 향상하기 위해 한명의 셀 중심 사용자와 다수의 셀 경계 사용자로 구성된 하이브리드 클러스터에 데이터 스트림을 동시에 전송하는 다중안테나 기반 NOMA 방식을 제안한다. 이 방식은 SNR(signal-to-noise ratio)이 높은 셀 중심 사용자에게는 효과적으로 송신전력이 할당된 다수의 데이터 스트림을 전송한다. 또한 제안 방식은 SNR이 낮은 셀 경계 사용자에게는 사용자 간 간섭을 제거하면서 동시에 수신 신호 전력을 향상하도록 결합적으로 설계된 프리코더와 수신 빔포밍 벡터를 이용하여 하나의 데이터 스트림을 전송한다. 시뮬레이션을 통해 제안한 방식이 하나의 사용자 클러스터 혹은 다수의 사용자 클러스터에 동시에 데이터 스트림을 전송하는 기존의 다중안테나 기반 NOMA 방식보다 모든 사용자에서 우수한 총합 전송률(sum rate) 성능을 달성함을 보인다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 2절에서는 기지국이 MIMO-NOMA 방식을 이용하여 한명의 셀 중심 사용자와 다수의 셀 경계 사용자로 구성된 클러스터로 데이터 스트림을 전송하는 하향링크 시스템 모델을 기술한다. 제 3절에서는 주파수 효율을 향상하기 위해 제안하는 MIMO-NOMA 방식을 설명한다. 제 4절에서는 시뮬레이션을 통해 각 사용자의 전송률에 대한 제안 방식의 성능을 평가한다. 마지막으로 제 5절에서 본 논문을 결론 맺는다.

2. MIMO-NOMA 시스템

MIMO 시스템의 다중화 이득(multiplexing gain)은 수신 SNR이 높은 영역에서 획득된다. 따라서 기존의 MIMO-NOMA 방식과 다르게, 수신 SNR이 높은 셀 중심 사용자에게 대해서는 다중화 이득을 이용하기 위해 한명의 사용자에게 최대한 많은 데이터 스트림을 전송하고 수신 SNR이 낮은 셀 경계 사용자에게 대해서는 수신 SNR을 개선하면서 최대한 많은 사용자를 동시에 지원하는 것이 총합 전송률을 향상하는데 효과적이다.

이것을 바탕으로 본 논문에서는 Fig. 1에 보인 셀룰러 시스템의 하향링크 전송을 고려한다. 이 시스템에서 기지국은 NOMA 방식을 이용하여 한명의 셀 중심 사용자와 K 명의 셀 경계 사용자로 구성된 클러스터에 데이터 스트림을 동시에 전송한다. 이때 기지국과 모든 사용자

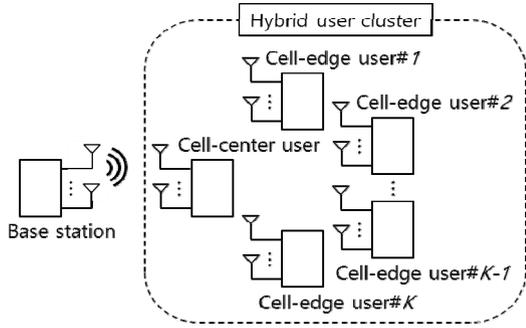


Fig. 1. MIMO-NOMA downlink system transmitting data streams to a hybrid user cluster

는 K 개의 안테나를 채용하고 기지국은 셀 중심 사용자에는 K 개의 데이터 스트림을 전송하고 셀 경계 사용자에는 각각 하나의 데이터 스트림을 전송한다.

기지국과 셀 중심 사용자 간의 채널을 H_c 로, 기지국과 k 번째 셀 경계 사용자 간의 채널을 $H_{e,k}$ 로 각각 표시하고 셀 중심 사용자와 K 명의 셀 경계 사용자로 전송되는 데이터 스트림 벡터를 각각 d_c 와 d_e 로 나타내면, 셀 중심 사용자에서 수신한 신호 r_c 와 k 번째 셀 경계 사용자에서 수신한 신호 $r_{e,k}$ 는 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_c = H_c(Q_d d_c + P Q_e d_e) + n_c \quad (1)$$

$$r_{e,k} = H_{e,k}(Q_d d_c + P Q_e d_e) + n_{e,k} \quad (2)$$

여기서 벡터 d_e 의 k 번째 원소는 k 번째 셀 경계 사용자로 전송되는 데이터 스트림이고 행렬 P 는 셀 경계 사용자의 데이터 스트림 간 간섭을 제거하기 위한 프리코더이다. Q_c 와 Q_e 는 각각 셀 중심 사용자와 셀 경계 사용자로 전송되는 데이터 스트림의 송신전력할당 행렬이다. 수신 잡음 n_c 와 $n_{e,k}$ 는 각각 평균이 영벡터이고 공분산 행렬이 $\sigma_c^2 I_K$ 와 $\sigma_{e,k}^2 I_K$ 인 백색 가우시안 잡음 벡터이다. I_K 는 $K \times K$ 단위행렬을 의미한다. $E\{d_c d_c^H\} = E\{d_e d_e^H\} = I_K$ 이고 $E\{\cdot\}$ 와 $(\cdot)^H$ 는 각각 기댓값과 켈레전치를 나타낸다.

셀 중심 사용자와 k 번째 셀 경계 사용자는 자신의 수신 신호에 다음과 같이 각각 수신 빔포밍 행렬 W_c 와 수신 빔포밍 벡터 $w_{e,k}$ 을 적용하여 자신의 데이터를 복원한다.

$$W_c^H r_c = W_c^H H_c(Q_d d_c + P Q_e d_e) + W_c^H n_c \quad (3)$$

$$w_{e,k}^H r_{e,k} = w_{e,k}^H H_{e,k}(Q_d d_c + P Q_e d_e) + w_{e,k}^H n_{e,k} \quad (4)$$

다음 절에서는 이 시스템의 주파수 효율을 향상하기 위해 제안하는 수신 빔포머 W_c 와 $w_{e,k}$, 프리코더 P , 송신 전력할당 행렬 Q_c 와 Q_e 의 설계방법을 설명한다.

3. 송수신 빔포밍과 전력할당 방법

셀 경계 사용자의 데이터 스트림 간의 간섭을 제거하기 위한 프리코더 $P = [p_1 p_2 \cdots p_K]$ 와 셀 경계 사용자의 수신 빔포밍 벡터 $w_{e,k}$ 는 다음과 같이 반복적인 과정을 통해 구해진다. i 번째 반복과정을 통해 구하는 수신 빔포밍 벡터와 프리코더를 각각 $w_{e,k}^{(i)}$ 와 $P^{(i)} = [p_1^{(i)} p_2^{(i)} \cdots p_K^{(i)}]$ 라 하고 행렬 $[H_{e,1}^H w_{e,1}^{(i)} \cdots H_{e,k-1}^H w_{e,k-1}^{(i)} \cdots H_{e,k+1}^H w_{e,k+1}^{(i)} \cdots H_{e,K}^H w_{e,K}^{(i)}]$ 을 $A_k^{(i)}$ 로 나타내면 $w_{e,k}^{(i)}$ 는

$$w_{e,k}^{(i)} = H_{e,k} p_k^{(i-1)} / \|H_{e,k} p_k^{(i-1)}\| \quad (5)$$

로 주어지고 $p_k^{(i)}$ 는

$$A_k^{(i)H} p_k^{(i)} = 0, \|p_k^{(i)}\| = 1, k = 1, 2, \dots, K \quad (6)$$

이 만족하도록 설계된다. 여기서 0 은 영벡터를 의미하고 초기조건으로 $P^{(0)} = I_K$ 을 적용한다. 이러한 반복과정은 $\|w_{e,k}^{(i+1)} - w_{e,k}^{(i)}\|$ 이 허용오차 ϵ 보다 크지 않을 때까지 지속적으로 수행된다.

한편 셀 중심 사용자는 셀 경계 사용자의 데이터에 의한 간섭을 먼저 제거하고 나서 자신의 데이터를 복원한다. Eq. (1)에서 셀 경계 사용자의 데이터 간섭을 제거한 수신 신호를 \tilde{r}_c 라 하고 SVD(singular value decomposition)에 의해 채널 H_c 를 $U_S V_c^H$ 로 분해하면 \tilde{r}_c 는

$$\tilde{r}_c = U_S V_c^H Q_d d_c + n_c \quad (7)$$

로 표현된다. \tilde{r}_c 에 수신 빔포밍 행렬로써 U_c^H 을 사용하면

$$U_c^H \tilde{r}_c = S_c V_c^H Q_d d_c + U_c^H n_c \quad (8)$$

와 같이 주어진다. 이 시스템에서 셀 중심 사용자의 달성 가능한 전송률 R_c 는

$$R_c = \log_2 \left\{ \det(I_K + \sigma_c^{-2} S_c^2 V_c^H Q_d Q_d^H V_c) \right\} \quad (9)$$

$$\leq \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \sigma_c^{-2} [S_c^2]_{kk} [V_c^H Q_d Q_d^H V_c]_{kk} \right)$$

로 주어진다. 여기서 $[\]_{kk}$ 는 행렬의 k 번째 주대각원소를 표시한다.

행렬 $V_c^H Q_d Q_d^H V_c$ 이 대각행렬일 때 R_c 의 상한이 달성되므로 이 대각행렬을 A_c^2 라 하고 셀 중심 사용자를 위해 최대 P_c 의 송신전력이 할당된다면 water-filling 알고리즘 [20]에 의해 $[A_c^2]_{kk}$ 는

$$[A_c^2]_{kk} = \max \left\{ 0, \lambda_c - \sigma_c^2 [S_c^2]_{kk}^{-1} \right\} \quad (10)$$

로 주어진다. 이때 λ_c 는 $\sum_{k=1}^K [\mathbf{A}_c^2]_{kk} = P_c$ 이 만족되도록 설정된다. 결과적으로 셀 중심 사용자를 위한 데이터 스트림의 송신전력할당 행렬 \mathbf{Q}_c 는

$$\mathbf{Q}_c = \mathbf{V}_c \mathbf{A}_c \quad (11)$$

로 구해지고 전송률 R_c 는

$$R_c = \sum_{k=1}^K \log_2(1 + \sigma_c^{-2} [\mathbf{S}_c^2 \mathbf{A}_c^2]_{kk}) \quad (12)$$

로 주어진다. Eq. (11)을 Eq. (8)에 대입하면 $\mathbf{U}_c^H \tilde{\mathbf{r}}_c$ 는

$$\mathbf{U}_c^H \tilde{\mathbf{r}}_c = \mathbf{S}_c \mathbf{A}_c \mathbf{d}_c + \mathbf{U}_c^H \tilde{\mathbf{n}}_c \quad (13)$$

와 같이 K 개의 SISO 시스템으로 분리 가능하여 효율적으로 데이터를 복원할 수 있다.

NOMA 방식에서 셀 경계 사용자는 셀 중심 사용자의 데이터를 잡음으로 간주하여 자신의 데이터를 복원한다. 송신전력할당 행렬 \mathbf{Q}_c 의 k 번째 주대각원소를 $q_{e,k}$ 라 하고 $\mathbf{w}_{e,k}^H \mathbf{H}_{e,k} \mathbf{V}_c \mathbf{A}_c^2 \mathbf{V}_c^H \mathbf{H}_{e,k}^H \mathbf{w}_{e,k}$ 을 I_c 로 표시하면 Eq. (4)로부터 k 번째 셀 경계 사용자의 전송률 $R_{e,k}^{(1)}$ 는

$$SINR_{e,k} = \frac{|q_{e,k} \mathbf{w}_{e,k}^H \mathbf{H}_{e,k} \mathbf{p}_k|^2}{I_c + \sum_{i=1, i \neq k}^K |q_{e,i} \mathbf{w}_{e,k}^H \mathbf{H}_{e,k} \mathbf{p}_i|^2 + \sigma_c^2} \quad (14)$$

$$R_{e,k}^{(1)} = \log_2(1 + SINR_{e,k}) \quad (15)$$

로 주어진다. 또한 수신 빔포밍 벡터 $\mathbf{w}_{e,k}$ 가 충분히 수렴하면 $i \neq k$ 에 대해 $|\mathbf{w}_{e,k}^H \mathbf{H}_{e,k} \mathbf{p}_i|^2 \approx 0$ 되어 $R_{e,k}^{(1)}$ 는

$$\gamma_{e,k}^2 = \frac{|\mathbf{w}_{e,k}^H \mathbf{H}_{e,k} \mathbf{p}_k|^2}{I_c + \sigma_c^2} \quad (16)$$

$$R_{e,k}^{(1)} \approx \log_2(1 + q_{e,k}^2 \gamma_{e,k}^2) \quad (17)$$

로 근사화할 수 있다. 셀 경계 사용자를 위해 최대 P_e 의 송신전력이 할당되고 각 사용자에게 최소 $P_{e,\min}$ 이상의

송신전력이 할당된다면 총합 전송률 $\sum_{k=1}^K \log_2(1 + q_{e,k}^2 \gamma_{e,k}^2)$ 을

최대화하는 $q_{e,k}$ 는

$$q_{e,k} = \sqrt{\max\{P_{e,\min}, \lambda_e - \gamma_{e,k}^{-2}\}} \quad (18)$$

로 주어진다. 이때 λ_e 는 $\sum_{k=1}^K q_{e,k}^2 = P_e$ 이 만족되도록 설정된다.

한편 셀 중심 사용자는 셀 경계 사용자의 데이터를 복원하기 위해 자신의 데이터를 잡음으로 간주하여 Eq. (1)

의 합성 잡음 $\tilde{\mathbf{n}}_c = \mathbf{H}_c \mathbf{Q}_c \mathbf{d}_c + \mathbf{n}_c$ 을 백색 잡음으로 변환한다. 이것은

$$\mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{n}}_c} = E\{\tilde{\mathbf{n}}_c \tilde{\mathbf{n}}_c^H\} = \mathbf{H}_c \mathbf{Q}_c \mathbf{Q}_c^H \mathbf{H}_c^H + \sigma_c^2 \mathbf{I}_K = \mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{n}}_c}^1 \mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{n}}_c}^2 \quad (19)$$

$$\mathbf{Z}_c^H = \mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{n}}_c}^{-\frac{1}{2}} \quad (20)$$

와 같이 구한 수신 빔포밍 행렬 \mathbf{Z}_c^H 을 이용하여 변환할 수 있다. 이 빔포밍 행렬을 Eq. (1)의 수신 신호 \mathbf{r}_c 에 적용하여

$$\mathbf{Z}_c^H \mathbf{r}_c = \mathbf{Z}_c^H \mathbf{H}_c \mathbf{P}_c \mathbf{Q}_c \mathbf{d}_c + \mathbf{Z}_c^H \tilde{\mathbf{n}}_c \quad (21)$$

을 얻고 MMSE-OSIC(minimum mean square error-ordered successive interference cancellation) [18,21,22]를 이용하여 셀 경계 사용자의 데이터를 복원한다. 셀 경계 사용자는 이 기법을 위한 최적의 데이터 복원 순서대로 사전에 정렬되어 있고 $\mathbf{Z}_c^H \mathbf{H}_c \mathbf{P}_c \mathbf{Q}_c$ 을 행렬 \mathbf{F}_c 로 표시할 때, $\mathbf{Z}_c^H \tilde{\mathbf{n}}_c$ 는 공분산 행렬이 \mathbf{I}_K 인 백색 잡음 벡터이므로 k 번째 셀 경계 사용자의 전송률 $R_{e,k}^{(2)}$ 는

$$SINR_{c,k} = \frac{|\mathbf{g}_k \mathbf{f}_{c,k}|^2}{\sum_{i=k+1}^K |\mathbf{g}_k \mathbf{f}_{c,i}|^2 + \|\mathbf{g}_k\|^2} \quad (22)$$

$$R_{e,k}^{(2)} = \log_2(1 + SINR_{c,k}) \quad (23)$$

로 주어진다. \mathbf{g}_k 는 행렬 $(\mathbf{F}_{c,k}^H \mathbf{F}_{c,k} + \mathbf{I}_K)^{-1} \mathbf{F}_{c,k}^H$ 의 k 번째 행벡터를 의미하고 $\mathbf{F}_{c,k}$ 는 \mathbf{F}_c 로부터 첫 번째 열부터 $(k-1)$ 번째 열까지 제거하여 구성한 $K \times (K-k+1)$ 행렬이다. $\mathbf{f}_{c,i}$ 는 \mathbf{F}_c 의 i 번째 열벡터를 의미한다. 따라서 셀 중심 사용자에서 셀 경계 사용자의 데이터 복원을 가능하게 하면서 달성할 수 있는 셀 경계 사용자의 총합 전송률 R_e 는

$$R_e = \sum_{k=1}^K \min\{R_{e,k}^{(1)}, R_{e,k}^{(2)}\} \quad (24)$$

로 주어진다.

4. 시뮬레이션 결과

제안한 방식의 전송률 성능을 시뮬레이션을 통해 평가하기 위해 [10-16]에서 제안된 다중안테나 기반 NOMA 방식과 성능 비교를 수행한다. [10]과 [11]에서 제안된 방식은 한명의 셀 중심 사용자와 한명의 셀 경계 사용자로 구성된 다수의 클러스터를 NOMA 방식으로 동시에

지원한다. 반면에 [12-16]에서 제안된 방식은 한명의 셀 중심 사용자와 한명의 셀 경계 사용자로 구성된 하나의 클러스터를 NOMA 방식으로 지원한다.

시뮬레이션 환경을 기술하면 다음과 같다. 기지국과 사용자 모두가 2개의 안테나를 채용하는 시스템($K=2$)과 기지국과 사용자 모두 4개의 안테나를 채용하는 시스템($K=4$)을 고려한다. 기지국과 사용자 간의 전송 채널은 [11]과 [13-15]에서 적용된 것과 동일하게 $\mathbf{H}_c = d^{-0.5\alpha} \mathbf{G}_c$ 와 $\mathbf{H}_{e,k} = d^{-0.5\alpha} \mathbf{G}_{e,k}$ 을 이용한다. 경로 손실 지수(path loss exponent) α 는 3이고 소규모 페이딩(small-scale fading) 채널 모델인 레일리 페이딩(Rayleigh fading)을 적용하기 위해 행렬 \mathbf{G}_c 와 $\mathbf{G}_{e,k}$ 의 모든 원소는 서로 독립이고 동일하게 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 확률분포를 따른다. d 는 기지국과 사용자 사이의 거리이다. 셀 중심 사용자는 기지국으로부터 2m~3m 거리 사이에 균일 확률분포에 따라 랜덤하게 분포하고 셀 경계 사용자는 기지국으로부터 9m~10m 거리 사이에 균일 확률분포에 따라 랜덤하게 분포한다.

기지국은 셀 중심 사용자의 데이터 전송을 위해 총 송신전력의 10%를 할당하고 셀 경계 사용자의 데이터 전송을 위해 총 송신전력의 90%를 할당한다. 즉, 총 송신전력을 P_T 라 하면 $P_c = 0.1P_T$ 이고 $P_e = 0.9P_T$ 이다. 또한 $P_{e,\min}$ 은 0으로 설정하고 셀 중심과 셀 경계 사용자에서의 수신 백색 가우시안 잡음의 전력 σ_c^2 과 $\sigma_{e,k}^2$ 는 σ^2 으로 동일하다고 가정한다. 전송률 성능은 균일 확률분포에 따라 랜덤하게 선택되는 셀 중심과 셀 경계 사용자

위치에서 레일리 페이딩에 따라 랜덤하게 채널을 생성하는 과정을 2000회 독립적으로 시행하여 획득한 성능을 평균하여 구한다. 모든 그림에서 제안 방식은 'Proposed MIMO-NOMA'로, [16]의 방식은 'SC-MIMO-NOMA1'로, [12-15]의 방식은 'SC-MIMO-NOMA2'로, [10]의 방식은 'MC-MIMO-NOMA1'로, [11]의 방식은 'MC-MIMO-NOMA2'로 표시하고 SNR(dB)는 $10\log_{10}(P_T/\sigma^2)$ 로 정의된다.

Fig. 2와 3은 기지국과 사용자 모두가 2개의 안테나를 채용하는 시스템($K=2$)에서 SNR에 따른 총합 전송률 성능을 보인다. Fig. 2에서는 셀 중심 사용자의 총합 전송률 성능비교를 보이고 Fig. 3은 셀 경계 사용자의 총합 전송률 성능비교를 보인다. 이 그림들에서 보는 바와 같이 제안한 방식이 셀 중심과 셀 경계 사용자 모두에서 기존 방식보다 우수한 전송률 성능을 달성한다. 이것은 셀 중심 사용자인 경우 수신 SNR이 높으므로 다중안테나 시스템의 다중화 이득을 얻기 위해 한명의 사용자에게 다수의 데이터 스트림을 동시에 전송하는 것이 유리하기 때문이다.

한편 SC-MIMO-NOMA1과 SC-MIMO-NOMA2 방식은 제안 방식과 동일하게 한명의 셀 중심 사용자에게 다수의 데이터 스트림을 동시에 전송하나 제안 방식보다 열화된 성능을 나타낸다. 이것은 SC-MIMO-NOMA1 방식인 경우 계층 전송을 이용하여, 전송 데이터 스트림에 효과적으로 송신전력을 할당하지 못하기 때문이다. SC-MIMO-NOMA2 방식에서는 셀 중심 사용자와 셀 경계 사용자의 MIMO 채널을 다수의 정렬된 SISO 채널

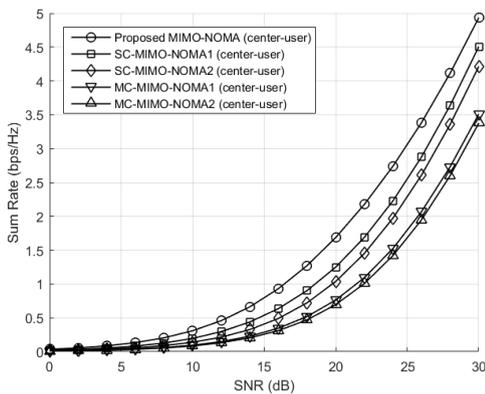


Fig. 2. Comparison of sum rate performance for a cell-center user between the proposed technique and the existing techniques in the MIMO-NOMA system with $K=2$

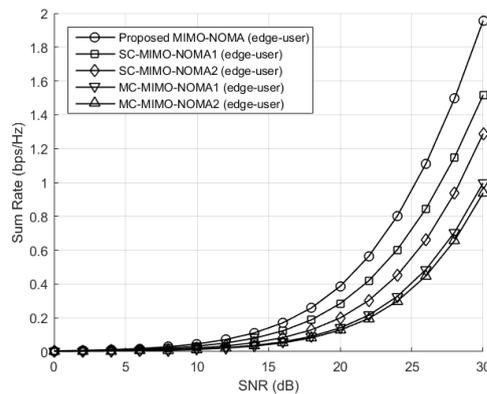


Fig. 3. Comparison of sum rate performance for cell-edge users between the proposed technique and the existing techniques in the MIMO-NOMA system with $K=2$

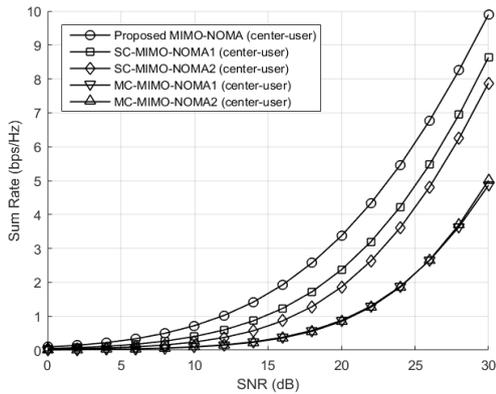


Fig. 4. Comparison of sum rate performance for a cell-center user between the proposed technique and the existing techniques in the MIMO-NOMA system with $K=4$

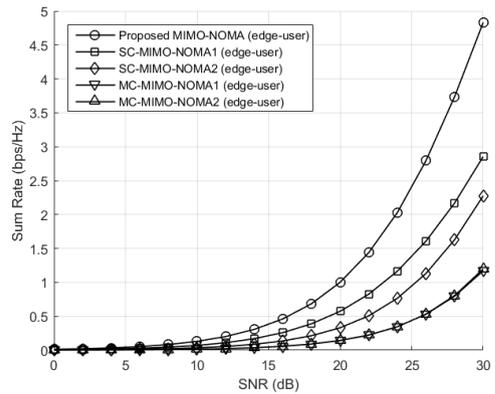


Fig. 5. Comparison of sum rate performance for cell-edge users between the proposed technique and the existing techniques in the MIMO-NOMA system with $K=4$

로 변환하는 GSVD에 의해 생성되는 프리코더가 열화된 전송률 성능을 야기한다. 그러나 제안 방식은 계층 전송 및 채널 정렬의 요구 없이 효과적인 프리코더 설계와 송신전력할당을 수행하여 우수한 성능을 달성한다.

셀 경계 사용자의 경우 수신 SNR이 낮으므로 각 사용자의 다중안테나를 다중화 이득보다는 SNR을 개선하는데 적용하여 전송률을 향상하는 것이 유리하다. 한편 MC-MIMO-NOMA1과 MC-MIMO-NOMA2 방식은 제안 방식과 동일하게 셀 경계 사용자들에게 하나의 데이터 스트림을 동시에 전송하나 제안 방식보다 열화된 성능을 나타낸다. 이것은 MC-MIMO-NOMA1 방식인 경우 각 사용자의 다중안테나가 수신 SNR을 향상하는데 사용되지 않고 사용자 간 간섭을 제거하는데 사용되기 때문이다. 또한 MC-MIMO-NOMA2 방식도 각 사용자의 다중안테나를 수신 SNR을 향상하는데 사용하지 않고 셀 중심 사용자와 셀 경계 사용자의 채널을 정렬하는데 사용한다. 그러나 제안 방식은 셀 중심 사용자와 셀 경계 사용자의 채널 정렬을 필요로 하지 않는다. 이뿐만 아니라 제안 방식은 사용자 간 간섭 제거와 수신 SNR 향상을 동시에 달성하기 위해 프리코더와 수신 빔포밍 벡터를 결합적으로 설계하여 우수한 전송률 성능을 획득한다.

Fig. 4와 5는 기지국과 사용자 모두가 4개의 안테나를 채용하는 시스템($K=4$)에서 SNR에 따른 총합 전송률 성능을 보인다. Fig. 4에서는 셀 중심 사용자의 총합 전송률 성능비교를 보이고 Fig. 5는 셀 경계 사용자의 총합 전송률 성능비교를 보인다. Fig. 2와 3로부터 예상한 바와 같이 이 그림들 역시 제안 방식이 셀 중심 사용자와

셀 경계 사용자 모두에서 기존 방식보다 우수한 총합 전송률을 달성함을 보인다. 또한 Fig. 2와 3에 대해 설명한 동일한 이유로 이 그림들은 Fig. 2와 3에 나타난 성능과 유사한 성능추세를 보인다. 이 그림들에서 보이는 제안 방식의 성능을 Fig. 2와 3에서의 성능과 비교하면 셀 중심 사용자는 약 2배 그리고 셀 경계 사용자는 약 2.5배 증가한 전송률을 달성한다. 이것은 Fig. 4와 5의 시스템이 Fig. 2와 3의 시스템보다 2배 많은 안테나를 사용하기 때문이다.

5. 결론

주파수 효율의 향상을 위해 기지국이 한명의 셀 중심 사용자와 다수의 셀 경계 사용자로 구성된 클러스터에 데이터 스트림을 동시에 전송하는 다중안테나 기반 NOMA 방식을 제안하였다. 이 방식은 SNR이 높은 셀 중심 사용자에게는 효과적으로 송신전력이 할당된 다수의 데이터 스트림을 전송한다. 반면에 SNR이 낮은 셀 경계 사용자에게는 사용자 간 간섭을 제거하면서 동시에 수신 SNR을 향상하도록 결합적으로 설계된 프리코더와 수신 빔포밍 벡터를 사용하여 하나의 데이터 스트림을 전송한다. 시뮬레이션을 통해 제안 방식이 하나의 사용자 클러스터 혹은 다수의 사용자 클러스터에 동시에 데이터 스트림을 전송하는 기존의 다중안테나 기반 NOMA 방식보다 모든 사용자에서 우수한 총합 전송률을 달성함을 보였다.

References

- [1] H. Tataria, M. Shafi, A. F. Molisch, M. Dohler, H. Sjöland, and F. Tufvesson, "6G wireless systems: Vision, requirements, challenges, insights, and opportunities," *Proc. IEEE*, vol. 109, no. 7, pp. 1166–1199, July 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1109/PROC.2021.3061701>
- [2] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, "Toward 6G networks: Use cases and technologies," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, March 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900411>
- [3] M. Matthaiou, O. Yurduseven, H. Q. Ngo, D. Morales-Jimenez, S. L. Cotton, and V. F. Fusco, "The road to 6G: Ten physical layer challenges for communications engineers," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 1, pp. 64–69, Jan. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000208>
- [4] Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, R. Schober, J. Yuan, and V. K. Bhargava, "A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: Research challenges and future trends," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no. 10, pp. 2181–2195, Oct. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ISAC.2017.2725519>
- [5] Q. Wang, R. Zhang, L.-L. Yang, and L. Hanzo, "Non-orthogonal multiple access: A unified perspective," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 25, no. 2, pp. 10–16, April 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1700070>
- [6] K. Yang, N. Yang, N. Ye, M. Jia, Z. Gao, and R. Fan, "Non-orthogonal multiple access: Achieving sustainable future radio access," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 2, pp. 116–121, Feb. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1800179>
- [7] Y. Yuan, Z. Yuan, and L. Tian, "5G non-orthogonal multiple access study in 3GPP," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 7, pp. 90–96, July 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900450>
- [8] Y. Yuan, S. Wang, Y. Wu, H. V. Poor, Z. Ding, X. You, and L. Hanzo, "NOMA for next generation massive IoT: Performance potential and technology directions," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 7, pp. 115–121, July 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000997>
- [9] K. Higuchi and Y. Kishiyama, "Non-orthogonal multiple access using intra-beam superposition coding and successive interference cancellation for cellular MIMO downlink," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E98-B, no. 9, pp. 1888–1895, Sept. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1587/transcom.E98.B.1888>
- [10] Z. Ding, F. Adachi, and H. V. Poor, "The application of MIMO to non-orthogonal multiple access," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 1, pp. 537–552, Jan. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2475746>
- [11] Z. Ding, R. Schober, and H. V. Poor, "A general MIMO framework for NOMA downlink and uplink transmission based on signal alignment," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 6, pp. 4438–4454, June 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2542066>
- [12] Z. Ma, Z. Ding, P. Fan, and S. Tang, "A general framework for MIMO uplink and downlink transmissions in 5G multiple access," *Proc. IEEE VTC Spring*, pp. 1–4, May 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2016.7504070>
- [13] Z. Chen, Z. Ding, X. Dai, and R. Schober, "Asymptotic performance analysis of GSVD-NOMA systems with a large-scale antenna array," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 1, pp. 575–590, Jan. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2883102>
- [14] C. Rao, Z. Ding, and X. Dai, "The distribution characteristics of ordered GSVD singular values and its applications in MIMO-NOMA," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 24, no. 12, pp. 2719–2722, Dec. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3017796>
- [15] N. T. Hai and D. L. Khoa, "An approximate evaluation of BER performance for downlink GSVD-NOMA with joint maximum-likelihood detector," *J. Telecommun. Inf. Technol.*, vol. 3, pp. 25–37, Sept. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.26636/jtit.2022.160922>
- [16] J. Choi, "On the power allocation for MIMO-NOMA systems with layered transmissions," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 5, pp. 3226–3237, May 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2518182>
- [17] C. C. Paige and M. A. Saunders, "Towards a generalized singular value decomposition," *SIAM J. Numer. Anal.*, vol. 18, no. 3, pp. 398–405, June 1981.
DOI: <https://doi.org/10.1137/0718026>
- [18] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden, and R. A. Valenzuela, "V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel," *Proc. USRI ISSSE*, pp. 295–300, Sept. 1998.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ISSSE.1998.738086>
- [19] G. J. Foschini, D. Chizhik, M. J. Gans, C. Papadias, and R. A. Valenzuela, "Analysis and performance of some basic space-time architectures," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 21, pp. 303–320, April 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ISAC.2003.809456>
- [20] T. M. Cover and J. A. Thomas, *Elements of Information Theory*, 2nd Edition, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1002/047174882X>
- [21] G. D. Golden, G. J. Foschini, R. A. Valenzuela, and P. W. Wolniansky, "Detection algorithm and initial laboratory result using V-BLAST space time communication architecture," *Electron. Lett.*, vol. 35,

no. 1, pp. 14-15, Jan. 1999.

DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470825631>

- [22] D. Shiu and J. M. Kahn, "Layered space-time code for wireless communications using multiple transmit antennas," *Proc. IEEE ICC*, pp. 436-440, July 1999.

DOI: <https://doi.org/10.1109/ICC.1999.767978>

신 창 용(Changyong Shin)

[정회원]



- 2006년 12월 : Univ. of Texas at Austin 전기 및 컴퓨터공학과 (공학박사)
- 2007년 4월 ~ 2013년 10월 : 삼성종합기술원 Future IT 연구소 전문연구원

- 2013년 11월 ~ 2014년 2월 : 삼성전자 Digital Media & Communications(DMC) 연구소 수석연구원
- 2014년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 스마트정보통신공학과 교수

<관심분야>

무선통신, 통신신호처리, 정보통신