

MIMO-HARQ 시스템을 위한 간섭제거 기반 다중 전송시간 수신 기법

박 상 준*

Interference Cancellation Based Receiver Exploiting Multiple Time Slots for MIMO-HARQ Systems

Sangjoon Park*

요 약

본 논문에서는 MIMO-HARQ 시스템을 위한 간섭 제거 기반의 다중 전송시간 수신 기법을 제안한다. 제안 기법은 현재 전송시간에서 복호에 성공한 재전송된 패킷들이 존재할 경우, 해당 패킷들이 초기 전송된 이전 전송시간에서 해당 패킷들에 대한 간섭제거를 수행한 후 남아있는 패킷들에 대한 복호과정을 추가적으로 수행한다. 따라서 현재 전송시간에서 전송되지 않은 패킷들에 대한 복호 성공을 통해 시스템의 수율을 향상시킬 수 있다. 모의실험을 통해 제안 수신 방식이 MIMO-HARQ 시스템의 수율을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

Key Words : MIMO, HARQ, Multiple Time Slot, Interference Cancellation, Throughput

ABSTRACT

In this letter, an interference cancellation based receiver for multiple time slot is proposed for MIMO-HARQ systems. In the proposed scheme, if there are retransmitted packets successfully decoded in the current time slot, the decoding process for the previous time slot in which the retransmitted packets were initially sent is performed after the interference cancellation of the successfully decoded retransmitted

packets. This enables the decoding success of packets which are not transmitted in the current time slot, which leads to the throughput improvement. Simulation results confirm that the proposed scheme can improve the throughput performance of MIMO-HARQ systems.

I. 서 론

복수 개의 패킷이 동시에 전송될 수 있는 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 시스템에서 재전송을 통한 오류 극복을 위해 HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) 기법이 적용될 경우 각 패킷들은 재전송으로 인해 여러 전송시간 (time slot)에서 전송될 수 있다.^[1-3] 이러한 MIMO-HARQ 시스템에서 일반적인 형태의 수신기는 통상적으로 현재 전송시간에서 전송된 패킷들에 대한 복호만을 고려한다.^[2-4] 하지만 재전송된 패킷은 여러 전송시간에 걸쳐 전송되었으므로, 간섭제거 (interference cancellation) 기반 수신기가 적용된 경우 재전송된 패킷이 복호에 성공하였을 때 이를 통한 간섭제거 이득을 현재 전송시간뿐만 아니라 이전 전송시간에도 제공할 수 있다.

이에 본 논문에서는 MIMO-HARQ 시스템에서 다중 전송시간에 걸친 간섭제거 및 복호과정을 수행하는 수신기를 제안한다. 제안 기법에서는 현재 전송시간에서의 복호 과정이 종료한 이후 복호에 성공한 재전송된 패킷이 존재할 경우 해당 패킷들이 전송되었던 이전 전송시간에서의 간섭 제거를 통해 과거에 전송된 패킷들에 대한 복호 과정을 추가적으로 진행한다. 이를 통해 제안 기법은 현재 전송시간에서 전송되지 않은 패킷들의 복호 성공을 통해 시스템 수율 향상을 도모할 수 있다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 매 전송시간별 전송되는 단일 안테나 사용자 수 및 기지국의 안테나 수가 각각 N 및 M 이며 최대 재전송 수가 1인 상향링크 MIMO-HARQ 시스템을 고려한다.^[3] 전체 사용자 수는 K 이며, 매 전송시간별로 각 사용자의 채널 상태 및 재전송 상태 등에 따라 K 명의 사용자 중 N 명의 사용자가 선택되어

* 이 논문은 2022년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2022R1F1A1064163).

• First and Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-6684-9803)Kyonggi University, Department of Electronic Engineering, sj.park@kgu.ac.kr, 조교수, 정회원

논문번호 : 202205-061-A-LU, Received April 28, 2022; Revised May 5, 2022; Accepted May 5, 2022

전송된다. 각 사용자가 전송하는 패킷은 시간 동기가 이루어진 채로 동일한 길이를 갖는다.

t 번째 전송시간에서 각 사용자의 HARQ 전송 상태는 전체 K 개의 원소 중 각 원소가 재전송 여부에 따라 1 (재전송) 또는 0 (초기전송)을 갖는 집합 \mathbf{s}_t 를 통해 나타날 수 있으며, 이 때 \mathbf{s}_t 의 k 번째 원소 $s_t(k)$ 는 k 번째 사용자의 HARQ 전송 상태를 나타낸다. 기지국에서는 \mathbf{s}_t 및 각 사용자의 채널 상태, 지연시간 (latency) 등을 고려하여 t 번째 전송시간에서 전송될 사용자를 선택한다. 해당 선택 결과는 선택된 N 명의 사용자 인덱스를 포함하는 집합 \mathbf{p}_t 로 나타나며, $\mathbf{p}_t(n)$ 은 \mathbf{p}_t 의 n 번째 원소를 나타낸다. 기지국에서 \mathbf{p}_t 가 선택된 이후 t 번째 전송시간에서의 사용자 패킷 전송 및 수신 과정이 진행된다. 복호 과정의 종료 이후, k 번째 사용자가 복호에 성공하거나 재전송 패킷이었을 경우 ($s_t(k) = 1$) 0으로 초기화되며, 현재 시간에 전송된 초기전송 패킷이었으며 ($k \in \mathbf{p}_t, s_t(k) = 0$) 복호에 실패한 경우 1로 설정되며, 그 이외의 경우 이전 전송시간과 동일하게 $s_{t+1}(k) = s_t(k)$ 이다.

III. 제안 간섭제거 기반 다중 전송시간 수신 기법

t 번째 전송시간에서 기존의 통상적인 수신기의 경우, 재전송이 적용되지 않은 non-HARQ 시스템의 수신 과정을 차용하여 \mathbf{p}_t 에 속한 N 개의 패킷에 대한 결합 및 검출, 복호 등의 수신 과정을 진행하고 수신 과정을 종료한다.^[2-4] 하지만 HARQ 시스템에서는 재전송으로 인해 특정 패킷이 복수의 전송시간에 존재할 수 있다. 따라서 간섭제거 기반 수신기 등 특정 패킷의 복호 성공이 다른 패킷의 복호 성능 향상을 불러올 수 있는 수신기에서는 t 번째 전송시간에 재전송된 패킷이 복호에 성공할 경우 해당 패킷이 초기전송된 구간인 $t' (< t)$ 번째 전송시간의 패킷들에 대해서도 해당 재전송 패킷으로부터의 간섭제거 이득을 통해 추가적인 패킷들의 복호 성공을 도모할 수 있다.

이를 이용하여, 본 논문에서는 현재 전송시간에서 재전송된 패킷이 복호에 성공할 경우 해당 패킷이 전송된 과거 전송시간에서 간섭제거를 통해 LLR (Log-Likelihood Ratio)을 갱신하고 추가적인 복호를 진행하는 수신 기법을 제안한다. 이를 위해 먼저 \mathbf{d}_t 를 t 번째 전송시간에서 전체 K 명의 사용자의 복호 상태를 나타내는 집합으로 정의한다. 이 때 k 번째 사용자의 복호 상태 $d_t(k)$ 는 복호가 시도되지 않았을 경우

0, 복호가 이미 시도되었으나 실패하였을 경우 1, 복호가 이미 시도되어 성공적으로 복호되었을 경우 2의 값을 갖는다. 이러한 \mathbf{d}_t 를 이용한 제안 기법의 구체적인 동작 과정은 다음과 같이 나타난다.

- 0) [초기화 과정] $1 \leq k \leq K$ 까지 모든 $d_t(k)$ 를 0으로 초기화한다.
- 1) [t 번째 전송시간 송신 패킷에 대한 복호] \mathbf{p}_t 에 속한 패킷들에 대한 복호 과정을 진행한다. 이는 기존의 통상적인 수신기와 동일한 과정이다. 이후 복호결과에 따라 $1 \leq n \leq N$ 까지 $d_t(\mathbf{p}_t(n))$ 를 갱신한다.
- 2) [복호성공 재전송패킷 검사] $d_t(k) = 2$ 이며 $s_t(k) = 1$ 인 패킷 인덱스의 집합을 \mathbf{e}_t 로 둔다. 만약 $\mathbf{e}_t = \emptyset$ 이면 수신 과정을 종료하며, 하나 이상의 패킷이 포함된 경우 단계 3)으로 간다.
- 3) [간섭제거를 진행할 과거 전송시간 결정] \mathbf{s}_t 에 포함된 패킷들이 존재하는 모든 과거 전송시간 중 아래 식 (1)을 만족하는 전송시간의 집합 \mathbf{g}_t 를 계산한다. 이 때 \mathbf{d}_t^0 는 $d_t(k) = 0$ 인 모든 원소들을 포함하는 \mathbf{d}_t 의 부분집합이다.

$$\mathbf{g}_t = \{t' | \mathbf{p}_{t'} \cap \mathbf{e}_t \neq \emptyset, \mathbf{p}_{t'} \cap \mathbf{d}_t^0 \neq \emptyset, t' < t\} \quad (1)$$

- 4) [간섭제거 및 LLR 갱신] $t' \in \mathbf{g}_t$ 인 모든 전송시간에 대해 $\mathbf{p}_{t'} \cap \mathbf{e}_t$ 에 속한 패킷들을 이용한 간섭제거를 진행한다. 간섭제거 이후 $\mathbf{p}_{t'} \cap \mathbf{d}_t^0$ 에 속한 패킷들에 대한 LLR을 갱신한다.
- 5) [추가 복호를 진행할 패킷 결정 및 복호 진행] $\bigcup_{t' \in \mathbf{g}_t} \mathbf{p}_{t'} \cap \mathbf{d}_t^0$ 을 만족하는 패킷들에 대한 복호 과정을 진행하고 수신 과정을 종료한다.

식 (1)에서 $\mathbf{p}_{t'} \cap \mathbf{e}_t$ 는 t' 번째 전송시간에 간섭제거 이득을 줄 수 있는 복호가 성공적으로 종료된 재전송 패킷을 나타내며, $\mathbf{p}_{t'} \cap \mathbf{d}_t^0$ 는 t' 번째 전송시간에 전송되었으며 t 번째 전송시간의 수신과정에서 아직 복호가 진행되지 않은 패킷들을 나타낸다. 즉, 식 (1)에서는 아직 복호가 진행되지 않은 패킷들 중 \mathbf{e}_t 에 속한 패킷으로부터 간섭제거 이득을 얻을 수 있는 패킷들이 속한 전송시간들을 선택한다. 이 때 $t' < t$ 번째 시간에서 재전송이 진행된 패킷들은 이미 HARQ 송수신 과정이 종료(termination)되었으므로, 집합 $\mathbf{p}_{t'} \cap \mathbf{d}_t^0$

에는 현재 전송시간에 전송되지 않은 초기전송 패킷들만을 포함한다.

이와 같이 제안 기법은 현재 전송시간에서 복호에 성공한 재전송 패킷들로부터 간섭제거 이득을 얻을 수 있는 이전 전송시간들의 초기전송 패킷들에 대한 복호를 추가적으로 진행한다. 이전 전송시간에서의 수신 과정에서 해당 초기전송 패킷들은 복호에 실패한 상황이나, 현재 전송시간의 재전송 패킷들로부터 전달되는 간섭제거 이득을 통해 추가적으로 복호 성공을 도모할 수 있다. 즉, 제안 기법은 기존 기법 대비 초기전송 패킷의 복호 성능을 향상시킬 수 있다. HARQ가 전송된 시스템의 수율은 초기전송 패킷의 복호 성능에 크게 좌우되므로, 이를 통해 제안 기법은 기존 기법 대비 MIMO-HARQ 시스템의 수율을 향상시킬 수 있다.

IV. 모의실험 결과

모의실험을 위해 288×576 LDPC (Low-Density Parity Check) 부호 및 체이스 결합 방식의 HARQ를 고려하였다. QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 변조 및 레일리 감쇄 채널을 고려하였으며, $K=2N$ 으로 설정하였다. 송신단에서는 채널 이득 크기에 따른 사용자 선택을 진행하였다. 수신단에서의 패킷별 반복 복호 횟수는 20번이며, 복호에 성공한 것으로 판단되는 패킷에 의한 간섭을 제거하는 반복 간섭제거 수신기를 적용하였다.^[4] 평균 수율은 전송시간별 복호에 성공한 평균 패킷의 수로 정의되었다.

그림 1에서는 $N=M=8$ 및 16일 때 기존 기법 대비 제안 기법에서 복호가 시도되는 평균 패킷 수의 비

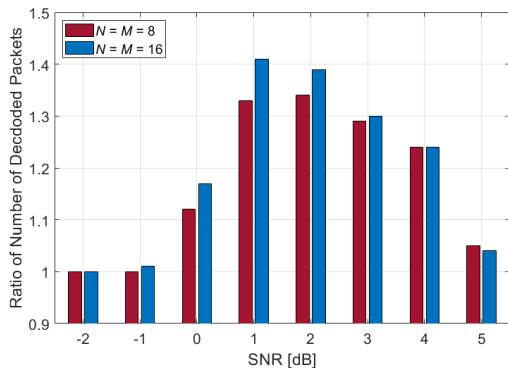


그림 1. 기존 기법 대비 제안 기법의 평균 복호 시도 패킷 수 비율
Fig. 1. Ratio of the number of decoded packets in the proposed scheme over the conventional scheme

율을 나타내고 있다. 기존 기법의 경우 현재 전송시간에 전송된 패킷들에 대한 복호만을 진행하므로 SNR (Signal-to-Noise Ratio)에 관계없이 항상 N 의 값을 가지나, 제안 기법의 경우 재전송 패킷으로부터 간섭제거 이득을 얻는 이전 전송시간의 패킷들에 대한 복호가 추가적으로 수행되어 SNR에 따라 N 을 초과하는 평균 복호 패킷수를 가짐을 확인할 수 있다. 이 때 평균 복호 패킷수의 최대 증가비율은 $N=M=8$ 및 16일 때 각각 대략 33.6% 및 41.42%로 매 전송시간 별로 최대 2.7개 및 6.6개의 패킷에 대한 추가적인 복호가 진행됨을 확인할 수 있다. 즉, 수신단에서 복호 과정의 연산량이 가장 높음을 고려하면 제안 기법은 기존 기법 대비 $N=M=8$ 및 16일 때 대략 1.3배 및 1.4배의 연산량을 요구함을 확인할 수 있다.

그림 2에서는 $N=M=8$ 및 16일 때 기존 기법 및 제안 기법의 초기전송 패킷의 평균 PER (Packet Error Rate)를 나타내고 있다. 재전송 패킷의 경우 추가적인 복호과정을 거치지 않으므로 제안 기법 및 기존 기법에서 거의 유사한 평균 PER을 보여 제외되었다. 그림 2을 통해 초기전송 패킷이 복호가 시작되는 SNR 영역부터 제안 기법을 통해 기존 기법 대비 보다 낮은 PER을 달성함을 확인할 수 있다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 간섭제거 이득을 고려한 추가적인 복호 과정을 진행하여 발생한 것으로 풀이될 수 있다.

마지막으로, 그림 3에서는 $N=M=8$ 및 16일 때 기존 및 제안 기법에 따른 정규화된 평균 수율을 비교하고 있다. 이 때 정규화된 평균 수율은 각 시스템의 평균 수율을 동시전송 패킷 수 N 으로 나눈 값을 나타낸다. 그림 2의 결과와 비교하여 볼 때, 제안 기법은 초기전송 패킷의 복호가 성공하기 시작하는 SNR (Signal-to-Noise Ratio)에 근접하여 기존 기법 대비

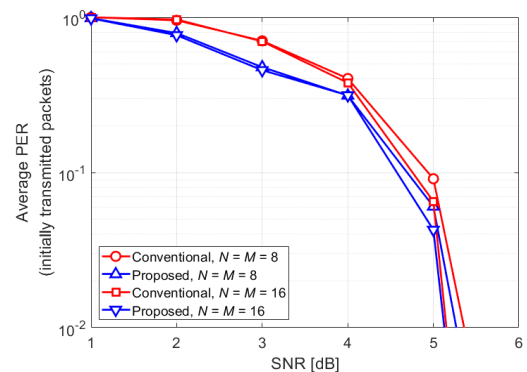


그림 2. 초기전송 패킷의 평균 PER
Fig. 2. Average PERs of initially transmitted packets

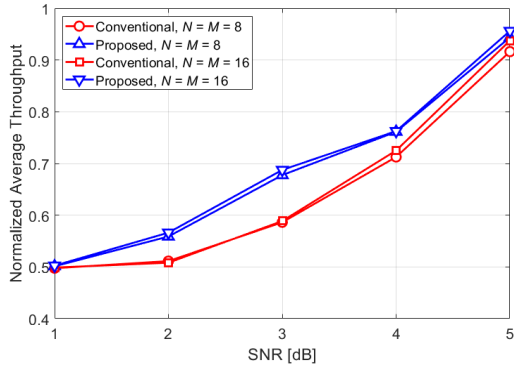


그림 3. 기존 기법 및 제안 기법의 정규화된 평균 수율
 Fig. 3. Normalized average throughputs of conventional and proposed schemes

수율 향상이 발생함을 확인할 수 있다. 구체적으로, 평균 SNR이 3 dB일 때 제안 기법은 기존 기법 대비 $N=M=8$ 및 16일 때 각각 대략 15.4% 및 16.7%의 수율 향상을 달성하는 것으로 나타난다. 이를 통해 제안 기법이 기존 기법으로부터 초기전송 패킷의 PER 향상을 통해 시스템 수율을 증가시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 MIMO-HARQ 시스템의 수율 향상을 위한 간섭제거 기반 다중 전송시간 수신 기법을 제안하였다. 모의실험을 통해 제안 기법이 이전 전송시간에서 송신된 초기전송 패킷들의 복호 성능 향상을 통해 시스템 수율을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서는 서술의 편의상 재전송 횟수가 1회임을 가정하였으며, 또한 이미 복호가 진행된 패킷에 대한 추가적인 복호는 진행하지 않음을 고려하였다. 보다 많은 재전송 횟수를 갖는 MIMO-HARQ 시스템에서 추가적인 복호 과정의 설계를 통해 제안 기법으로부터 추가적인 성능 향상을 기대할 수 있다. 이에 대한 연구들은 추후 수행될 수 있다.

References

- [1] H. Zheng, et al., "Multiple ARQ processes for MIMO systems," *EURASIP J. Appl. Signal Process.*, vol. 5, pp. 772-782, May 2004.
- [2] 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, Aug. 2015.
- [3] S. Park, "User selection scheme for uplink MU-MIMO systems with HARQ," *J. KICS*, vol. 45, no. 11, pp. 1831-1838, Nov. 2020.
- [4] 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.