

MIMO-HARQ 시스템을 위한 MMSE 기반 연속 터보 등화기

박상준*, 최수용^o

MMSE Based Continuous Turbo Equalizer for MIMO-HARQ Systems

Sangjoon Park*, Sooyong Choi^o

요약

본 논문은 MIMO-HARQ 시스템을 위한 MMSE 기반 연속 터보 등화기를 제안한다. 제안 기법은 이전 전송의 수신 과정 중 생성된 연관정 정보를 재전송의 수신 과정 중 초기화 단계에서 재활용하여 복호 수렴 속도의 개선을 도모한다. 모의실험을 통해 제안 기법이 기존 기법 대비 향상된 블록 오류율을 달성함과 동시에 복호 수렴 속도를 크게 개선함을 확인하였다.

Key Words : MIMO, HARQ, Turbo Equalizer, MMSE, Decoding Convergence

ABSTRACT

In this letter, an MMSE based continuous turbo equalizer is proposed for MIMO-HARQ systems. In the proposed scheme, the soft information from the reception process for the previous transmission is reutilized at the initialization of the reception process for the next transmission to enhance the decoding convergence speed. Simulation results verify that the proposed scheme achieves an improved BLER with a significantly accelerated decoding convergence speed.

I. 서론

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, 다중 입출력) 시스템을 위한 수신 기술 중 하나인 MMSE (Minimum Mean Square Error) 기반 터보 등화기는

MMSE 등화기와 ECC (Error Correction Coding, 오류 정정 부호) 복호기 간 연관정 정보의 반복적인 계산 및 교환 과정을 통해 MIMO 시스템에서 준최적 오류 성능을 달성할 수 있는 수신 기법으로 알려져 있다^[1,2]. 그러나 MMSE 기반 터보 등화기에서 한 번의 Iteration은 일반적인 선형 검출기 대비 상당히 많은 연산량을 요구한다. 따라서 복호 수렴에 필요한 Iteration 수가 증가함에 따라 MMSE 기반 터보 등화기는 MIMO 시스템에서 특히 수신단 복잡도가 크게 증가한다.

이러한 MMSE 기반 터보 등화기의 복호 수렴 속도 개선을 위해, 본 논문에서는 HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) 기법이 적용된 MIMO-HARQ 시스템을 위한 MMSE 기반 연속 터보 등화기를 제안한다. 제안 기법은 SISO (Single-Input Single-Output, 단일 입출력) 시스템을 위해 제안되었던 Turbo ARQ 기법의 수신 과정을 이용한다^[3]. 즉, 이전 전송에서의 수신 과정 중 생성된 연관정 정보를 다음 전송의 수신 초기화 과정에 재활용한다. 이를 통해 제안 기법은 복호 수렴 속도를 향상시켜 MMSE 기반 터보 등화기의 수신 과정을 위해 요구되는 연산량을 크게 감소시킬 수 있다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 송신단 및 수신단 안테나 수가 각각 N_T 및 N_O 인 공간 다중화 MIMO 시스템을 고려한다. 그림 1은 시스템의 송신단 블록 다이어그램을 나타낸다. 데이터 비트 블록 $\mathbf{d} = [d_1, \dots, d_{N_D}]^T$ 는 ECC 부호기를 거쳐 $\mathbf{c} = [c_1, \dots, c_{N_C}]^T$ 로 부호화되며, \mathbf{c} 는 다시 변조기를 거쳐 $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_{N_S}]^T$ 로 변조된다. \mathbf{s} 는 공간 다중화 과정을 거쳐 송신 심볼 벡터들의 집합 $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{N_T}]$ 로 변환되며, 이 때 $\mathbf{x}_t = [s_{(t-1)N_T+1}, \dots, s_{tN_T}]^T$ 는 $1 \leq t \leq N_T$ 일 때 t 번째 전송 시간에 전송될 송신 심볼 벡터를 나타내며, $N_T = N_S / N_I$ 이다. 각 \mathbf{x}_t 는 MIMO 채널을 거친 후 N_O 개의 수신 안테나들을 통해 수신되는데, 현재 HARQ 전송 수가 r 이면, t 번째 전송 시간에서의 시

* 본 연구는 서울특별시 서울 벨 연구소 사업(서울시 산학연 협력사업(WR080951)) 및 2014년도 교육인적자원부 BK21 플러스 사업의 일환인 연세대학교 BEST 정보기술 사업단의 지원을 받아 수행되었음.

• First Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, azssa@yonsei.ac.kr, 정희원

^o Corresponding Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, csyong@yonsei.ac.kr, 종신희원

논문번호 : KICS2014-09-343, Received September 4, 2014; Revised September 18, 2014; Accepted September 18, 2014

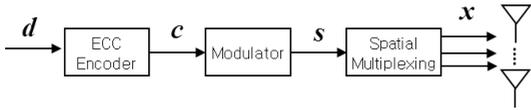


그림 1. 송신단 블록 다이어그램
Fig. 1. Transmitter Block Diagram

시스템의 입출력 관계는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_{r,t} = \mathbf{H}_{r,t} \mathbf{x}_t + \mathbf{w}_{r,t} \quad (1)$$

식 (1)에서 $\mathbf{y}_{r,t}$ 는 $N_O \times 1$ 수신 신호 벡터이며, $\mathbf{H}_{r,t}$ 는 $N_O \times N_I$ 행렬로 송수신단 사이의 MIMO 채널을 나타내며, $\mathbf{w}_{r,t}$ 는 $N_O \times 1$ 잡음 벡터로 각 $\mathbf{w}_{r,t}$ 의 원소들은 평균이 0인 i.i.d. 순환 대칭 복소 가우시안 확률 변수이다. 이러한 HARQ 전송 과정은 $1 \leq r \leq N_R$ 까지 반복되며, 현재 데이터 비트 블록에 대한 HARQ 전송 과정이 성공하거나 r 이 최대치 N_R 에 도달한 경우 새로운 데이터 비트 블록에 대해 $r=1$ 부터 HARQ 전송 과정을 다시 수행한다.

III. 제안 MMSE 기반 연속 터보 등화기

제안 기법의 설명을 위해 본 장에서는 MMSE 기반 터보 등화기의 MMSE 등화기 및 ECC 복호기의 i 번째 Iteration에서의 동작들을 각각의 입출력을 통해 아래 식 (2) 및 식 (3)과 같이 정의한다. 이 때, 서술의 편의상 HARQ 재전송을 위한 결합기법은 식 (3)에서 처럼 비트 레벨 결합을 고려한다.

$$\mathbf{m}_{r,i,e} = \text{MMSE}(\mathbf{y}_r, \mathbf{H}_r, \mathbf{m}_{r,i,p}) \quad (2)$$

$$\mathbf{e}_{r,i,e} = \text{ECC}(\mathbf{e}_{r,i,p} + \sum_{a=1}^{r-1} \mathbf{e}_{a, I_{\max}, p}, \mathbf{e}_{r,i-1,e}) \quad (3)$$

식 (2)에서 $\mathbf{m}_{r,i,p}$ 는 \mathbf{x} 에 대한 사전 연관정 정보로 \mathbf{y}_r 및 \mathbf{H}_r 과 함께 MMSE 등화기의 입력으로 사용된다. 또한 $\mathbf{m}_{r,i,e}$ 는 상기 입력들을 통해 MMSE 등화기에서 계산된 \mathbf{x} 에 대한 사후 연관정 정보를 나타내며, $\mathbf{y}_r = \{\mathbf{y}_{r,1}, \dots, \mathbf{y}_{r,N_I}\}$, $\mathbf{H}_r = \{\mathbf{H}_{r,1}, \dots, \mathbf{H}_{r,N_I}\}$ 이다. 식 (3)의 $\mathbf{e}_{r,i,p}$ 는 \mathbf{y}_r 및 \mathbf{H}_r 에서 계산된 \mathbf{c} 에 대한 사전 연관정 정보로 ECC 복호기의 입력으로 된다. 그리고 $\mathbf{e}_{r,i-1,e}$ 는 이전 Iteration에서 계산된 \mathbf{c} 에 대한 사후 연관정 정보로 $\mathbf{e}_{r,i,p}$ 와 함께 ECC 복호기의 입력으로

사용되며, $\mathbf{e}_{r,i,e}$ 는 상기 입력들을 통해 ECC 복호기에서 계산된 \mathbf{c} 에 대한 사후 연관정 정보이다. I_{\max} 는 MMSE 터보 등화기의 최대 Iteration 수를 나타낸다.

3.1 기존 MMSE 기반 터보 등화기

MIMO-HARQ 시스템을 위한 기존 MMSE 기반 터보 등화기의 동작은 다음과 같이 요약된다^[1].

0) $\mathbf{m}_{r,1,p}$ 및 $\mathbf{e}_{r,0,e}$ 를 모두 0으로 초기화하며, i 를 1로 초기화한다.

1) i 번째 Iteration을 위해 다음 과정을 수행한다. 이 때, 식 (5)의 $f(\cdot)$ 는 $\mathbf{m}_{r,i,e}$ 를 $\mathbf{e}_{r,i,p}$ 로 변환하는 과정을 나타낸다.

$$\mathbf{m}_{r,i,e} = \text{MMSE}(\mathbf{y}_r, \mathbf{H}_r, \mathbf{m}_{r,i,p}) \quad (4)$$

$$\mathbf{e}_{r,i,p} = f(\mathbf{m}_{r,i,e}) \quad (5)$$

$$\mathbf{e}_{r,i,e} = \text{ECC}(\mathbf{e}_{r,i,p} + \sum_{a=1}^{r-1} \mathbf{e}_{a, I_{\max}, p}, \mathbf{e}_{r,i-1,e}) \quad (6)$$

2) 검출 결과에 오류가 없거나 $i = I_{\max}$ 라면 수신 과정을 종료하며, 그렇지 않을 경우 식 (7)을 수행하고 $i := i+1$ 로 설정한 후 과정 1)부터 반복한다. 이 때, 식 (7)의 $g(\cdot)$ 는 $\mathbf{e}_{r,i,e}$ 를 $\mathbf{m}_{r,i+1,p}$ 로 변환하는 과정을 나타낸다.

$$\mathbf{m}_{r,i+1,p} = g(\mathbf{e}_{r,i,e}) \quad (7)$$

3.2 제안 MMSE 기반 연속 터보 등화기

상기 서술한 바와 같이, 기존 기법은 r 번째 HARQ 전송의 수신 초기화 과정에서 $\mathbf{m}_{r,1,p}$ 및 $\mathbf{e}_{r,0,e}$ 를 모두 0으로 설정한다. 이는 연관정 정보들이 첫 번째 Iteration이 수행되기 전에는 아직 생성되지 않았다는 사실로부터 기인한다. 하지만, \mathbf{x} 가 HARQ를 통해 r 번째 전송까지 반복하여 전송된 사실을 고려할 때, 이전 $(r-1)$ 번째 전송의 수신 과정 중에서 생성된 연관정 정보는 현재 r 번째 전송의 수신 과정 중 생성될 연관정 정보의 일부를 포함하고 있음을 알 수 있다. 이러한 특성을 이용하여, 제안 MMSE 기반 연속 터보 등화기는 재전송이 발생한 경우, 즉 $r > 1$ 일 때 기존 기법의 과정 0) 대신 하기의 초기화 과정 0*)을 수행한다.

0*) $\mathbf{m}_{r,1,p} = \mathbf{m}_{r-1, I_{\max}, p}$, $\mathbf{e}_{r,0,e} = \mathbf{e}_{r-1, I_{\max}, e}$ 로 초기화하고, i 를 1로 초기화한다.

즉, 제안 기법은 HARQ 재전송 과정의 특성을 이용하여 이전 전송의 마지막 Iteration에서 생성된 연관정 정보를 현재 전송의 수신 초기화 과정에서 사용한다. 이는 $m_{r-1, I_{\max}, D}$ 및 $e_{r-1, I_{\max}, C}$ 를 저장하기 위한 추가적인 수신단 버퍼가 필요하다. 그러나 기존에 생성된 연관정 정보의 재활용을 통해 기존 기법 대비 복호 수렴 속도의 향상을 도모할 수 있다.

IV. 모의실험 결과

모의실험을 위해 $N_T = N_O = 2$, $N_D = 576$, $N_C = 1152$, $N_S = 576$, $N_T = 288$, 그리고 $N_R = 3$ 일 때 독립적 레일리 감쇄 채널 하에서 QPSK 변조를 사용하는 환경을 고려한다. 또한 LDPC (Low-Density Parity-Check) 부호를 ECC로 사용하였으며, 이 때 터보 검출기의 한 번의 Iteration 당 ECC 복호기 자체의 내부 Iteration 수는 5로 고정하였다.

그림 2에서는 기존 기법과 제안 기법의 BLER (Block Error Rate) 성능을 비교하고 있다. 그림 2를 통해 제안 기법이 $I_{\max} = 2, 4$ 일 때 기존 기법 대비 BLER 성능 이득을 얻고, $I_{\max} = 6$ 일 때 거의 동일한 BLER을 보임을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 I_{\max} 가 작을수록 y_r 및 H_r 을 통해 생성되는 연관정 정보의 양 또한 작아지며, 따라서 기존 연관정 정보의 재활용이 현재 수신 과정에 더욱 큰 영향을 끼치는 현상으로부터 기인한다.

그림 3에서는 기존 기법과 제안 기법의 $r = 3$ 일 때의 복호 수렴까지 필요한 평균 Iteration 수를 비교하고 있다. 그림 3을 통해 제안 기법이 기존 기법 대비 더 적은 수의 Iteration을 통해 복호 수렴을 이룸을 확인할 수 있다. 특히, 매우 낮은 BLER을 갖는 SNR 영역에서, 즉 BLER이 0.01 내외 또는 그 이하인 경우 I_{\max} 가 2, 4, 6일 때 제안 기법은 기존 기법 대비 각각

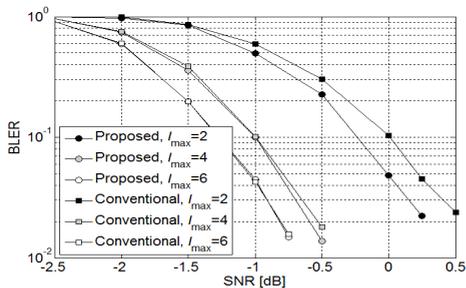


그림 2. 각 터보 등화기의 BLER 성능 비교
Fig. 2. BLER comparisons of turbo equalizers

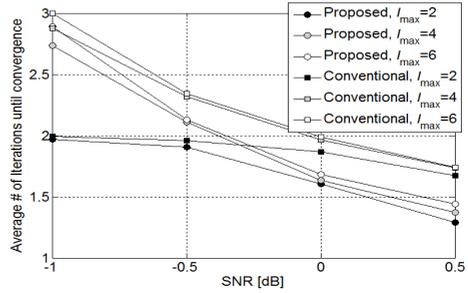


그림 3. 각 터보 등화기의 복호 수렴 속도 비교
Fig. 3. Decoding convergence speed comparisons of turbo equalizers

최대 25%, 21%, 18% 내외의 Iteration 수 및 연산량 감소 효과를 달성한다.

V. 결론

본 논문에서는 MIMO-HARQ 시스템을 위한 MMSE 기반 연속 터보 등화기를 제안하였다. 제안 기법은 기존 기법 대비 특히 최대 Iteration 수가 제한된 상황에서 향상된 오류 성능을 달성함과 동시에 보다 빠른 복호 수렴 속도를 가지며, 안정적인 송수신이 가능하도록 BLER이 충분히 낮은 상황에서 더욱 높은 복호 수렴 속도의 개선을 달성함을 확인하였다. 이러한 사실들을 통해 제안된 MMSE 기반 연속 터보 등화기가 MIMO-HARQ 시스템을 위해 보다 낮은 연산량으로 우수한 BLER 성능을 가지는 수신 기법임을 확인하였다. 이러한 기존 연관정 정보의 재활용은 또한 다른 수신 기법들에도 적용 가능하며, 이는 향후 연구 과제로 남는다.

References

- [1] T. Ait-Idir and S. Saoudi, "Turbo packet combining strategies for the MIMO-ISI ARQ channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 12, pp. 3782-3793, Dec. 2009.
- [2] S. Park and S. Choi, "An iterative MMSE-SIC scheme with group shuffled BP decoding for MIMO systems," *J. KICS*, vol. 35, no. 10, pp. 815-821, Oct. 2011.
- [3] K. Narayanan and G. Stüber, "A novel ARQ technique using the turbo coding principle," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 1, no. 2, pp. 49-51, Mar. 1997.