

다중 부호어 전송 기반의 다중안테나 복합재전송 (HARQ) 시스템을 위한 심볼 레벨 결합 기법

박 상 준[°]

A Symbol-Level Combining Scheme for MIMO-HARQ Systems Based on Multi-Codeword Transmission

Sangjoon Park[°]

요 약

본 논문은 다중 부호어 전송 기반 MIMO-HARQ (Multiple-Input Multiple-Output Hybrid Automatic Repeat Request) 시스템을 위한 심볼레벨 결합기법을 제안한다. 제안 기법은 매 전송 구간에서 이전 전송 구간에서 종료된 패킷들로부터 발생한 간섭들을 억제하는 검출 과정을 수행, 종료 패킷 제거 과정이 구현된 기존 심볼레벨 결합기법에서 발생하는 오류 전파 현상을 방지할 수 있다. 모의실험을 통해 제안 기법이 기존 비트레벨 결합기법 및 심볼레벨 결합기법 대비 향상된 성능을 거둘 수 있음을 확인하였다.

Key Words : MIMO, HARQ, Combining, Packet Termination, Error Propagation

ABSTRACT

In this letter, a symbol-level combining scheme is proposed for MIMO-HARQ (Multiple-Input Multiple-Output Hybrid Automatic Repeat Request) systems based on multi-codeword. In the proposed SLC (Symbol-Level Combining), the remaining interference caused by the terminated packets is suppressed during the reception procedures, which

prevents the error propagations of the conventional SLC caused by the terminated packet elimination procedures. Simulation results show that the proposed scheme can achieve a better performance than the conventional BLC (Bit-Level Combining) and SLC.

I. 서 론

HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request, 복합 자동 재전송 방식)가 적용된 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, 다중 입출력) 시스템은 크게 다중 부호어 기반 HARQ가 운영되는 MMARQ (MIMO Multiple ARQ, MIMO 다중 자동 재전송 방식) 시스템 및 단일 부호어 기반 HARQ가 운영되는 MSARQ (MIMO Single ARQ, MIMO 단일 자동 재전송 방식) 시스템으로 나눌 수 있다.^[1-4] 이 때 일반적으로 MMARQ 시스템은 다중 부호어 전송 특성을 통해 MSARQ 시스템 대비 수율 향상이 가능하며, 특히 SLC (Symbol-Level Combining, 심볼레벨 결합) 기법이 적용된 경우 BLC (Bit-Level Combining, 비트레벨 결합) 기법 대비 시스템 성능을 더욱 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.^[1,2,4] 하지만 기존 SLC 기법은 수신단 처리 과정 중 전송 종료 (Termination) 된 패킷의 제거 과정을 필요로 하며, 따라서 종료된 패킷의 신뢰도가 낮은 경우, 즉 SNR이 충분히 높지 않은 경우 간섭 제거 실패로 인한 오류 전파가 발생할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 MMARQ 시스템을 위한 새로운 SLC 기법을 제안한다. 제안 기법은 전송 종료 패킷의 제거 과정 대신 해당 패킷들로부터 발생한 간섭들의 억제 과정을 포함하는 검출 과정을 수행한다. 따라서 제안 기법은 오류 전파 현상의 예방 및 이에 따른 성능 향상을 도모할 수 있다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 송신단 및 수신단 안테나 수가 각각 N_T 및 N_O 이며 각 패킷들의 최대 HARQ 전송 수가 M 인 시스템을 고려한다. 이 때 송신단에서는 N_T 개의 패킷이 각 송신단 안테나에서 동시에 전송된다. 본문에서는 서술의 편의상 매 패킷이 단 하나의 심볼로 구

* 이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2016R1D1A1B03934546)

[°] First and Corresponding Author : Wonkwang University, Department of Information and Communication Engineering, sjpark24@wku.ac.kr, 정희원

논문번호 : KICS2017-06-185, Received June 29, 2017; Revised July 14, 2017; Accepted July 14, 2017

성된다고 가정한다. 따라서 t 번째 전송 구간의 송신 심볼 벡터 $\mathbf{x}_t = [\mathbf{x}_{t,1}, \dots, \mathbf{x}_{t,N_f}]$ 의 n 번째 원소는 t 번째 전송 시간에서 n 번째 송신안테나를 통해 전송되는 패킷을 나타낸다. 이 때 해당 \mathbf{x}_t 에 대한 시스템의 입출력 관계식은 다음과 같다.

$$\mathbf{r}_t = \mathbf{H}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{z}_t \quad (1)$$

식 (1)에서 \mathbf{r}_t 는 $N_O \times 1$ 수신 심볼 벡터로 t 번째 전송 구간에서 수신된 패킷들을 나타내며, \mathbf{H}_t 는 $N_O \times N_f$ 행렬로 송수신단 사이의 MIMO 채널을 나타내며, \mathbf{z}_t 는 $N_O \times 1$ 잡음 벡터로 각 원소들은 평균이 0이고 분산이 σ_z^2 인 i.i.d. 순환 대칭 복소 가우시안 확률 변수이다. 이러한 HARQ 전송 과정은 t 번째 전송 시간에서 n 번째 송신안테나를 통해 전송되는 패킷의 HARQ 전송 수 $m_{t,n}$ 이 M 이 될 때까지 반복되며, 해당 패킷이 복호에 성공하거나 $m_{t,n}$ 이 최대치 M 에 도달한 경우 새로운 패킷으로 대체되어 HARQ 전송 과정이 다시 수행된다.

III. 제안 심볼레벨 결합기법

제안 기법에서는 먼저 현재 전송된 송신 심볼 벡터에 대한 결합 시스템 모델을 정의한다. 현재 전송된 패킷들의 HARQ 전송 수 중 최댓값인 $m_t^* = \max_{1 \leq n \leq N_f} m_{t,n}$ 및 현재 전송된 패킷 중 HARQ 전송 수 m_t^* 을 가지는 패킷이 처음으로 수신된 전송 구간인 $t^* = t - m_t^* + 1$ 을 정의하면, 현재 전송된 송신 심볼 벡터에 대한 결합 시스템 모델은 다음과 같이 표현된다.^[2,4]

$$\tilde{\mathbf{r}}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{t^*} \\ \vdots \\ \mathbf{r}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{t^*} \mathbf{x}_{t^*} \\ \vdots \\ \mathbf{H}_t \mathbf{x}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{t^*} \\ \vdots \\ \mathbf{z}_t \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에는 현재 t 번째 전송 구간에서의 패킷 뿐 아니라 이전 $(t-1)$ 번째 전송 구간까지 종료된 패킷들에 대한 송신 신호 성분이 포함된다. 이 때 이전 $(t-1)$ 번째 전송 구간까지 종료된 패킷들의 수를 $N_{T,t}$ 라 할 때, 식 (2)는 현재 전송 구간의 송신 신호 성분인 $N_f \times 1$ 벡터 \mathbf{x}_t 와 이전 전송 구간까지 종료된 패킷에 의한 간섭 신호 성분인 $N_{T,t} \times 1$ 벡터 $\mathbf{x}_{T,t}$ 를 가지고 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[4]

$$\tilde{\mathbf{r}}_t = \tilde{\mathbf{H}}_t \mathbf{x}_t + \tilde{\mathbf{H}}_{T,t} \mathbf{x}_{T,t} + \tilde{\mathbf{z}}_t \quad (3)$$

식 (3)에서 $\tilde{\mathbf{H}}_t$ 및 $\tilde{\mathbf{H}}_{T,t}$ 는 각각 \mathbf{x}_t 및 $\mathbf{x}_{T,t}$ 에 대한 채널 응답에 해당하는 $m_t^* N_O \times N_f$ 및 $m_t^* N_O \times N_{T,t}$ 행렬이며, $\tilde{\mathbf{z}}_t$ 는 식 (2)의 모든 노이즈 성분들을 포함하는 $m_t^* N_O \times 1$ 벡터이다.

기존 SLC 기법의 경우, 이전 수신 과정 등에서 얻어진 $\mathbf{x}_{T,t}$ 에 대한 추정치를 이용, 이전 $(t-1)$ 번째 전송 구간까지 종료된 패킷들에 의한 간섭 성분, 즉 $\tilde{\mathbf{H}}_{T,t} \tilde{\mathbf{x}}_{T,t}$ 에 대한 제거 과정을 수행한다. 따라서 $\mathbf{x}_{T,t}$ 에 대한 추정치의 신뢰도가 낮은 경우, 즉 낮은 SNR (Signal-to-Noise Ratio) 영역에서는 잘못된 간섭 제거로 인한 오류 전파가 발생할 수 있다.

이러한 문제점들을 해결하기 위해, 본문에서는 다음과 같은 새로운 SLC 기법을 제안한다. 제안 기법은 종료 패킷들에 의한 간섭 성분 $\mathbf{x}_{T,t}$ 의 영향을 고려하여 원하는 신호 성분 \mathbf{x}_t 에 대한 검출 과정이 진행되도록 식 (3)을 다음과 같이 다시 정의한다.

$$\tilde{\mathbf{r}}_t = \tilde{\mathbf{P}}_t \tilde{\mathbf{x}}_t + \tilde{\mathbf{z}}_t \quad (4)$$

식 (4)에서 $\tilde{\mathbf{P}}_t = [\tilde{\mathbf{H}}_t \tilde{\mathbf{H}}_{T,t}]$ 는 $m_t^* N_O \times (N_f + N_{T,t})$ 행렬로 \mathbf{x}_t 및 $\mathbf{x}_{T,t}$ 에 대한 모든 채널 응답을 포함하며, $\tilde{\mathbf{x}}_t = [(\mathbf{x}_t)^T (\mathbf{x}_{T,t})^T]^T$ 는 $(N_f + N_{T,t}) \times 1$ 벡터로 현재 t 번째 전송 구간에서의 송신 심볼 \mathbf{x}_t 및 간섭 심볼 $\mathbf{x}_{T,t}$ 를 모두 포함한다.

제안 SLC 기법은 식 (4)의 결합 시스템 모델을 바탕으로 송신 심볼 벡터 \mathbf{x}_t 의 추정치 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 를 계산한다. 예를 들어, 선형 검출 방식을 고려할 경우 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 는 다음과 같이 나타난다.

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \left[\left(\tilde{\mathbf{P}}_t^H \tilde{\mathbf{P}}_t + \alpha \sigma_z^2 \mathbf{I}_{m_t^* N_f} \right)^{-1} \tilde{\mathbf{P}}_t^H \tilde{\mathbf{r}}_t \right]_{1:N_f} \quad (5)$$

이 때 α 는 선형 ZF (Zero-Forcing) 및 MMSE (Minimum Mean-Square-Error) 검출 방식 적용에 의해 결정되어 0 또는 1의 값을 가지며, $[\mathbf{a}]_{1:N_f}$ 는 벡터 \mathbf{a} 의 첫 번째부터 N_f 번째 원소까지를 포함하는 벡터이다. 따라서 제안 기법은 현재 전송 구간에서의 추정치 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 의 도출을 위해 이전 전송 구간에서 종료된 패킷들로부터 발생한 간섭 $\tilde{\mathbf{H}}_{T,t} \tilde{\mathbf{x}}_{T,t}$ 의 영향을 고려한 검출 과정을 진행한다. 이는 결합 채널 행렬의 크기 증가로 인해 기존 기법 대비 연산량 증가를 야기할 수 있으나, 간섭 억제 과정의 도입을 통해 오류 전파를 예방하고 오류 전파가 주로 발생하는 SNR 영역에서의 성

능 향상을 도모할 수 있다.

IV. 모의실험 결과

모의실험을 위해 $M=3$ 이고 부호율이 5/6인 LDPC (Low-Density Parity-Check) 부호를 사용하는 MMARQ 시스템을 고려하였다. 독립적 레일리 감쇄 채널 및 64-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 변조가 고려되었다. 수신단에서는 MMSE 검출기 및 40번의 패킷별 반복 복호 횟수가 고려되었다.

그림 1은 각 결합기법들의 평균 비트 오류율 (Bit Error Rate, BER) 성능을 비교하고 있다. 그림 1을 통해 제안 SLC 기법이 기존 BLC 기법 대비 크게 우수한 성능을 달성하며, 특히 $N_T=N_O=16$ 인 경우 $N_T=N_O=8$ 인 경우 대비 더욱 큰 성능 향상을 이룸을 확인할 수 있다. 또한, 기존 SLC 기법의 경우 SNR이 충분히 높지 않은 경우 오류 전파 현상의 발생으로 인해 SNR이 증가하여도 평균 비트 오류율이 미약하게 감소됨을 확인할 수 있다. 한편, SNR이 매우 낮은 경우에는 잡음의 영향이 매우 크기 때문에 오류 전파 현상으로 인한 기존 SLC 기법의 비트 오류율 저하가 관찰되지 않는다. 따라서 제안 SLC 기법은 기존 기법 대비 중간 SNR 영역에서 보다 향상된 비트 오류율을 달성할 수 있다.

그림 2는 각 결합기법들의 평균 수율을 비교하고 있다. 그림 1의 결과와 유사하게, 제안 및 기존 SLC 기법들은 BLC 기법 대비 크게 우수한 평균 수율을 달성하며, 제안 SLC 기법은 기존 기법 대비 중간 SNR 영역에서 보다 향상된 평균 수율을 달성함을 확인할 수 있다.

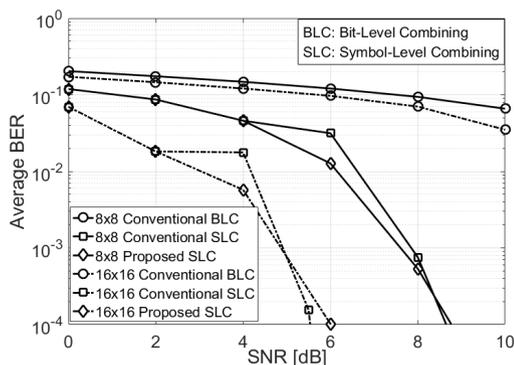


그림 1. 각 결합기법들의 평균 비트 오류율
Fig. 1. Average BERs of the combining schemes

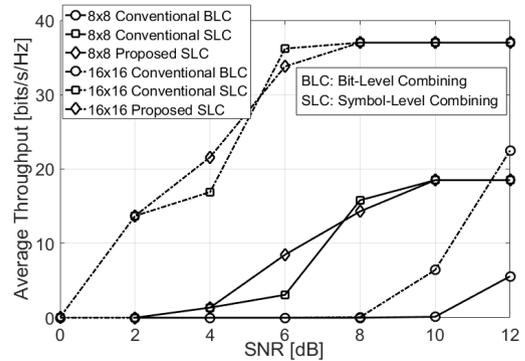


그림 2. 각 결합기법들의 평균 수율
Fig. 2. Average throughputs of the combining schemes

V. 결론

본 논문에서는 다중 부호어 기반 MIMO-HARQ 시스템을 위한 새로운 SLC 기법을 제안하였다. 제안 기법은 기존의 종료 패킷 제거 과정 대신 간섭 억제 과정을 도입하여 오류 전파의 예방을 도모한다. 모의실험을 통해 제안 기법이 기존 BLC 기법 대비 크게 우수한 성능을 달성하며, 또한 오류 전파의 영향이 극대화되는 중간 SNR 영역에서 기존 SLC 기법의 성능을 개선할 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] J. Lee, et al., "Transceiver design for MIMO wireless systems incorporating hybrid ARQ," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 1, pp. 32-40, Jan. 2009.
- [2] C. Bai, et al., "Hybrid-ARQ for layered space time MIMO systems with channel state information only at the receiver," *IET Commun.*, vol. 4, no. 14, pp. 1765-1773, Sept. 2010.
- [3] S. Park and S. Choi, "MMSE based continuous turbo equalizer for MIMO-HARQ systems," *J. KICS*, vol. 39A, no. 10, pp. 619-621, Oct. 2014.
- [4] 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.