

LDPC 부호화된 MIMO 시스템을 위한 패리티 검사 기반 반복 간섭 제거 기법

박상준*, 최수용^o

Parity Check Based Iterative Interference Cancellation Scheme for LDPC Coded MIMO Systems

Sangjoon Park*, Sooyong Choi^o

요약

본 논문은 LDPC 부호화된 MIMO 시스템을 위한 패리티 검사 기반 반복 간섭제거 기법을 제안한다. 제안 기법은 반복적인 복호 및 간섭제거 과정을 수행하며, 이 때 매 반복 과정의 복호 과정 이후 패리티 검사식을 만족하는 체크 노드의 비율이 사전 설정된 문턱값 이상인 부호어들만을 간섭제거 과정에 활용한다. 모의실험을 통해 제안 기법이 기존 기법 대비 높은 SNR 영역에서 향상된 블록 오류율을 달성할 수 있음을 확인하였다.

Key Words : MIMO, LDPC, Iterative IC, Parity Check, Check Node Ratio

ABSTRACT

In this letter, a parity check based iterative IC scheme is proposed for LDPC coded MIMO systems. After the decoding procedures in each iteration of the proposed scheme, each decoded codeword is utilized for the IC procedures only when the ratio of the check nodes satisfying the parity check equations to the total number of check nodes is not smaller than the pre-defined threshold value. Simulation results verify that the proposed scheme can achieve

an improved BLER at the high SNR region compared to the conventional iterative IC scheme.

I. 서론

반복 간섭 제거 기법은 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, 다중 입출력) 시스템을 위한 수신 기술 중 하나로, ECC (Error Correction Coding, 오류 정정 부호) 복호기의 출력을 간섭제거 과정을 통해 검출 과정에 반복적으로 반영하는 방식을 통해 MIMO 시스템에서 우수한 오류 성능을 달성할 수 있는 수신 기로 알려져 있다¹⁾. 이러한 반복 간섭제거 기법은 간섭 제거의 형태에 따라 연관정 또는 경관정 방식으로 나눌 수 있다. 이 중 경관정 방식의 반복 간섭제거 기법은 연관정 방식 대비 크게 낮은 연산량을 요구하지만, 연관정 결과 대비 보다 적은 정보를 포함하는 경관정 결과의 활용에 의해 연관정 방식 대비 성능 열화가 발생한다.

이러한 기존 반복 경관정 간섭제거 기법의 성능 개선을 위해, 본 논문에서는 LDPC (Low-Density Parity-Check) 부호화된 MIMO 시스템을 위한 패리티 검사 기반 반복 간섭제거 기법을 제안한다. 기존의 LDPC 복호 기술 관련 연구로부터 복호된 LDPC 부호어의 패리티 검사식을 만족하는 체크 노드의 비율이 해당 부호어에 대한 복호 결과의 신뢰도를 나타낼 수 있음이 알려져 있다²⁾. 해당 사실을 응용하여, 제안 기법은 매 반복 과정의 복호 과정 이후 각 부호어들의 패리티 검사식을 만족하는 체크 노드의 비율을 계산하고, 사전 설정된 문턱값 이상의 비율을 갖는 부호어들만을 간섭제거 과정에 활용한다. 즉, 제안 기법은 복호 과정을 거친 후 일정 이상의 신뢰도를 가진 것으로 판단되는 경관정 부호어들만을 간섭제거 과정에 활용하고, 이를 통해 기존 반복 경관정 간섭제거 기법 대비 향상된 오류 성능을 달성할 수 있다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 송신단 및 수신단 안테나 수가 각각 $N_T(\geq 2)$ 및 $N_O(\geq N_T)$ 이며 N_T 개의 부호어가 동시에 전송되는 MIMO 시스템을 고려한다. 본문에서는

* 이 논문은 2012년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No. 2012R1A1A2041906) 및 2015년도 교육인적자원부 BK21 플러스 사업의 일환인 연세대학교 BEST 정보기술 사업단의 지원을 받아 연구되었음.

• 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 : KICS2015-08-257, Received August 19, 2015; Revised September 10, 2015; Accepted September 10, 2015

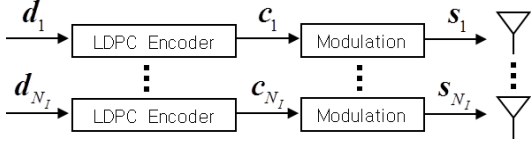


그림 1. 송신단 블록 다이어그램
Fig. 1. Transmitter block diagram

또한 서술의 편의상 모든 부호어가 동일한 변조방식 및 동일한 LDPC 부호를 사용하는 환경을 고려한다. LDPC 부호로는 $N_B \times N_D$ 생성 행렬 \mathbf{G} 및 $N_C \times N_B$ 패리티 검사 행렬 \mathbf{P} 를 지니는 LDPC 부호를 고려하여, 이 때 N_D, N_C, N_B 는 각각 LDPC 부호의 입력 데이터 비트, 체크 노드, 비트 노드의 수를 나타낸다. 그림 1은 시스템의 송신단 블록 다이어그램을 나타낸다. n 번째 송신 안테나에서 전송되는 데이터 비트 블록 $\mathbf{d}_n = [d_{n,1}, \dots, d_{n,N_D}]^T$ 는 LDPC 부호기를 거쳐 $\mathbf{c}_n = [c_{n,1}, \dots, c_{n,N_B}]^T$ 로 부호화되며, \mathbf{c}_n 는 다시 변조기를 거쳐 $\mathbf{s}_n = [s_{n,1}, \dots, s_{n,N_S}]^T$ 로 변조된다. 이 때 \mathbf{s}_n 의 각 원소들에 대한 송신 심볼당 평균 에너지는 E_s 이다. $1 \leq n \leq N_I$ 에 해당하는 $N_S \times 1$ 벡터 \mathbf{s}_n 은 $N_I \times 1$ 송신 심볼 벡터들의 집합 $\{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{N_I}\}$ 로 나타낼 수 있으며, 이 때 $\mathbf{x}_t = [s_{1,t}, \dots, s_{N_I,t}]^T$ 는 $1 \leq t \leq N_S$ 일 때 t 번째 전송 시간의 송신 심볼 벡터를 나타낸다. 이 때 각 \mathbf{x}_t 에 대한 수신 신호 벡터 \mathbf{r}_t 는 다음과 같다.

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

식 (1)에서 \mathbf{H}_t 는 $N_O \times N_I$ 행렬로 송수신단 사이의 MIMO 채널을 나타내며 \mathbf{n}_t 는 $N_O \times 1$ 잡음 벡터로 각 \mathbf{n}_t 의 원소들은 평균이 0이고 분산 σ^2 을 가지는 독립적이고 동일한 분포의 순환 대칭 복소 가우시안 확률 변수이다. 따라서 시스템의 평균 SNR (Signal-to-Noise Ratio)은 E_S/σ^2 로 정의된다.

III. 제안 패리티 검사 기반 반복 간섭제거 기법

본 장에서는 제안 패리티 검사 기반 반복 간섭제거 기법의 동작을 요약한다. 우선 제안 기법은 반복 검출 및 복호 과정을 시작하기에 앞서 초기화 과정을 수행한다. 먼저 $e_{n,i}$ 를 $1 \leq n \leq N_I$ 및 $1 \leq i \leq I_{\max}$ 에 대해 모두 0으로 초기화한다. 이 때 $e_{n,i}$ 는 i 번째 반복

과정의 복호 과정 이후 생성된 \mathbf{c}_n 의 경관정 복호 결과 $\hat{\mathbf{c}}_{n,i}$ 에서 패리티 검사식을 만족하는 체크 노드의 비율을 나타내며 I_{\max} 는 최대 반복 과정의 수를 나타낸다. 또한, i 를 1로 초기화하고 체크 노드 비율의 문턱값 θ ($0 \leq \theta \leq 1$)를 사전 설정한다.

초기화 과정이 수행된 이후, 제안 기법은 각 부호어 \mathbf{c}_n ($1 \leq n \leq N_I$)에 대해 하기 과정을 I_{\max} 반복 과정만큼 반복 수행한다. $\hat{\mathbf{c}}_{n,i}$ 를 사용한 간섭제거 동작은 기존 기법과 동일한 관계로 본문에서는 서술의 편의상 구체적인 설명을 생략한다.

1) 각 \mathbf{c}_n 에 대한 사전 LLR (Log-Likelihood Ratio) 값 $l_{n,i}$ 을 계산한다. 예를 들어, BPSK 변조 및 ZF (Zero-Forcing) 검출기의 사용을 가정할 때, 첫 번째 반복 과정에서 ($i=1$) $s_{n,t}$ 를 통해 전송된 부호화 비트 $c_{n,k}$ 에 대한 사전 LLR $l_{n,k,i}$ 은 다음과 같이 계산된다^[3].

$$l_{n,k,i} = \frac{E_s \left[(\mathbf{H}_t^H \mathbf{H}_t)^{-1} \mathbf{H}_t^H \mathbf{r}_t \right]_n}{\sigma^2 \left[(\mathbf{H}_t^H \mathbf{H}_t)^{-1} \right]_{nn}} \quad (2)$$

식 (2)에서 $[\mathbf{A}]_{nn}$ 은 행렬 \mathbf{A} 의 n 번째 대각 원소, $[\mathbf{a}]_n$ 은 벡터 \mathbf{a} 의 n 번째 원소를 나타낸다.

2) $l_{n,i}$ 을 사용한 복호 과정을 수행하여 경관정 복호 결과 $\hat{\mathbf{c}}_{n,i}$ 및 신드롬 검사 결과 $\mathbf{w}_{n,i} = \mathbf{P}\hat{\mathbf{c}}_{n,i}$ 를 얻는다.

3) $\mathbf{w}_{n,i}$ 를 사용하여 패리티 검사식을 만족하는 체크 노드의 비율 $e_{n,i}$ 를 아래와 같이 계산한다.

$$e_{n,i} = \frac{1}{N_C} \left(N_C - \sum_{k=1}^{N_C} [\mathbf{w}_{n,i}]_k \right) \quad (3)$$

만약 $e_{n,i} = 1$ 인 경우, n 번째 부호어 \mathbf{c}_n 의 모든 패리티 검사식이 만족되었으므로 $\hat{\mathbf{c}}_{n,i}$ 를 최종 검출 결과로 놓고 $e_{n,i}$ 를 $i+1 \leq i \leq I_{\max}$ 에 대해 모두 1로 둔 후 \mathbf{c}_n 의 검출 과정을 종료한다. 그렇지 않을 경우, n 번째 부호어 \mathbf{c}_n 을 위한 간섭제거 가능 부호어들의 집합 $\Delta_{n,i}$ 을 아래와 같이 계산한다.

$$\Delta_{n,i} = \{n' | 1 \leq n' \leq N_I, n' \neq n, e_{n',i} \geq \theta\} \quad (4)$$

즉, $\Delta_{n,i}$ 는 자기 자신($\hat{\mathbf{c}}_{n,i}$)을 제외하고 $e_{n',i} \geq \theta$ 를 만족하는 다른 부호어들($\hat{\mathbf{c}}_{n',i}$)만을 포함한다.

4) $\Delta_{n,i}$ 에 포함되는 부호어들을 사용하여 c_n 에 해당하는 변조 신호 s_n 을 위한 간섭제거 과정을 수행한다. 마지막으로 $i:=i+1$ 로 증가시킨 이후 과정 1)부터 반복한다.

상기 서술한 바와 같이, 제안 기법은 매 반복 과정의 복호 과정 이후 θ 이상의 패리티 검사식들을 만족하는 체크 노드 비율을 갖는 부호어들을 찾는다. 이를 통해 제안 기법은 해당 조건을 만족시키는 부호어가 존재하는 경우, 즉 복호 과정 이후 사전 설정된 기준값 이상의 높은 신뢰도를 가지는 것으로 판단되는 부호어들만을 사용하여 각 부호어에 대한 간섭을 제거한다. 따라서 제안 기법은 매 반복 과정마다 모든 부호어의 경관정 결과를 간섭제거 과정에 상시 활용하는 기존 기법 대비 성능 향상을 도모할 수 있다.

IV. 모의실험 결과

모의실험을 위해 $N_T = N_O = 3$, $N_B = 576$, $N_D = N_C = N_S = 288$, 그리고 독립적 레일리 감쇄 채널 하에서 QPSK 변조를 사용하는 환경을 고려하였으며, LDPC 부호로는 부호율 0.5의 Block LDPC 부호를 고려하였다^[4]. 수신단에서는 ZF 검출기의 사용을 고려하였으며, 또한 $I_{max} = 5$ 로 설정되었고 매 검출 반복 과정 당 복호 과정의 반복 횟수는 20으로 고정하였다.

그림 2는 문턱값 θ 에 따른 제안 기법의 BLER (Block Error Rate) 성능을 비교하고 있다. 이 때 $\theta = 0$ 인 경우 매 반복 과정마다 모든 부호어가 간섭제거에 사용되므로 이는 기존 반복 경관정 간섭제거 기법과 동일하다. 그림 2를 통해 낮은 SNR 영역에서는 θ 가 감소할수록 우수한 BLER 성능을 보임을 확인

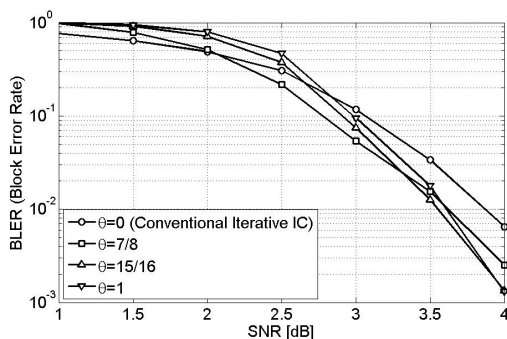


그림 2. 문턱값에 따른 제안 기법의 BLER 성능
Fig. 2. BLER performances of the proposed scheme according to the threshold value

할 수 있다. 즉, SNR 열화로 인해 좋은 오류 성능을 얻을 수 없는 경우, 보다 많은 간섭제거 동작을 통해 성능 향상을 달성할 수 있음을 보인다. 이와 반대로, 그림 2를 통해 높은 SNR 영역에서는 θ 가 증가할수록 우수한 BLER 성능을 보임을 확인할 수 있다. 즉, 간섭제거 이득 없이도 일정 수준 이상의 오류 성능을 달성하는 경우, 높은 신뢰도를 가지는 경관정 결과들만을 간섭제거 과정에 활용하여 성능 향상을 달성할 수 있음을 보인다.

V. 결론

본 논문에서는 LDPC 부호화된 MIMO 시스템을 위한 패리티 검사 기반 반복 간섭제거 기법을 제안하였다. 본 논문에서는 서술의 편의상 점대점 공간 다중화 MIMO 시스템 환경을 가정하였으나, 제안 기법은 시공간 부호화 MIMO 시스템이나 다중 사용자 MIMO 시스템 등 복수의 LDPC 부호어들이 동시 수신되는 다른 MIMO 시스템에도 적용 가능하다. 모의 실험을 통해 제안 기법이 높은 SNR 영역에서 사전 설정된 문턱값의 증가에 따라 기존 기법 대비 성능 향상을 이룰 수 있음을 확인하였다. 향후 과제, 이러한 사전 설정 문턱값의 시스템 및 수신단 환경 등에 따른 최적화 및 분석이 필요하다.

References

- [1] A. Matache, et al., "Reduced complexity MIMO detectors for LDPC coded systems," *IEEE MILCOM*, vol. 2, pp. 1073-1079, Oct. 2011.
- [2] B. Shin, et al., "New stopping criteria for iterative decoding of LDPC codes in H-ARQ systems," *J. KICS*, vol. 33, no. 9, pp. 683-690, Sept. 2008.
- [3] 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.
- [4] IEEE 802.16, *IEEE Standard for local and metropolitan area networks - part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*, Feb. 2006.