

LDPC 부호화 MIMO-HARQ 시스템을 위한 선택적 심볼레벨 결합 기법

박 상 준*

Selective Symbol-Level Combining Scheme for LDPC Coded MIMO-HARQ Systems

Sangjoon Park*

요 약

본 논문에서는 LDPC 부호 기반 HARQ가 적용된 MIMO 시스템을 위한 선택적 심볼레벨 결합 기법을 제안한다. LDPC 부호의 반복 복호 과정에서 차수가 높은 비트 노드일수록 복호 수렴에 더 큰 영향을 줄 수 있다는 점을 이용하여, 제안 기법은 수신 신호 중 높은 차수의 비트 노드들을 포함하는 신호들에 대한 심볼레벨 결합을 우선적으로 진행한다. 모의실험 결과 제안 기법이 동일한 연산량을 요구하는 다른 기준의 선택적 심볼레벨 결합 기법 대비 우수한 복호 성능을 달성함을 확인하였다.

Key Words : HARQ, MIMO, Symbol-Level Combining, LDPC, Bit Degree

ABSTRACT

In this letter, a selective symbol-level combining scheme is proposed for MIMO systems with LDPC coded HARQ. Considering bit nodes with a higher degree can affect the decoding convergence more than those with a lower degree during the iterative decoding process, the proposed scheme performs the selective symbol-level combining for the signals having the bit nodes with higher degrees. Simulation results show that the proposed scheme can obtain a

better decoding performance than the other selective symbol-level combining scheme of different selection criteria with the identical computational complexity.

I. 서 론

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, 다중 입출력) 시스템에서 HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request, 복합 자동 재전송 방식)가 적용되어 재전송이 허용된 경우 수신단은 수신 신호 결합을 통해 검출 성능 향상을 도모할 수 있다.^[1] 이를 위한 통상적인 수신 신호 결합 방법으로 BLC (Bit-Level Combining, 비트레벨 결합) 기법 및 SLC (Symbol-Level Combining, 심볼레벨 결합) 기법이 존재하며, 특히 동일한 송신 신호를 반복 전송하는 CC (Chase Combining, 체이스 결합) 방식의 HARQ가 적용된 경우 SLC 기법은 BLC 기법 대비 복호 성능을 크게 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.^[1,2] 하지만 MIMO-HARQ 시스템에서 SLC 기법의 적용을 위해서는 BLC 기법 대비 크게 높은 연산량이 필요하며, 또한 재전송이 증가함에 따라 필요 연산량이 지속적으로 증가하게 되는 특징을 보인다.

이에 본 논문에서는 LDPC (Low-Density Parity-Check, 저밀도 패리티 검사) 부호 기반 HARQ가 적용된 MIMO 시스템을 위한 차수 기반 선택적 SLC 기법을 제안한다. 먼저 제안 기법은 특정 데이터 블록에 대한 모든 수신 신호에 대한 SLC 과정을 진행 하였던 기존 SLC 기법과 달리, 제한된 수의 선택된 수신 신호에 대한 SLC 과정만을 수행하여 연산량 증대를 억제한다. 또한, LDPC 부호를 위한 그래프 기반 반복 복호 과정의 특성상 차수 (Degree)가 높은 비트 노드일수록 메시지의 빠른 전파를 통해 복호 수렴에 더 큰 영향을 주는 점을 이용하여, 제안 기법은 보다 높은 차수의 비트 노드들을 포함하는 신호들을 우선적으로 선택하여 복호 성능 향상을 도모한다.^[3]

II. 시스템 모델

본 논문에서는 메시지 비트 및 부호화 비트의 수가 각각 K 및 N 인 LDPC 부호를 사용하며 송수신 안테나의 수가 각각 N_t 및 N_r 인 시스템을 고려한다.

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

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

논문번호 : 202001-009-A-LU, Received January 19, 2020; Revised January 29, 2020; Accepted January 30, 2020

이 때 LDPC 부호기에 입력되는 메시지 비트는 CRC (Cyclic Redundancy Check) 부호화 과정을 통과하였다고 가정한다. 송신단에서는 CRC 부호화된 메시지 비트들에 대한 LDPC 부호화 과정을 통해 부호화 비트 $\{c_1, \dots, c_N\}$ 를 생성하며, 이는 순차적으로 송신 심볼 $\{s_1, \dots, s_M\}$ 으로 변조된다. 이 때 변조 지수는 Q 이며 따라서 $M = N/Q$ 이다. 변조 과정을 통해 생성된 송신 심볼은 순차적으로 N_i 개씩 묶여 l 번째 송신 신호 벡터 \mathbf{x}_l 를 구성하며, 따라서 송신 신호 벡터의 수 L 는 M/N_i 이다. 따라서 r 번째 HARQ 전송 과정에서의 $\mathbf{x}_l (1 \leq l \leq L)$ 에 대한 시스템 임출력 관계식은 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_{r,l} = \mathbf{H}_{r,l} \mathbf{x}_l + \mathbf{n}_{r,l} \quad (1)$$

식 (1)에서 $\mathbf{y}_{r,l}$ 는 $N_o \times 1$ 수신 신호 벡터이며, $\mathbf{H}_{r,l}$ 는 $N_o \times N_i$ MIMO 채널 행렬이며, $\mathbf{n}_{r,l}$ 는 $N_o \times 1$ AWGN (Additive White Gaussian Noise, 가산 백색 가우시안 잡음) 벡터이다. 이러한 HARQ 전송과정은 HARQ 전송 수 r 이 시스템의 최대 전송 수 R 이 될 때까지 반복되며, 현재 부호어에 대한 복호 과정이 종료된 이후 $r = R$ 이거나 $r < R$ 이면서 CRC 검사에 통과한 경우 $r = 1$ 로 두고 새로운 부호어를 위한 HARQ 전송 과정이 다시 수행된다.

III. 제안 심볼레벨 결합 기법

3.1 기존 BLC 및 SLC 기법

제안 기법의 설명에 앞서 본문에서는 선형 검출기를 가정한 기존 BLC 및 SLC 기법을 간략하게 소개한다. 먼저 BLC 기법의 경우 주어진 r 에 대해 다음과 같은 검출 과정을 모든 $\mathbf{y}_{r,l} (1 \leq l \leq L)$ 에 대해 수행한다.^[1,2]

$$\hat{\mathbf{x}}_{r,l}^{\text{BLC}} = \mathbf{F}_{r,l}^{\text{BLC}} \mathbf{y}_{r,l} \quad (2)$$

식 (2)에서 $\hat{\mathbf{x}}_{r,l}^{\text{BLC}}$ 는 $N_i \times 1$ 벡터로 선형 검출 과정을 통해 얻어진 r 번째 HARQ 전송 과정의 \mathbf{x}_l 에 대한 추정치이며, $\mathbf{F}_{r,l}^{\text{BLC}}$ 는 $N_i \times N_o$ 행렬로 $\mathbf{y}_{r,l}$ 로부터 $\hat{\mathbf{x}}_{r,l}^{\text{BLC}}$ 를 계산하기 위한 선형 필터이다. $\hat{\mathbf{x}}_{r,l}^{\text{BLC}}$ 가

계산된 이후 BLC 기법은 현재까지 \mathbf{x}_l 에 대해 얻어진 모든 $\hat{\mathbf{x}}_{r',l}^{\text{BLC}} (1 \leq r' \leq r)$ 를 결합하여 채널 복호기에 입력될 LLR (Log-Likelihood Ratio)을 계산하게 된다. 즉, BLC 기법은 각 HARQ 전송 과정에 대한 개별적인 추정 과정을 진행한 후 각 추정치를 결합하여 최종 추정 신호를 얻는다.

다음으로 기존 SLC 기법의 경우 현재까지 얻어진 모든 수신 신호 및 채널 행렬을 활용하여 다음과 같은 검출 과정을 수행한다.^[1,2]

$$\hat{\mathbf{x}}_{r,l}^{\text{SLC}} = \mathbf{F}_{r,l}^{\text{SLC}} \mathbf{y}_{r,l}^{\text{SLC}} \quad (3)$$

식 (3)에서 $\mathbf{y}_{r,l}^{\text{SLC}}$ 는 $rN_o \times 1$ 결합 수신 신호 벡터로 r 번째 전송까지 얻어진 모든 $\mathbf{y}_{r,l}$ 를 포함하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y}_{r,l}^{\text{SLC}} = [\mathbf{y}_{1,l}^T \dots \mathbf{y}_{r,l}^T]^T \quad (4)$$

또한 $\mathbf{F}_{r,l}^{\text{SLC}}$ 는 $N_i \times rN_o$ 행렬로 $\mathbf{y}_{r,l}^{\text{SLC}}$ 로부터 $\hat{\mathbf{x}}_{r,l}^{\text{SLC}}$ 를 계산하기 위한 선형 필터이다. SLC 기법은 이렇게 $\hat{\mathbf{x}}_{r,l}^{\text{SLC}}$ 를 계산한 이후 채널 복호기에 입력될 LLR을 계산하게 된다. 즉, 각 HARQ 전송 과정에서 얻어진 모든 수신 신호 벡터들을 먼저 결합한 후 이에 대한 검출 과정을 통해 최종 추정 신호를 계산하게 된다.

3.2 차수 기반 선택적 SLC 기법

다음으로 본문에서는 SLC 기법 사용에 따른 연산량 증대를 억제함과 동시에 BLC 기법 대비 복호 성능을 향상시키기 위한 차수 기반 선택적 SLC 기법을 제안한다.

먼저 부호화 비트 추출 함수 $f(\mathbf{x}_l)$ 를 정의한다. $f(\mathbf{x}_l)$ 는 \mathbf{x}_l 에 포함된 송신 심볼 $\{s_1, \dots, s_M\}$ 를 구성하는 QN_i 개의 부호화 비트를 원소로 갖는 벡터 \mathbf{c}_l 를 계산하는 함수로, 예를 들어 $Q = N_i = 2$ 인 경우 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$f(\mathbf{x}_1) = \mathbf{c}_1 = [c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4] \quad (5)$$

다음으로, \mathbf{c}_l 에 대한 차수 계산 함수 $g(\mathbf{c}_l)$ 를 정의

한다. $g(\mathbf{c}_l)$ 는 \mathbf{c}_l 에 포함된 QN_i 개의 부호화 비트들의 차수 (Bit Degree)의 합을 계산하는 함수이다. 즉, $d(c_n)$ 이 부호화 비트 c_n 의 차수라고 할 때 $g(\mathbf{c}_l)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(\mathbf{c}_l) = \sum_{c_n \in \mathbf{c}_l} d(c_n) \quad (6)$$

위 정의들을 이용하여, 먼저 제안 기법은 각 \mathbf{x}_l 에 포함된 부호화 비트들의 차수의 합 v_l 을 다음과 같이 $1 \leq l \leq L$ 에 대해 계산한다.

$$v_l = g(f(\mathbf{x}_l)) \quad (7)$$

각 v_l 을 값이 큰 순서대로 정렬한 순위를 o_l 이라고 정의하자. 이 때 제안 기법에서는 각 심볼 벡터들의 SLC 또는 BLC 과정 진행 여부를 다음과 같이 결정한다.

$$s_l = \begin{cases} 1, & o_l \leq S \\ 0, & o_l > S \end{cases} \quad (8)$$

식 (8)에서 $S(0 \leq S \leq L)$ 는 제안 기법에서 SLC 과정 진행을 통해 추정될 \mathbf{x}_l 의 수로, $S=0$ 및 L 인 경우는 각각 기존 BLC 및 SLC 기법과 동일하다. 또한 s_l 은 \mathbf{x}_l 의 SLC 과정 진행 여부를 나타내는 값으로, $s_l=0$ 및 1 인 경우 \mathbf{x}_l 은 각각 BLC 및 SLC 과정을 진행한다.

이렇듯 제안 기법은 \mathbf{x}_l 에 포함된 부호화 비트들의 차수 합을 계산하여 보다 높은 차수 합을 갖는 심볼 벡터들에 대해서만 선택적으로 SLC 과정을 진행한다. 이를 통해 기존 SLC 기법 대비 복잡도 감소 효과를 달성할 수 있으며, 또한 높은 차수의 부호화 비트들의 검출 성능 강화를 통해 임의의 선택 방식 대비 복호 성능 향상을 도모할 수 있다. 또한, 식 (7) 및 (8)은 시스템의 MCS (Modulation and Coding Scheme) 레벨 및 스트림 수 등 시스템 환경에 따라 정해지므로 시스템 환경에 대해 사전 계산이 가능하여, 매 전송마다 계산할 필요가 없어 선택 과정을 위해 추가되는 연산량은 무시할 수 있다.

다음으로 제안하는 선택적 심볼레벨 결합 기법의 연산량을 기존 BLC 및 SLC 기법과 비교한다. 제안 기법에서는 총 S 개의 송신 심볼 벡터가 SLC 과정을

통해 추정되며, 나머지 $(L-S)$ 개의 송신 심볼 벡터는 BLC 과정을 통해 추정된다. 선형 검출기의 사용이 고려되었으므로, r 번째 전송에서 전체 송신 심볼 벡터의 추정을 위해 BLC 및 SLC 기법에서의 연산량은 각각 $O(L(2N_i^2N_o + N_i^3))$ 및 $O(L(2rN_i^2N_o + N_i^3))$ 이다.^[4] 따라서 r 번째 전송에서 전 송신 심볼 벡터의 추정을 위한 제안 기법의 연산량은 $O(2(L+S(r-1))N_i^2N_o + LN_i^3)$ 이다. $r=1$ 인 경우 SLC 기법의 수행이 필요하지 않으므로 BLC 기법에서 요구하는 연산량과 동일하며, $r>1$ 인 경우 S 가 증가할수록 SLC 기법과 유사한 연산량을 필요로 하게 된다.

IV. 모의실험 결과

모의실험을 위해 $K=288$ 및 $N=576$ 인 802.16e Block LDPC 부호 및 CRC-16-CCITT가 고려되었다. $Q=2$, $N_i=N_o=3$, $R=2$ 이며 독립적 레일리 감쇄 채널을 고려하였다. 수신단에서는 선형 ZF (Zero Forcing) 검출기 및 40번의 반복 복호 횟수를 고려하였다.

그림 1은 $r=2$ 일 때 각 기법들의 평균 BLER (Block Error Rate) 성능을 비교하고 있다. 해당 결과로부터 높은 차수의 비트 노드를 기준으로 선택하는 제안 방식이 동일한 S 를 갖는 낮은 차수 기준 선택 방식 및 임의의 선택 방식 대비 우수한 BLER을 달성하는 것을 확인할 수 있으며, 특히 S 값이 작을 경우 다른 선택 방식 대비 성능 이득이 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 선택되는 심볼 벡터의 수가 증가할수록 기존

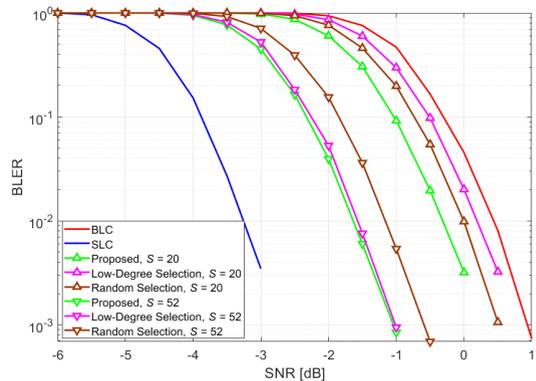


그림 1. 각 기법들의 평균 BLER
Fig. 1. Average BLERs of the combining schemes

SLC 기법에 수렴하여 선택 방식에 따른 영향이 감소하기 때문이다. 또한 선택 방식에 상관없이 선택적 SLC 기법들이 기존 BLC 기법 대비 우수한 오류 성능을 달성함을 확인할 수 있으며, 기존 SLC 기법이 가장 높은 연산량을 대가로 가장 우수한 평균 BLER을 달성함을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 비트 차수를 고려한 선택적 심볼레벨 결합 기법을 제안하였다. 모의실험 결과를 통해 제안 방식이 다른 선택 방식 대비 우수한 검출 성능을 달성할 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서는 편이상 부호화 비트들 및 변조 심볼들이 각 송신 심볼 벡터에 순차적으로 배치된다고 가정하였으며, 또한 HARQ 전송 수에 따른 선택이 항상 동일하도록 진행하였다. 이러한 배치 방식 및 전송 수에 따른 추가 선택에 대한 연구는 향후 과제로 남는다.

References

- [1] Edward W. Jang, et al., "On the combining schemes for MIMO systems with hybrid ARQ," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 8, no. 2, pp. 836-842, Feb. 2009.
- [2] 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.
- [3] Y. Cao, et al., "Degree distribution based HARQ for irregular LDPC," *Electronics Lett.*, vol. 42, no. 6, pp. 363-364, Mar. 2006.
- [4] S. Park, et al., "Extended detection for MIMO systems with partial incremental redundancy based hybrid ARQ," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 11, no. 10, pp. 3714-3722, Oct. 2012.