

HARQ가 적용된 상향링크 MU-MIMO 시스템을 위한 사용자 선택 기법

박 상 준*

User Selection Scheme for Uplink MU-MIMO Systems with HARQ

Sangjoon Park*

요 약

본 논문에서는 패킷 재전송을 위한 HARQ가 적용된 상향링크 MU-MIMO 시스템을 위한 사용자 선택 기법을 제안한다. 제안 기법은 매 패킷 전송구간마다 초기전송 패킷을 전송하는 사용자와 재전송 패킷을 전송하는 사용자가 함께 선택될 수 있도록 한다. 이 때 기지국 수신 과정에서 간섭 제거 기법 등 패킷들의 검출 결과가 상관관계를 가질 수 있는 수신기를 사용하게 될 경우, 높은 신뢰도를 갖는 재전송 패킷의 존재로 인해 초기전송 패킷의 오류 성능이 향상될 수 있다. 따라서 이를 바탕으로 제안 기법은 시스템 수율의 향상 및 패킷 전송에 필요한 지연 시간의 단축을 도모할 수 있다. 모의실험 결과 제안 기법이 수율 및 지연 시간 관점에서 HARQ가 적용된 상향링크 MU-MIMO 시스템의 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

Key Words : HARQ, MU-MIMO, User Selection, Retransmission, Interference Cancellation

ABSTRACT

In this paper, a user selection scheme is proposed for uplink MU-MIMO systems with HARQ. In each packet transmission time interval, the proposed scheme selects the users with the initially transmitted packet and those with the retransmitted packet together. Therefore, when the base station employs the reception procedure such as interference cancellation in which the detection results of transmitted packets can be correlated, the error performance of the initially transmitted packets can be improved by the presence of the retransmitted packets having a high reliability. This enables the MU-MIMO system with the proposed scheme to have increased throughput and decreased latency. Simulation results confirm that the proposed scheme can significantly improve the throughput and average latency of uplink MU-MIMO systems with HARQ.

1. 서 론

무선 통신 채널 환경에서 MU-MIMO (Multiuser Multiple-Input Multiple-Output, 다중 사용자 다중 입력 출력) 시스템은 제한된 주파수 대역 하에서 높은 시스템 성능을 달성할 수 있는 방식으로 널리 알려져 있다.^[1-5] 사용자가 기지국으로 데이터를 전송하는 상향

링크 MU-MIMO 시스템에서는 시스템 전송률 향상을 위해 여러 사용자의 각 신호가 동시에 기지국으로 전송될 수 있다. 이 때 만약 사용자 수가 기지국 안테나 수보다 많다면 전체 사용자 중 데이터를 전송할 일부 사용자들이 선택되어야 하며, 이러한 사용자 선택 방식에 따라 시스템 성능이 좌우될 수 있다.^[3,5] 한편, 무선 통신 채널 환경에서는 AMC (Adaptive Modulation

* 본 논문은 2019년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1C1C1003202).

• First Author : Kyonggi University, Department of Electronic Engineering, sj.park@kgu.ac.kr, 조교수, 정회원

논문번호 : 202009-229-A-RU, Received September 21, 2020; Revised October 2, 2020; Accepted October 6, 2020

and Coding) 오류 등으로 인한 패킷 전송의 실패가 빈번하게 발생할 수 있으며, 이를 극복하기 위해 통상적으로 무선 통신 시스템은 패킷 재전송을 위한 HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request, 복합 자동 재전송 요청) 기법을 사용한다.^[6-11] HARQ 기법은 재전송을 통해 AMC 오류 및 패킷 전송 실패를 극복하는 기법으로 시스템의 수율 (throughput) 및 검출 성능을 크게 향상시킬 수 있다. 특히 이러한 HARQ 기법이 MU-MIMO 시스템과 같은 다중 패킷 전송 환경에 사용될 경우, 적용된 수신 기법 및 패킷들의 재전송 상태에 따라 검출 결과가 달라질 수 있다.^[8-11] 하지만 HARQ가 적용된 상향링크 MU-MIMO 시스템에서는 통상적으로 재전송 패킷을 전송하는 사용자를 우선적으로 선택하는 방식이 적용되고 있으며, 이러한 수신기에 따른 검출 특성을 이용하는 사용자 선택 방식에 대한 연구는 널리 진행되지 않고 있다.^[3]

이에 본 논문에서는 HARQ가 적용된 상향링크 MU-MIMO 시스템을 위한 사용자 선택 기법을 제안한다. HARQ가 적용된 시스템에서 간섭 제거 기법 (interference cancellation)이나 심볼 레벨 결합기법 (symbol-level combining) 등 서로 다른 패킷 간의 검출 결과가 상관관계(correlation)를 가질 수 있는 수신기가 사용되었을 때, 초기전송 및 재전송 패킷이 동시에 전송될 경우 초기전송 패킷의 오류 성능이 향상될 수 있음이 알려져 있다.^[8-10] 이를 이용하여, 제안 기법은 매 패킷 전송구간마다 초기전송 사용자 및 재전송 사용자를 함께 선택하여 두 종류의 패킷의 동시 전송을 유도한다. 이를 통해 제안 기법은 HARQ가 적용된 상향링크 MU-MIMO 시스템에서 초기전송 패킷의 오류 성능 향상을 통한 시스템 성능의 향상을 도모할 수 있다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 총 사용자의 수가 K^* 및 기지국 안테나 수가 M 이며 HARQ 패킷 재전송 수가 1번인 상향링크 MU-MIMO 시스템을 고려한다. 매 패킷 전송구간마다 기지국에서는 사용자 선택 기법에 따라 $K(\leq M)$ 명의 사용자를 선택하며, 선택된 사용자들은 시간 동기가 이루어진 채로 각각 동일한 길이의 패킷을 전송한다. 이 때 각 패킷에는 HARQ 기법의 적용을 위해 CRC (Cyclic Redundancy Check) 부호 등의 오류 검출 부호 및 LDPC (Low-Density Parity-Check) 등의 오류 정정 부호가 적용되었다. 서

술의 편의상 한 패킷이 한 심볼로 구성되는 것으로 가정하면, $l(\geq 1)$ 번째 패킷 전송구간 (TTI, Transmission Time Interval)에서 모든 사용자 및 기지국간 채널을 $M \times K^*$ 행렬 H_l^* 로, 모든 사용자의 전송 패킷을 $1 \times K^*$ 벡터 x_l^* 로 나타낼 수 있다. 이 때 해당 l 번째 패킷 전송구간에서의 전송을 위해 선택된 사용자들을 $1 \times K$ 벡터 $s_l = [s_l(1) \cdots s_l(K)]$ ($1 \leq s_l(i) \leq K^* \forall i$)로 나타내면, $M \times 1$ 벡터인 기지국 수신 신호 y_l 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_l = H_l x_l + n_l \tag{1}$$

식 (1)에서 $H_l = [h_{l,s_l(1)}^* \cdots h_{l,s_l(K)}^*]$ 은 $M \times K$ 채널 행렬이며, $h_{l,k}^*$ 는 H_l^* 의 k 번째 열인 $M \times 1$ 벡터로 k 번째 사용자와 기지국간 채널을 나타낸다. 또한 $x_l = [x_l^*(s_l(1)) \cdots x_l^*(s_l(K))]^T$ 은 $K \times 1$ 송신 벡터이며, $x_l^*(k)$ 는 x_l^* 의 k 번째 원소로 k 번째 사용자의 패킷을 나타낸다. 마지막으로 n_l 은 $M \times 1$ AWGN (Additive White Gaussian Noise, 가산 백색 가우시안 잡음) 벡터를 나타낸다.

기지국에서는 수신 신호 및 추정된 채널 정보 등을 이용하여 s_l 에 속한 사용자들의 패킷에 대한 HARQ 결합 과정이 포함된 수신 과정을 진행하고, 이후 각 사용자 패킷들의 오류 검출을 진행하여 각 사용자의 HARQ 전송 상태를 갱신한다. 이 때 각 사용자의 HARQ 전송 상태가 각 원소가 1 (초기전송 패킷) 또는 2 (재전송 패킷)인 $1 \times K^*$ 벡터 $r_l = [r_l(1) \cdots r_l(K^*)]$ 로 표현된다면, 다음 $(l+1)$ 번째 패킷 전송구간에서 각 사용자의 HARQ 전송 상태 r_{l+1} 은 다음과 같이 갱신될 수 있다. 만약 k 번째 사용자의 패킷에서 오류가 검출되지 않거나 해당 패킷이 재전송 패킷일 경우, $r_{l+1}(k) = 1$ 로 초기화되어 k 번째 사용자는 $(l+1)$ 번째 패킷 전송구간부터 새로운 패킷의 전송을 시도한다. 만약 k 번째 사용자의 초기전송 패킷에서 오류가 검출될 경우, $r_{l+1}(k) = 2$ 로 설정된다. 마지막으로 $s_l(i) \neq k \forall i$, 즉 k 번째 사용자가 해당 패킷 전송구간에서 선택되지 않았다면 $r_{l+1}(k) = r_l(k)$ 로 현재 상태가 그대로 유지된다.

r_{l+1} 을 계산한 이후 기지국에서는 $(l+1)$ 번째 패킷 전송구간에서 패킷을 전송할 사용자들을 선택한다. 이러한 사용자 선택 결과는 컨트롤 채널을 통해 모든 사용자에게 전달된다. 이와 함께 l 번째 패킷 전송구간에서의 검출 결과에 대한 HARQ 피드백 메시지 또한 s_l 에 포함된 사용자들에게 전달된 후 l 번째 패킷 전송구간에서의 송수신 과정이 모두 종료된다.

III. 제안 사용자 선택 기법

본 장에는 HARQ가 적용된 상향링크 MU-MIMO 시스템을 위한 제안 사용자 선택 기법을 기술한다. 그를 위해 먼저 HARQ 기법이 적용된 다중 패킷 전송 환경에서의 검출 특성을 설명한다.

만약 수신단에서 간섭 제거 기법이 적용된 경우, 재전송 패킷과 초기전송 패킷이 동시에 전송되었을 때의 초기전송 패킷의 오류 성능은 초기전송 패킷들만이 전송되었을 경우의 오류 성능 대비 크게 향상될 수 있다.^[8] 이는 간섭 제거 이전 재전송 패킷의 오류 성능이 초기전송 패킷보다 우수하며, 따라서 높은 신뢰도를 갖는 재전송 패킷을 이용한 간섭 제거 과정을 통해 보다 높은 간섭 제거 이득을 제공할 수 있기 때문이다.^[12] 또한 수신단에서 심볼 레벨 결합기법이 적용된 경우, 동시에 전송된 패킷들 중 하나 이상의 재전송 패킷이 포함되었을 때 초기전송 패킷의 오류 성능이 향상될 수 있음이 알려져 있다.^[9,10] 이는 심볼 레벨 결합기법을 위한 결합 채널 행렬 (aggregated channel matrix) 기반 복조 과정에서 재전송 패킷의 존재에 의한 결합 채널 행렬의 크기 증가로 인해 초기전송 패킷에 포함된 복조된 송신 심볼들의 SINR (Signal-to-Interference- Noise Ratio)이 증가하기 때문이다.

이러한 특성을 이용하여, 본 논문에서는 HARQ가 적용된 상향링크 MU-MIMO 시스템의 수율을 향상시키기 위한 사용자 선택 기법을 제안한다. 이 때 기지국에서는 간섭 제거 기법 등 패킷 검출 결과가 상관관계를 갖는 수신기가 사용되었음을 가정한다.

우선 제안 기법에서는 기본적인 목표 초기전송 사용자의 수 K_I^{target} 및 재전송 사용자의 수 K_R^{target} 를 정의한다. 이 때 둘 간의 관계는 다음 식 (2)를 만족한다.

$$K_I^{\text{target}} + K_R^{\text{target}} = K \quad (2)$$

이 때 초기전송 및 재전송 패킷의 동시 전송 상태를 유도하기 위해 목표 사용자 수는 다음과 같이 제한된다.

$$0 < K_I^{\text{target}} < K, 0 < K_R^{\text{target}} < K \quad (3)$$

현재 l 번째 패킷 전송구간에서의 초기전송 및 재전송 사용자의 수가 각각 $K_{I,l}$ 및 $K_{R,l}$ ($K_{I,l} + K_{R,l} = K^*$)일 때, l 번째 패킷 전송구간을 위한 목표 사용자의 수 $K_{I,l}^{\text{target}}$ 및 $K_{R,l}^{\text{target}}$ 은 다음과 같이 설정된다.

1) 만약 $K_{I,l} < K_I^{\text{target}}$ 인 경우, 즉 현재 패킷 전송구간에서 초기전송 사용자의 수가 기본 목표 초기전송 사용자의 수보다 작은 경우, 다음과 같이 $K_{I,l}^{\text{target}}$ 은 현재 초기전송 사용자의 수 $K_{I,l}$ 로 설정되고 $K_{R,l}^{\text{target}}$ 은 그에 맞추어 조정된다.

$$K_{I,l}^{\text{target}} = K_{I,l}, K_{R,l}^{\text{target}} = K - K_{I,l} \quad (4)$$

2) 반대로 $K_{R,l} < K_R^{\text{target}}$ 인 경우, 즉 현재 패킷 전송 구간에서 재전송 사용자의 수가 기본 목표 재전송 사용자의 수보다 작은 경우, $K_{R,l}^{\text{target}}$ 은 현재 재전송 사용자의 수 $K_{R,l}$ 로 설정되고 $K_{I,l}^{\text{target}}$ 은 그에 맞추어 조정된다.

$$K_{I,l}^{\text{target}} = K - K_{R,l}, K_{R,l}^{\text{target}} = K_{R,l} \quad (5)$$

3) 만약 $K_{I,l} \geq K_I^{\text{target}}$ 및 $K_{R,l} \geq K_R^{\text{target}}$ 이 만족된 경우, 즉 초기전송 및 재전송 사용자 수가 기본 목표 재전송 사용자의 수 이상인 경우 $K_{I,l}^{\text{target}}$ 및 $K_{R,l}^{\text{target}}$ 은 모두 각 기본 목표 사용자 수와 동일하게 설정된다.

$$K_{I,l}^{\text{target}} = K_I^{\text{target}}, K_{R,l}^{\text{target}} = K_R^{\text{target}} \quad (6)$$

식 (4)에서 (6)은 현재 사용자들의 재전송 상태가 기본 목표 사용자 수를 만족할 수 없는 상태인 경우 (예: 초기전송 사용자만 존재) 현재 패킷 전송구간에서의 목표 사용자 수를 조정하는 과정을 나타낸다. 따라서 현재 패킷 전송구간에서 초기전송 또는 재전송

사용자 중 한 가지 형태만 존재하는 경우를 제외하면 제안 기법은 항상 각 패킷 전송 구간에서 초기전송 및 재전송 사용자가 동시에 선택되어 두 종류의 패킷이 동시에 전송될 수 있도록 목표 사용자 수를 설정한다.

이렇게 l 번째 패킷 전송구간에서의 목표 사용자 수 $K_{l,l}^{\text{target}}$ 및 $K_{R,l}^{\text{target}}$ 이 정해진 이후, 제안 기법은 각 사용자의 지연 시간(latency)을 나타내는 $1 \times K^*$ 벡터 $\mathbf{d}_l = [d_l(1) \cdots d_l(K^*)]$ 를 이용하여 초기전송 및 재전송 사용자를 선택한다. 이 때 $d_l(k)$ 는 기지국에서 측정된 k 번째 사용자가 현재 전송하려는 패킷의 지연 시간을 나타낸다. 먼저 초기전송 사용자의 그룹 $\mathbf{G}_{l,l}$ 을 \emptyset 로 초기화한 후, 다음의 식 (7) 및 (8)을 $K_{l,l}^{\text{target}}$ 번 반복하여 초기전송 사용자 그룹을 결정한다.

$$\mathbf{G}_{l,l} = \mathbf{G}_{l,l} \cup \{k^*\} \tag{7}$$

$$k^* = \{k | r_l(k) = 1, d_l(k) \geq d_l(k') \forall k, k' \notin \mathbf{G}_{l,l}\} \tag{8}$$

즉, 초기전송 사용자 선택 시 만약 $K_{l,l} > K_{l,l}^{\text{target}}$ 으로 현재 초기전송 사용자의 수가 설정된 목표 사용자 수보다 많을 경우, 지연 시간이 가장 큰 $K_{l,l}^{\text{target}}$ 명의 사용자를 현재 l 번째 패킷 전송 구간에 전송할 사용자 그룹에 포함한다. 마찬가지로, 재전송 사용자 그룹 $\mathbf{G}_{R,l}$ 은 \emptyset 로 초기화된 후 식 (9) 및 (10)을 $K_{R,l}^{\text{target}}$ 번 반복하여 결정된다.

$$\mathbf{G}_{R,l} = \mathbf{G}_{R,l} \cup \{k^*\} \tag{9}$$

$$k^* = \{k | r_l(k) = 2, d_l(k) \geq d_l(k') \forall k, k' \notin \mathbf{G}_{R,l}\} \tag{10}$$

이렇게 구해진 $\mathbf{G}_{l,l}$ 및 $\mathbf{G}_{R,l}$ 의 모든 원소들을 포함하는 $1 \times K$ 벡터 $\mathbf{s}_l = [s_l(1) \cdots s_l(K)]$ 를 생성하여 현재 l 번째 패킷 전송구간에서의 사용자 선택을 완료한다.

$$s_l(k) \in \mathbf{G}_{l,l} \cup \mathbf{G}_{R,l}, s_l(k) \neq s_l(k') \forall k \neq k' \tag{11}$$

즉, 제안 기법은 상향링크 MU-MIMO 시스템에서 재전송 사용자를 우선적으로 선택하는 기존 방식과

달리 초기전송 및 재전송 사용자가 동시에 선택될 수 있는 사용자 선택 과정을 진행한다. 따라서 간섭 제거 기법 등이 적용된 수신 과정을 거칠 때 초기전송 패킷의 오류 성능이 향상될 수 있으며, 이러한 조기 종료(early termination) 효과로 인해 시스템 수율 및 초기전송 사용자의 지연 시간의 향상을 도모할 수 있다. 이 때 재전송 사용자의 패킷이 다음 패킷 전송구간에 전송되지 못하고 일정 시간 대기할 수 있으나, 제안 기법은 각 사용자의 지연 시간을 선택 과정에 반영하여 이러한 재전송 사용자의 추가적인 지연 시간 증대를 최소화한다. 또한 제안 기법은 사용자 선택을 위한 추가적인 채널 정보 없이 기지국에서 계산할 수 있는 사용자들의 재전송 및 지연시간 정보만을 가지고 동작할 수 있다.

IV. 모의실험 결과

모의실험을 위해 천공되지 않은 모부호 (mother codeword)를 반복 전송하는 체이스 결합 (Chase combining) 방식의 HARQ를 고려하였으며, 이를 위해 384×576 크기의 생성 행렬을 갖는 Block LDPC 부호와 CRC-16-CCITT를 고려하였다.^[6] 변조 방식으로 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 변조를 고려하였으며 채널 모델로 독립적 레일리 감쇄 채널을 고려하였다. 한편, 수신단에서는 본 문에서의 가정대로 서로 다른 패킷 간의 검출 결과가 상관관계를 가질 수 있는 수신 구조를 고려하였다. 이 때 HARQ 재전송 패킷 결합을 위한 심볼 레벨 결합기법의 경우 재전송 방식에 따라 수신기 구조 및 검출 특성이 변화할 수 있으므로, 보다 일반적인 결과를 위해 본 논문에서는 간섭 제거 방식을 포함한 LLR (Log-Likelihood Ratio) 기반 비트 레벨 결합기법 (bit-level combining)을 고려하였다.^[9] 이 때 LLR 계산을 위해 선형 ZF (Zero-Forcing) 또는 MMSE (Minimum Mean-Square-Error) 검출기를 고려하였다. 또한 매 반복 복호 과정 종료 이후 복호에 성공한 것으로 판단되는 패킷으로 인한 간섭만을 제거하는 반복 간섭 제거 방식을 고려하였다.^[11] 최대 반복 복호 횟수는 30번이며, 매 반복 복호 과정 이후 CRC 검사를 수행하여 오류가 없는 것으로 판단된 패킷은 간섭 제거 이후 복호 및 기타 수신 과정을 종료하였다. 또한 모든 사용자는 단일 안테나 사용자 (single-antenna user)로 가정하였다. 수율은 매 패킷 전송구간 별 복호에 성공한 평균 패킷의 수로 정의되었으며, 지연 시간은 특정 패킷이 전송 가능해진 시점부터 해당 패킷이

복호 성공 또는 재전송 실패로 종료(termination)된 시점까지 소요된 패킷 전송구간으로 정의되었다.

제안 기법 이외의 사용자 선택 기법으로는 통상적인 방법인 재전송 사용자 (retransmission user) 선택 방식과 함께 임의 (random) 선택 방식을 고려하였다.^[3] 재전송 사용자 선택 방식의 경우 재전송 패킷을 전송하는 사용자들을 우선적으로 선택한 후 추가적인 선택이 가능한 경우에만 초기전송 패킷 사용자도 선택하며, 이 때 초기전송 패킷 사용자 중 현재까지의 지연 시간이 가장 높은 순서대로 선택하도록 설정하였다. 한편 임의 선택 방식의 경우 재전송 여부 및 지연 시간에 관계없이 매 패킷 전송구간마다 K 명의 사용자를 임의로 선택한다.

그림 1은 $N = K = 2$, $K^* = 4$ 인 환경에서 각 사용자 선택 기법에 따른 초기전송 패킷들의 평균 BLER (Block Error Rate)를 나타낸다. $K = 2$ 이므로 제안 기법에서 $K_I^{\text{target}} = K_R^{\text{target}} = 1$ 이다. 그림 1을 통해 제안 기법은 ZF 및 MMSE 검출 방식에 관계없이 기존 및 임의 방식 대비 초기전송 패킷들의 평균 BLER 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 임의 방식 역시 기존 기법 대비 우수한 평균 BLER 성능을 달성함을 확인할 수 있다. 이는 기존 방식의 경우 재전송 사용자들을 항상 우선하여 전송함으로써 초기전송 및 재전송 사용자의 동시 선택 확률이 낮기 때문이다. 이러한 사실을 통해 초기전송 및 재전송 사용자의 동시 선택이 수신기에 따라 초기전송 패킷의 성능을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 한편 이러한 성능 이득은 High SNR (Signal-to-Noise Ratio) 영역으로 갈수록 감소함을 확인할 수 있는데,

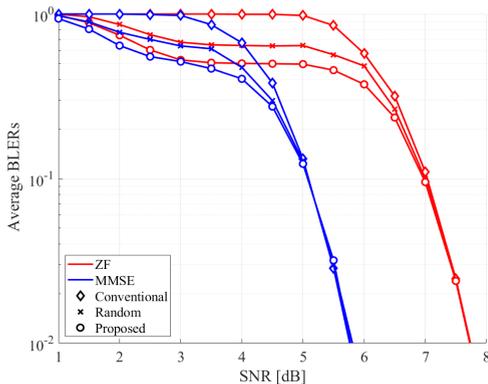


그림 1. 사용자 선택 기법에 따른 초기전송 패킷들의 평균 BLER ($N = K = 2$, $K^* = 4$)
Fig. 1. Average BLERs of initially transmitted packets for user selection schemes ($N = K = 2$, $K^* = 4$)

이는 SNR 증가에 따라 재전송 발생 확률 및 재전송 사용자의 수가 크게 감소하여 결과적으로 초기전송 및 재전송 사용자의 동시 선택 확률이 사용자 선택 기법에 상관없이 최소화되기 때문이다. 또한 ZF 검출 방식 적용 시 제안 기법에서 초기전송 패킷의 BLER이 긴 SNR 영역에 걸쳐 대략 0.5 내외가 됨을 관찰할 수 있다. 이는 해당 SNR 영역에서 재전송 패킷과 동시 전송되는 초기전송 패킷은 평균 BLER이 0에 수렴하는 반면 그렇지 않은 초기전송 패킷은 평균 BLER이 1에 수렴하기 때문이다.

그림 2 및 3에서는 사용자 선택 기법에 따른 시스템 수율을 나타내고 있다. 이 때 그림 2는 $N = K = 2$ 및 $K^* = 4$ 인 경우를 고려하였으며, 따라서 제안 기법에서 $K_I^{\text{target}} = K_R^{\text{target}} = 1$ 이다. 한

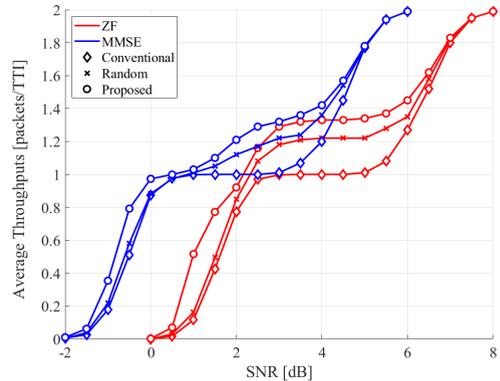


그림 2. 사용자 선택 기법에 따른 평균 시스템 수율 ($N = K = 2$, $K^* = 4$)
Fig. 2. Average system throughputs for user selection schemes ($N = K = 2$, $K^* = 4$)

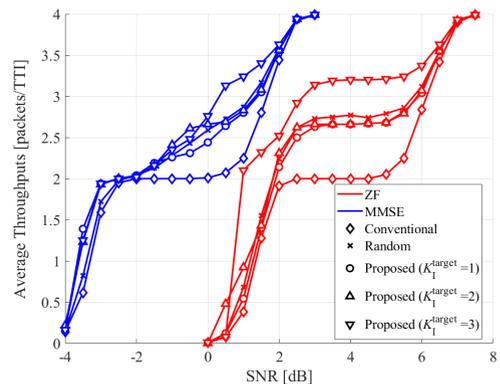


그림 3. 사용자 선택 기법에 따른 평균 시스템 수율 ($N = K = 4$, $K^* = 8$)
Fig. 3. Average system throughputs for user selection schemes ($N = K = 4$, $K^* = 8$)

편 그림 3은 $N = K = 4$ 및 $K^* = 8$ 인 경우를 고려 하였으며, 따라서 제안 기법에서는 $K_1^{\text{target}} = 1, 2, 3$ ($K_R^{\text{target}} = 3, 2, 1$)의 3가지 경우가 고려되었다.

그림 2 및 3에서의 결과를 통해 제안 기법 및 임의 방식이 기존 기법 대비 상향링크 MU-MIMO 시스템의 수율 또한 크게 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 2 및 3에서 각각 평균 수율 1.2 및 2.5인 지점을 기준으로, 제안 기법은 기존 기법 대비 ZF 검출 방식에서 대략 3.5 dB 내외, MMSE 검출 방식에서 대략 2.0 dB 내외의 SNR 이득을 얻음을 확인할 수 있다. 이는 초기전송 및 재전송 사용자의 동시 전송이 활성화되어 초기전송 패킷의 오류 성능이 향상되는 SNR 영역에서 시스템 수율이 크게 향상될 수 있음을 나타낸다. 그림 1의 경우와 마찬가지로 High SNR 영역에서는 초기전송 및 재전송 사용자의 동시 선택 확률이 크게 감소함에 따라 모든 기법이 유사한 수율을 달성한다. 또한 그림 3에서 K_1^{target} 에 따른 제안 기법의 수율은 검출 과정 및 SNR 영역에 따라 다르나 K_1^{target} 이 증가할수록 수율이 조금씩 향상될 수 있음을 확인할 수 있다. 특히 ZF 검출 방식을 고려할 때 $K_1^{\text{target}} = 3$ ($K_R^{\text{target}} = 1$)인 경우가 다른 경우들 대비 대부분의 SNR 영역에서 우수한 수율을 보임을 관찰할 수 있는데, 이는 해당 SNR 영역에서 하나의 재전송 패킷만이 보내져도 복호에 충분한 간섭 제거 이득이 초기전송 패킷들로 전달됨을 나타내고 있다. 또한 $K = 2$ 인 그림 2의 경우와 달리 $K = 4$ 인 그림 3에서 임의의 선택 방식이 제안 기법과 유사한 수율을 달성함을 확인할 수 있으며, 이는 임의의 선택 시의 사용자 선택에 대한 경우의 수가 증가하여 결과적으로 초기전송 및 재전송 사용자가 동시에 선택될 확률이 증가하였기 때문이다.

다음으로 그림 4에서는 $N = K = 4$ 및 $K^* = 8$ 인 경우에 대한 사용자 패킷들의 평균 지연 시간 (average latency)을 나타내고 있다. 그림 4를 통해 제안 기법 및 임의 방식이 이전 결과들과 마찬가지로 기존 기법 대비 성능 향상을 가져옴을 확인할 수 있다. 이는 초기전송 및 재전송 사용자의 동시 선택으로 인한 재전송 패킷의 지연 시간이 증가할 수 있으나, 그에 비해 초기전송 패킷의 오류 성능 향상으로 인한 지연 시간 감소의 영향이 더욱 큰 것을 나타내고 있다. 한편 K_1^{target} 이 증가함(K_R^{target} 이 감소함)에 따라 제안 기법의 평균 지연 시간이 감소하는 것을 확인할

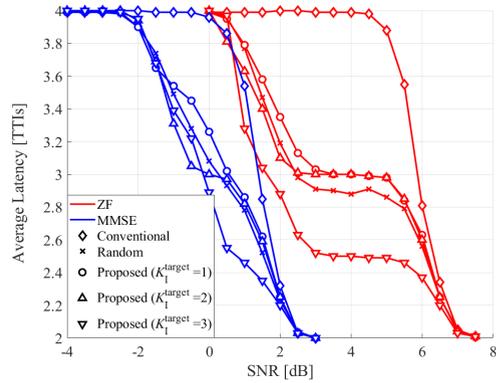


그림 4. 사용자 선택 기법에 따른 평균 지연 시간 ($N = K = 4, K^* = 8$)
Fig. 4. Average latency for user selection schemes ($N = K = 4, K^* = 8$)

수 있다. 이는 재전송 패킷의 지연시간 증대에도 불구하고 그림 3에서 관찰되었던 것처럼 보다 많은 초기전송 패킷들에 대한 충분한 조기 종료 효과가 나타나기 때문이다.

마지막으로 그림 5에서는 $N = K = 4$ 및 $K^* = 8$ 인 경우에 대한 사용자 패킷들의 최대 지연 시간 (worst-case latency)을 나타내고 있다. 먼저 임의 방식의 경우 제안 기법 및 기존 기법 대비 매우 큰 최대 지연 시간을 가짐을 확인할 수 있다. 이는 임의 방식이 매 패킷 전송구간마다 K 명의 사용자를 임의로 선택하므로 특정 사용자가 매우 긴 지연 시간을 갖게 될 확률이 존재하기 때문이다. 따라서 임의 방식의 경우 오류 성능 및 수율 관점과 달리 지연 시간의 관점에서 볼 때 적절하지 않은 사용자 선택 기법임을 확

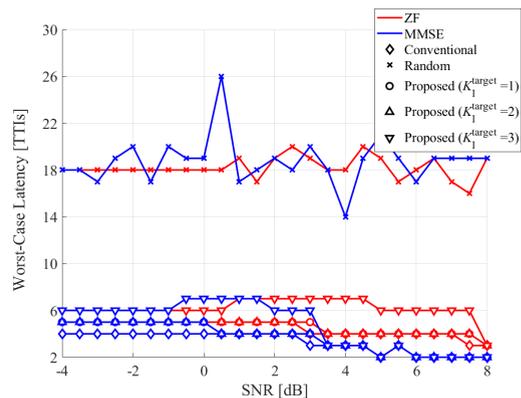


그림 5. 사용자 선택 기법에 따른 최대 지연 시간 ($N = K = 4, K^* = 8$)
Fig. 5. Worst-case latency for user selection schemes ($N = K = 4, K^* = 8$)

인할 수 있다. 반면, 제안 기법의 경우 재전송 사용자 패킷들의 대기로 인해 기존 기법 대비 최대 지연 시간이 증가할 수 있으나 그 정도는 미미함을 확인할 수 있다. 그림 4에서와는 반대로, 제안 기법의 최대 지연 시간은 K_T^{target} 이 감소함(K_R^{target} 이 증가함)에 따라 감소하는 경향을 보임을 확인할 수 있다. 이는 매 패킷 전송구간에서 보다 많은 재전송 패킷이 선택되어 최대 지연 시간을 결정하는 재전송 패킷의 대기 확률 및 지연시간 증대 정도가 감소하기 때문이다.

V. 결 론

본 논문에서는 HARQ가 적용된 상향링크 MU-MIMO 시스템을 위한 사용자 선택 기법을 제안하였다. 제안 사용자 선택 기법은 초기전송 패킷을 전송하는 사용자 및 재전송 패킷을 전송하는 사용자가 매 패킷 전송구간에서 동시에 신호를 전송하도록 유도하여, 기지국에서 간섭 제거기나 심볼 레벨 결합기법 등 서로 다른 패킷 간의 검출 결과가 상관관계를 가질 수 있는 수신기가 적용된 경우 초기전송 패킷의 오류 성능 향상을 도모할 수 있다. 또한 제안 기법은 사용자 선택 과정에서 사용자들의 재전송 상태 이외에도 지연 시간을 고려하여, 재전송 사용자 대기에 따른 최대 지연 시간 증대를 방지하고 평균 지연 시간 성능의 감소를 유도한다. 따라서 제안 기법은 조기 종료 효과를 확보하고 이를 바탕으로 HARQ가 적용된 상향링크 MU-MIMO 시스템의 평균 수율 및 평균 지연 시간을 향상시킬 수 있음을 모의실험을 통해 확인하였다. 이러한 제안 기법은 HARQ 기법 적용을 통해 기본적으로 기지국에서 파악할 수 있는 사용자들의 재전송 상태 및 지연 시간만을 가지고 사용자를 선택할 수 있도록 설계되어 동작 과정에서 채널 정보 등의 부가 정보를 요구하지 않는다.

본 논문에서는 HARQ 적용 상향링크 MU-MIMO 시스템을 위한 초기전송 사용자 및 재전송 사용자의 동시 선택 방식을 제안하였다. 이 때 기지국에 적용된 수신기 종류 및 재전송 상태, 채널 정보 및 AMC에 따른 사용자 오류 성능 및 지연 시간 등에 대한 수학적 분석이 이루어진 경우 매 패킷 전송구간에서의 최적 사용자 분포 등을 통해 제안 기법의 최적화를 진행할 수 있다. 또한 본문에서는 최대 재전송 수를 1회로 가정하였으나, 최대 재전송 수가 증가할 경우 패킷 분류 세분화에 따른 일반화된 기법 설계가 필요할 수 있다. 이러한 수학적 분석에 따른 성능 최적화 및 재전

송 수 증가에 따른 일반화는 향후 과제로 남는다.

References

- [1] T. Yoo and A. Goldsmith, "On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 528-541, Mar. 2006.
- [2] Y. Kim, et al., "Low complexity antenna selection based MIMO scheduling algorithms for uplink multiuser MIMO/FDD system," *J. KICS*, vol. 32, no. 12, pp. 1164-1174, Dec. 2007.
- [3] Y. Yan, et al., "Performance of uplink multiuser MIMO in LTE-advanced networks," in *Proc. ISWCS*, pp. 1-4, Paris, France, Aug. 2012.
- [4] T. Kim, et al., "Low complexity user scheduling algorithm for MRT based massive MIMO systems," in *Proc. ICEIC*, pp. 607-608, Bali, Indonesia, Feb. 2013.
- [5] X. Meng, et al., "Multi-user grouping based scheduling algorithm in massive MIMO uplink networks," in *Proc. ICC*, pp. 409-413, Chengdu, China, Dec. 2018.
- [6] IEEE 802.16, *IEEE Standard for local and metropolitan area networks - part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*, Feb. 2006.
- [7] K. Kim, et al., "HARQ switching metric of MIMO-OFDM systems using joint tx/rx antenna scheduling," *J. KICS*, vol. 32, no. 6, pp. 519-536, Jun. 2007.
- [8] Y. Whang, et al., "Effective interference level-based packet transmission for multiple-input multiple-output systems with hybrid automatic repeat request," *IET Commun.*, vol. 9, no. 18, pp. 2208-2215, Dec. 2015.
- [9] S. Park and S. Choi, "Performance of symbol-level combining and bit-level combining in MIMO multiple ARQ systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 64, no. 4, pp. 1517-1528, Apr. 2016.
- [10] S. Park, "A symbol-level combining scheme

for MIMO-HARQ systems based on multi-codeword transmission,” *J. KICS*, vol. 42, no. 8, pp. 1544-1546, Aug. 2017.

- [11] S. Park, “Error-detection-coding-aided iterative hard decision interference cancellation for MIMO systems with HARQ,” *KSII Trans. Internet and Inf. Syst.*, vol. 12, no. 3, pp. 1016-1030, Mar. 2018.
- [12] S. Kim and K. Kim, “Log-likelihood-ratio-based detection ordering in V-BLAST,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 54, no. 2, pp. 302-307, Feb. 2006.

박 상 준 (Sangjoon Park)



2004년 8월 : 연세대학교 전기
전자공학부 학사

2006년 2월 : 연세대학교 전기
전자공학부 석사

2011년 2월 : 연세대학교 전기
전자공학부 박사

2011년 8월~2014년 2월 : LG
전자 선임연구원

2014년 4월~2016년 8월 : 연세대학교 전기전자공학
부 연구교수

2016년 9월~2019년 2월 : 원광대학교 정보통신공학
과 조교수

2019년 3월~현재 : 경기대학교 전자공학과 조교수
<관심분야> MIMO Systems, HARQ, Equalization,
Iterative Processing, Error Control Coding,
Physical Layer Security

[ORCID:0000-0002-6684-9803]