

다중 입출력 다중 부호어 전송 환경을 위한 오류 검출 기반 순차적 간섭제거 기법

박 상 준*

Error Detection Based Successive IC for Multiple Codeword Transmission in MIMO Systems

Sangjoon Park*

요 약

본 논문에서는 다중 입출력 시스템의 다중 부호어 전송 환경에서 오류 검출 기반 순차적 간섭제거 기법을 제안한다. 부호어간의 복호 순서에 따라 순차적인 간섭제거를 무조건적으로 진행하는 기존 순차적 간섭제거 기법과 달리, 제안 기법에서는 각 복호된 부호어가 오류가 없는 것으로 검출된 경우에만 간섭제거를 진행한다. 따라서 제안 기법은 간섭제거 과정에서의 오류 전파 최소화화를 통해 오류 성능을 향상시킬 수 있다. 모의실험 결과 제안 기법이 다중 입출력 시스템에서 기존 순차적 간섭제거 방식 대비 다중 부호어 전송 환경의 오류 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

Key Words : Successive IC, Multiple Codeword, Error Detection, Error Propagation, MIMO

ABSTRACT

In this letter, a successive IC scheme based on the error detection is proposed for multiple codeword transmission in MIMO systems. Unlike the conventional successive IC scheme that performs the successive IC procedure of the last decoded codeword unconditionally, the proposed scheme

performs the IC procedure only when the decoded codeword is detected in no errors. Therefore, the error propagation is minimized in the proposed scheme, which results in the performance enhancement. Simulation results show that the proposed scheme outperforms the conventional scheme for multiple-codeword transmissions in MIMO systems.

I. 서 론

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 시스템의 다중 부호어 전송 환경에서는 각 부호어들이 독립적인 복호 과정을 거칠 수 있음을 이용하여 부호어 단위의 수신 절차를 진행할 수 있다.^[1-4] 따라서 다중 부호어 전송 시에는 부호어간 복호 순서에 따른 복호 및 간섭제거 과정을 진행하는 부호어 단위의 순차적 간섭제거 (successive interference cancellation) 기법을 적용할 수 있다^[2,5]. 하지만 순차적 간섭제거 과정에 사용되는 부호어에 오류가 존재할 경우 해당 부호어의 오류가 다음 부호어로 전파되는 오류 전파 (error propagation) 현상이 발생하게 되며, 이 경우 해당 부호어의 오류가 추후 복호될 모든 부호어에 전파되어 시스템의 오류 성능이 크게 저하될 수 있다.^[3,4]

따라서 본 논문에서는 다중 부호어 전송 환경에서 이러한 오류 전파를 최소화할 수 있는 부호어 단위의 오류 검출 기반 순차적 간섭제거 기법을 제안한다. 제안 기법에서는 각 부호어에 적용된 오류 검출 및 정정 부호를 이용하여, 특정 부호어의 복호 이후 복호된 부호어에 오류가 없는 것으로 판단되는 경우에만 간섭제거를 진행한다. 이를 통해 제안 기법은 오류 전파를 최소화하여 다중 부호어 전송 환경에서의 오류 성능 향상을 도모할 수 있다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 송신단 및 수신단에 각각 N 및 M 개의 안테나를 사용하는 공간 다중화 MIMO 시스템을 고려한다. 이 때 각 안테나에서는 하나의 부호어가 전송되는 상황을 가정하며, 따라서 시스템에서는 N 개의 부호어가 동시에 전송된다. 그림 1에서는 송신단

* 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 : 202205-119-A-LU, Received June 20, 2022; Revised July 12, 2022; Accepted July 12, 2022;

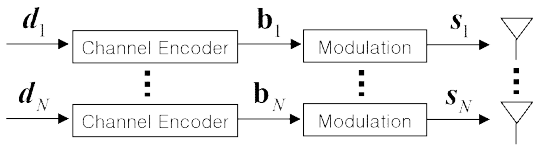


그림 1. 송신단 블록 다이어그램
Fig. 1. Transmitter Block Diagram

블록 다이어그램을 나타내고 있다. 각 n 번째 안테나에서 전송되는 부호어는 데이터 비트열 벡터 \mathbf{d}_n 에 오류 검출 부호 및 오류 정정 부호의 부호화 (encoding) 과정을 거쳐 생성되며, 이 때 각 부호어의 길이를 C 라고 하면 각 $n(1 \leq n \leq N)$ 번째 안테나에서 전송될 부호어는 $1 \times C$ 벡터인 \mathbf{b}_n 으로 나타난다. \mathbf{b}_n 은 변조 (modulation) 과정을 거쳐 n 번째 안테나의 송신 심볼 벡터인 \mathbf{s}_n 으로 변환되어 채널을 통해 전송된다. 이 때 각 송신 심볼 벡터의 길이를 K 라고 하면, 각 \mathbf{s}_n 의 $k(1 \leq k \leq K)$ 번째 송신 심볼들이 채널을 거쳐 수신된 $M \times 1$ 수신 신호 벡터 \mathbf{r}_k 는 다음과 같이 나타난다.

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k^* + \mathbf{n}_k \quad (1)$$

식 (1)에서 $\mathbf{s}_k^* = [s_1(k) \dots s_N(k)]$ 는 $N \times 1$ 송신 신호 벡터로 각 n 번째 안테나의 송신 심볼 벡터인 \mathbf{s}_n 의 k 번째 원소를 n 번째 원소로 포함한다. 또한 \mathbf{H}_k 는 $M \times N$ 채널 행렬이며, \mathbf{n}_k 는 $M \times 1$ 가산 백색 가우시안 잡음 (additive white Gaussian noise) 벡터로 \mathbf{n}_k 의 각 원소들은 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 복소 가우시안 분포를 따른다.

III. 제안 기법

다중 부호어 시스템에서 통상적인 부호어 단위의 순차적 간섭제거 기법은 다음과 같이 동작한다.^[3] 먼저 초기화 단계에서의 부호어간 복호 순서 결정 과정을 통해 $1 \leq n \leq N$ 까지 n 번째로 복호되는 부호어 $a(n)$ 을 결정한다. 초기화 과정을 통해 복호 순서가 결정된 이후, $n=1$ 로 두고 부호어 $\mathbf{c}_{a(n)}$ 을 복호하기 위한 LLR (Log-Likelihood Ratio) 산출 및 연관성 복호 과정을 통해 $\mathbf{c}_{a(n)}$ 에 대한 경관성 부호어 $\hat{\mathbf{c}}_{a(n)}$ 을 얻는다. 이후 $\hat{\mathbf{c}}_{a(n)}$ 을 이용한 간섭제거 과정을 통해 $\mathbf{c}_{a(n)}$ 에 대한 수신 과정을 종료한다. 이러한 과정을 $n=1$ 부터 $n=N$ 까지 $a(n)$ 을 기준으로 반복하여

$\hat{\mathbf{c}}_{a(N)}$ 를 얻을 때까지 진행한다. 이 때 마지막 부호어 $\hat{\mathbf{c}}_{a(N)}$ 산출시 이를 통해 간섭제거 이득을 얻을 수 있는 부호어가 존재하지 않으므로 $\hat{\mathbf{c}}_{a(N)}$ 을 이용한 간섭제거 절차는 생략될 수 있다.

이와 같은 순차적 간섭제거 기법은 오류 전파에 따라 성능이 크게 좌우될 수 있다.^[1]-5] 통상적으로는 오류 전파 확률을 최소화하기 위해 각 부호어의 평균 출력 SNR (Signal to Noise Ratio)이나 채널 이득 산출 등을 기반으로 복호 순서를 결정할 수 있다. 하지만 모든 부호어에 대한 항상 간섭제거 과정을 진행하는 경우 평균 BLER (Block Error Rate)가 0으로 오류가 전혀 발생하지 않는 경우를 제외하면 오류 전파의 발생 가능성은 항상 존재하며, 이에 따라 부호어 단위의 순차적 오류제거 기법은 통상적인 동작 SNR (operating SNR) 범위에서 간섭제거를 수행하지 않는 선형 검출방식 대비 오류 전파로 인해 성능 향상이 미약할 수 있다.

이를 해결하기 위해, 본 논문에서는 복호 과정이 종료된 이후 얻어진 경관성 부호어에 대한 오류 검출 과정을 통해 간섭제거 여부를 결정하는 순차적 간섭제거 기법을 제안한다. 제안 기법의 초기화, LLR 산출, 연관성 복호 및 경관성 부호어 산출 과정은 앞서 기술된 기존 부호어 단위의 순차적 간섭제거 기법과 동일하며, 경관성 부호어 $\hat{\mathbf{c}}_{a(n)}$ 이 얻어진 이후 다음과 같은 오류 검사 과정을 진행한다.

$$e_{a(n)} = f(\hat{\mathbf{c}}_{a(n)}) \quad (2)$$

식 (2)의 $f(\cdot)$ 은 CRC (Cyclic Redundancy Check) 등의 오류 검출 부호 기반 오류 검출 과정을 나타내며, 오류가 검출된 경우 $e_{a(n)} = 1$, 오류가 검출되지 않은 경우 $e_{a(n)} = 0$ 이다.

경관성 부호어에 대한 오류 검출 과정 이후, 제안 기법에서는 $e_{a(n)}$ 에 따라 해당 부호어의 간섭제거 진행 여부를 결정한다. $e_{a(n)} = 0$ 인 경우 오류가 검출되지 않았으므로 $\hat{\mathbf{c}}_{a(n)}$ 을 이용한 간섭제거 과정을 진행하고 다음 부호어 $\mathbf{c}_{a(n+1)}$ 에 대한 LLR 계산 등의 복호 과정을 기존 기법과 동일하게 진행하며, 만약 $e_{a(n)} = 1$ 인 경우 오류가 검출되어 간섭제거 과정에서 오류 전파가 발생하므로 $\hat{\mathbf{c}}_{a(n)}$ 에 대한 간섭제거를 생략하고 다음 부호어 $\mathbf{c}_{a(n+1)}$ 에 대한 LLR 계산 등의 복호 과정을 진행하게 된다.

이와 같이 제안 기법에서는 매 경판정 부호어의 오류 검출 결과를 통해 간섭제거 여부를 결정한다. 따라서 제안 기법에서의 오류 전파 여부는 적용된 오류 검출 부호 등의 오류 검출 성능에 의해 결정된다. 통상 무선 통신 시스템에서 널리 사용되는 CRC-24 및 CRC-32 등의 오류 검출 부호의 경우 데이터 비트의 평균 BER (Bit Error Rate) 10^{-2} 환경에서 10^{-6} 미만의 미검출 오류 확률을 지니므로, 이와 같은 오류 검출 부호가 적용된 경우 제안 기법의 오류 전파 가능성을 최소화할 수 있다.^[6] 또한 통상적인 패킷 전송 방식 등의 다중 부호어 전송 시스템에서 CRC 등의 오류 검출 부호는 데이터 무결성 검증 및 송수신단 사이의 피드백 등을 위해 통상적으로 적용되기 때문에 오류 검출을 위한 추가적인 패리티 비트 등의 오버헤드는 필요하지 않다. 추가적으로, 간섭제거 과정을 항상 수행하게 되는 기존 기법 대비 제안 기법은 오류 전파를 최소화시킬 뿐만 아니라 불필요한 간섭제거 과정을 생략함으로써 연산량 절감 또한 도모할 수 있다.

IV. 모의실험 결과

모의실험을 위해 $N=M=12$ 인 MIMO 시스템에서 부호율 $2/3$ 및 $C=960$ 인 LDPC (Low-Density Parity-Check) 부호 및 CRC-32를 고려하였다. 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 변조를 고려하였으며, 따라서 $K=240$ 이다. 채널 환경으로 독립적 레일리 감쇄 채널을 고려하였으며, 순차적 간섭제거 기법들에서는 부호어들의 평균 채널 이득 크기에 따라 복호 순서를 결정하였다. 수신기에서는 LLR 산출을 위해 선형 ZF (Zero-Forcing) 및 MMSE (Minimum Mean-Square-Error) 검출기를 고려하였으며, 반복 복호 횟수는 20번이다.

그림 2 및 3에서는 각각 수신 기법들의 평균 BER 및 BLER 성능을 비교하고 있다. 해당 결과로부터 제안 기법의 적용을 통해 ZF 및 MMSE 검출기에 관계없이 BER 및 BLER 관점 모두에서 1 dB 내외의 성능 이득을 얻을 수 있다. 특히 통상적인 순차적 간섭제거 기법의 경우 BLER 관점에서는 간섭제거를 적용하지 않은 선형 검출기 대비 약간의 성능 이득만을 얻으며, BER 관점에서는 오히려 선형 검출기 대비 열화된 성능을 달성함을 확인할 수 있다. 이는 복호에 실패한 패킷들의 간섭 제거로 인한 오류 전파 현상으로 인해 간섭 제거 이후 복호를 진행하는 패킷들의 평균 BER이 크게 증가하기 때문이다.

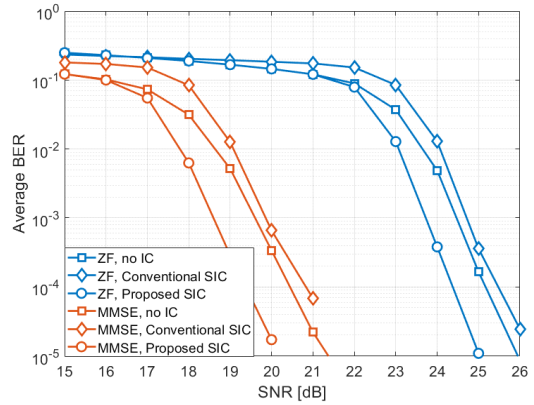


그림 2. 12x12 MIMO 시스템에서 평균 BER 성능
Fig. 2. Average BERs for 12x12 MIMO systems

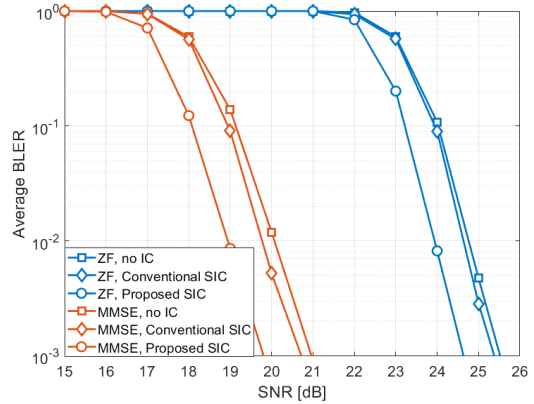


그림 3. 12x12 MIMO 시스템에서 평균 BLER 성능
Fig. 3. Average BLERs for 12x12 MIMO systems

V. 결론

본 논문에서는 부호어 기반 순차적 간섭제거 기법의 오류 전파를 최소화하기 위한 오류 검출 기반 순차적 간섭제거 기법을 제안하였다. 모의실험 결과를 통해 제안 기법을 사용할 경우 기존 순차적 간섭제거 기법 대비 시스템의 오류 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서는 간섭제거 여부 결정을 위한 오류 검출 시 오류 검출 부호만을 활용하였으나, 오류 정정 부호의 신드롬 결과 등을 추가적으로 오류 검출 판정에 활용하여 오류 전파 확률을 추가적으로 감소시킬 수 있다. 이러한 연구는 향후 과제로 남는다.

References

- [1] T. Im, et al., "An efficient soft-output MIMO signal detection method based on multiple channel ordering technique and its VLSI implementation," *J. KICS*, vol. 35, no. 12, pp. 1044-1051, Dec. 2010.
- [2] N. Miridakis and D. Veragdos, "A survey on the successive interference cancellation performance for single-antenna and multiple-antenna OFDM systems," *IEEE Comm. Surv. & Tuts.*, vol. 15, no. 1, pp. 312-335, Mar. 2013.
(<https://doi.org/10.1109/SURV.2012.030512.00103>)
- [3] A. Toboso, et al., "Optimal detection ordering for coded V-BLAST," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 1, pp. 100-111, Jan. 2014.
(<https://doi.org/10.1109/TCOMM.2013.121413.130268>)
- [4] S. Park, "Decoding based ordering for successive IC in MIMO multiple-codeword systems," *J. KICS*, vol. 45, no. 11, pp. 1847-1850, Nov. 2020.
(<https://doi.org/10.7840/kics.2020.45.11.1847>)
- [5] S. Park, et al., "An improved ordering method for MIMO signal detection using QR decomposition and successive interference cancellation," *J. KICS*, vol. 34, no. 10, pp. 1010-1015, Oct. 2009.
- [6] T. Fujiwara, et al., "On the undetected error probability for shortened Hamming codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 33, no. 6, pp. 570-574, Jun. 1985.
(<https://doi.org/10.1109/TCOM.1985.1096340>)