DBpia

논문 20-45-11-06 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '20-11 Vol.45 No.11
https://doi.org/10.7840/kics.2020.45.11.1847

MIMO 다중 부호어 시스템에서 순차적 간섭 제거 기법을 위한 복호 기반 순서 결정 방식

박 상 준◆°

Decoding Based Ordering for Successive IC in MIMO Multiple-Codeword Systems

Sangjoon Park◆°

요 약

본 논문에서는 다중 부호어를 전송하는 MIMO 시스템에서 순차적 간섭 제거 기법을 위한 복호 기반 순서 결정 방식을 제안한다. 제안 기법은 먼저 각 수신된 부호어들에 대한 사전 복호 과정을 진행하여 각 수신 부호어들의 간섭 제거 순서를 결정하고, 이를 바탕으로 각 부호어들에 대한 복호 및 간섭 제거 과정을 순차적으로 진행한다. 즉 제안 기법은 사전 복호 과정을 통해 얻어진 복호 결과를 토대로 간섭 제거 순서를 결정하여 간섭 제거 과정에서 부정확한 간섭 제거에 따른 오류 전파 가능성을 감소시킨다. 모의실험 결과 제안 기법의 적용을 통해 다중 부호어 MIMO 시스템의 오류 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

Key Words : MIMO, Successive IC, Multiple Codeword, Decoding, Syndrome

ABSTRACT

In this letter, a decoding based ordering is proposed for successive IC scheme in MIMO systems with multiple-codeword transmission. In the proposed scheme, a prior decoding procedure is initially performed to determine the IC order of the received codewords, and the IC procedure with the decoding is performed later according to the order given by the prior decoding procedure. Therefore, using the decoding results of the received codewords for the ordering, the proposed scheme can reduce the possibility of error propagations by the incorrect IC operation during the successive IC procedure. Simulation results show that the proposed ordering significantly improves the error performance of the successive IC for MIMO systems with multiple-codeword transmission.

Ⅰ. 서 론

순차적 간섭 제거 기법 (successive interference cancellation)은 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, 다중 입출력) 시스템을 위한 수신 기법 중 하나로, 심벌 또는 부호어 등 간섭 제거 단위에 대한 순차적인 간섭 제거 과정을 통해 선형 검출 방식 대비 우수한 오류 성능을 달성할 수 있는 수신 기법으로 알려져 있다.[1-4] 이러한 순차적 간섭 제거 기법에서는 간섭 제거 과정에 앞서 간섭 제거 단위들의 간섭 제거 순서가 결정되어야 한다. 이 때 간섭 제거 순서가 정확히 결정되지 못할 경우 한 간섭 제거 단위에서 발생한 오류가 다른 간섭 제거 단위로 전파되는 오류 전파 (error propagation) 현상이 발생하여 순차적 간섭 제거 기법의 성능이 크게 저하될 수 있다.[1-3]

이러한 간섭 제거 순서의 보다 정확한 결정을 위해, 본 논문에서는 순차적 간섭 제거 기법이 적용된 다중 부호어 전송 MIMO 시스템을 위한 복호 기반 순서 결정 방식을 제안한다. 제안 기법에서는 본격적인 간섭 제거 과정에 앞서 우선 각 수신된 부호어들에 대한 사전 복호 과정을 진행한다. 이후 제안 기법은 해당 복호 결과를 토대로 각 부호어들의 간섭 제거 순서를 결정하여 순차적인 복호 과정 및 간섭 제거 과정을 추가적으로 진행한다. 사전 복호 과정을 통해 얻어진 복호 결과는 각 수신된 부호어들의 신뢰도 및 오류 정도를 나타낼 수 있으므로, 이를 바탕으로 제안 기법은 순차적 간섭 제거 과정에서 부정확한 간섭 제거에 따른 오류 전파의 가능성을 감소시켜 순차적 간섭 제거 기법의 오류 성능 향상을 도모할 수 있다.

※ 이 논문은 2019년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1C1C1003202).
◆° First and Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-6684-9803) Kyonggi University, Department of Electronic Engineering, sj.park@kgu.ac.kr, 조교수, 정회원
논문번호 : 202009-238-A-LU, Received September 25, 2020; Revised October 2, 2020; Accepted October 7, 2020;

www.dbpia.co.kr

Ⅱ. 시스템 모델

본 논문에서는 송신단 및 수신단 안테나의 수가 각각 N_{T} 및 N_{R}이며 N_{T}개의 부호어가 동시에 전송되는 공간 다중화 (spatial multiplexing) MIMO 시스템을 고려한다. 각 부호어인 $1\times N$ 부호 비트 벡터 $\boldsymbol{c}_n(1\le n\le N_{\mathrm{T}})$은 $1\times K$ 메시지 비트 벡터 $\boldsymbol{d}_n$을 입력으로 받아 선형 블록 부호의 부호화 (encoding) 과정을 거쳐 생성된다. 이후 송신단은 변조 과정을 거쳐 각 $\boldsymbol{c}_n$으로부터 $1\times L$ 송신 심벌 벡터 $\boldsymbol{t}_n$을 생성한다. 이 때 $L=N/M$이고 M은 변조 심벌 당 비트 수를 나타낸다. 생성된 $\boldsymbol{t}_n$은 채널을 통해 전송되며, 이 때 l번째 전송 시간에서 시스템의 입출력 관계식은 다음과 같이 나타난다.

$$\boldsymbol{y}_l=\boldsymbol{G}_l\boldsymbol{x}_l+\boldsymbol{n}_l \tag{1}$$

식 (1)에서 $\boldsymbol{x}_l=[t_1(l)\cdots t_{N_{\mathrm{T}}}(l)]$은 $N_{\mathrm{T}}\times 1$ 송신 신호 벡터로 각 변조된 부호어의 l번째 송신 심벌 $t_n(l)$을 포함하며, $\boldsymbol{y}_l$은 $N_{\mathrm{R}}\times 1$ 수신 신호 벡터이다. 또한 $\boldsymbol{G}_l$은 $N_{\mathrm{R}}\times N_{\mathrm{T}}$ 채널 행렬이며 $\boldsymbol{n}_l$은 $N_{\mathrm{R}}\times 1$ 가우시안 (Gaussian) 잡음 벡터이다.

Ⅲ. 제안 기법

제안 기법의 설명에 앞서 다중 부호어 전송 MIMO 시스템을 위한 부호어 단위 순차적 간섭 제거 기법의 동작을 간략히 기술한다.[2,3] 먼저 수신단에서는 간섭 제거 및 복호 순서 결정 과정을 통해 $N_{\mathrm{T}}\times 1$ 벡터 $\boldsymbol{o}=[o(1),\cdots,o(N_{\mathrm{T}})]$를 계산한다. 이 때 $o(n)$는 n번째로 복호되는 부호어의 인덱스를 나타낸다. 간섭 제거 및 복호 순서의 결정 과정이 종료된 이후, 수신단에서는 $o(1)$번째 부호어에 대한 LLR (Log-Likelihood Ratio) 계산 과정을 거친 후 복호 과정을 진행하여 경판정 부호어 $\hat{\boldsymbol{c}}_{o(1)}$을 얻고, 해당 경판정 부호어를 이용하여 아직 복호되지 않은 $\{o(2),\cdots,o(N_{\mathrm{T}})\}$번째 부호어들을 위한 간섭 제거 과정을 수행한다. 이러한 과정은 마지막 $o(N_{\mathrm{T}})$번째 부호어에 대한 경판정 부호어 $\hat{\boldsymbol{c}}_{o(N_{\mathrm{T}})}$를 얻을 때까지 반복되며, 이 때 추가적으로 복호할 부호어가 남아 있지 않으므로 $\hat{\boldsymbol{c}}_{o(N_{\mathrm{T}})}$를 이용한 간섭 제거 과정은 생략된다.

이와 같은 순차적 간섭 제거 기법의 성능은 간섭 제거 및 복호 순서 결정 과정에서의 정확도에 의해 크게 좌우된다.[1-4] 즉, 주어진 간섭 제거 단계에서 보다 작은 수의 오류를 갖는 부호어가 항상 먼저 복호 및 간섭 제거 과정을 거치도록 $\boldsymbol{o}$가 결정된다면 오류 전파 현상의 최소화를 통해 순차적 간섭 제거 기법의 검출 성능을 최대화할 수 있다. 간섭 제거 단위가 각 송신 심벌 (예: $t_n(l)$)인 비부호화 (uncoded) 시스템에서는 채널 크기 또는 선형 검출기의 송신 심벌별 출력 SNR (Signal-to-Noise Ratio) 등을 통해 비교적 정확하게 순서 벡터 $\boldsymbol{o}$를 결정할 수 있다. 하지만 채널 부호가 적용된 부호화 (coded) 시스템에서 이러한 비부호화 시스템의 메트릭은 복호 이후 간섭 제거 과정에 사용되는 각 부호어의 오류를 정확하게 예측하지 못한다. 따라서 이러한 순서 결정 방식은 부호어 단위 순차적 간섭 제거 기법에서 성능 저하를 야기할 수 있다. 특히 독립적 레일리 감쇄 (independent Rayleigh fading) 채널 등 각 부호어의 평균 채널 크기 또는 평균 출력 SNR이 유사한 환경에서는 이러한 통상적인 순서 결정 방식의 부정확성이 크게 증가할 수 있다.

이를 해결하기 위해, 본 논문에서는 사전 복호 과정을 통한 간섭 제거 및 복호 순서 결정 방식을 제안한다. 제안 기법에서는 먼저 모든 송신 부호어에 대한 LLR을 계산한 이후 순서 결정을 위한 사전 복호 과정을 모든 부호어들에 대해 진행한다. 이를 통해 경판정 부호어 $\hat{\boldsymbol{c}}_n^{\mathrm{pre}}(1\le n\le N_{\mathrm{T}})$를 얻은 후, 제안 기법은 패리티 검사를 수행하여 신드롬 $\boldsymbol{s}_n^{\mathrm{pre}}$ $(1\le n\le N_{\mathrm{T}})$을 다음과 같이 계산한다.

$$\boldsymbol{s}_n^{\mathrm{pre}}=\hat{\boldsymbol{c}}_n^{\mathrm{pre}}\boldsymbol{H}^T \tag{2}$$

식 (2)에서 $\boldsymbol{H}$는 $(N-K)\times N$ 행렬로 시스템에서 사용된 선형 블록 부호의 패리티 검사 행렬 (parity-check matrix)이다. 이후 각 부호어들의 인덱스를 포함하는 집합 $\boldsymbol{P}=\{1,\cdots,N_{\mathrm{T}}\}$를 정의하여, 제안 기법의 각 $o(n)$은 다음 식 (3) 및 (4)를 $1\le n\le N_{\mathrm{T}}$까지 순차적으로 실행하여 결정된다.

$$o(n)=\left\{k^*|w(\boldsymbol{s}_{k^*}^{\mathrm{pre}})\le w(\boldsymbol{s}_k^{\mathrm{pre}})\,\forall\,k^*,k\in\boldsymbol{P}\right\} \tag{3}$$

www.dbpia.co.kr

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{P} - \{o(n)\} \quad (4)$$

이 때 식 (3)에서 $w(\cdot)$은 신드롬 $\boldsymbol{s}_n^{\mathrm{pre}}$의 무게(weight)를 계산하는 함수이다.

선형 블록 부호에서 복호된 경판정 부호어의 신드롬 무게는 해당 경판정 부호어의 패리티 검사 식의 만족 정도를 나타내므로 각 부호어의 오류 정도를 나타낼 수 있다. 따라서 제안 기법은 사전 복호 과정을 통해 보다 작은 무게의 신드롬을 갖는, 즉 보다 많은 패리티 검사 식을 만족하는 부호어부터 선택되도록 순서 벡터 $\boldsymbol{o}$를 결정한다. 따라서 제안 기법은 복호 결과에서 나타난 신뢰도에 따라 간섭 제거 순서를 결정하여 오류 전파의 가능성을 감소시키고 이를 통해 시스템 성능을 향상시킬 수 있다.

제안 기법에서는 사전 복호 과정에서 각 부호어의 신드롬 결정을 위한 LLR 계산 및 반복 복호 과정에 따른 연산량이 추가적으로 소요된다. 구체적으로, 사전 복호 과정 이후 다른 부호어의 간섭 제거 없이 복호되는 $o(1)$번째 부호어에 대한 LLR 계산 과정은 요구되지 않으므로 최대 $(N_{\mathrm{T}}-1)$개 부호어의 LLR 계산 및 N_{T}개 부호어의 반복 복호에 따른 연산량이 요구된다. 이는 SNR 등을 이용한 통상적인 방식 대비 보다 많은 연산량을 요구할 수 있으나, 사전 복호 과정에서 사용한 반복 복호 횟수만큼 추후 진행되는 순차적인 간섭 제거 과정 및 복호 과정에서의 반복 복호 횟수를 감소시켜 이러한 연산량 증대를 최소화할 수 있다.

Ⅳ. 모의실험 결과

모의실험을 위해 $K=384$ 및 $N=576$인 LDPC (Low-Density Parity-Check) 부호 및 $M=2$인 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 변조를 고려하였다. 채널 환경으로 독립적 레일리 감쇄 채널을 고려하였다. 제안 기법 이외의 수신 기법으로 선형 ZF (Zero-Forcing) 및 MMSE (Minimum Mean-Square-Error) 등 별도의 간섭 제거 과정을 갖지 않는 선형 수신 기법, 순서 결정 과정 없이 안테나 순서대로 간섭 제거를 진행하는 순차적 간섭 제거 기법, 그리고 큰 평균 채널 이득을 갖는 부호어부터 간섭 제거를 진행하는 순차적 간섭 제거 기법을 고려하였다. 각 부호어의 최대 반복 복호 횟수는 100번으로 설정되었다. 이 때 다른 기법들과 동일한 최대 반복 복호 횟수 유지를 위해 제안 기법의 경우 사전 복호 과정 및 이후 과정에서 각각 최대 50번의 반복 복호 횟수를 고려하였다.

그림 1 및 2는 각각 4X4 ($N_{\mathrm{T}}=N_{\mathrm{R}}=4$) 및 8X8 ($N_{\mathrm{T}}=N_{\mathrm{R}}=8$) MIMO 시스템에서 각 기법들의 평균 BLER (Block Error Rate) 성능을 비교하고 있다. 해당 결과로부터 제안 기법의 적용을 통해 순차적 간섭 제거 기법의 오류 성능이 크게 향상됨을 확인할 수 있다. 평균 BLER 10^{-2}을 기준으로 할 때, 제안 기법은 선형 수신기 대비 약 1.3 dB에서 1.8 dB의 SNR 이득을 얻으며, 순서 결정을 하지 않은 방식 대비 약 0.9 dB에서 1.3 dB의 SNR 이득을 얻으며, 채널 이득 기반 방식 대비 약 0.8 dB에서 1.0 dB의

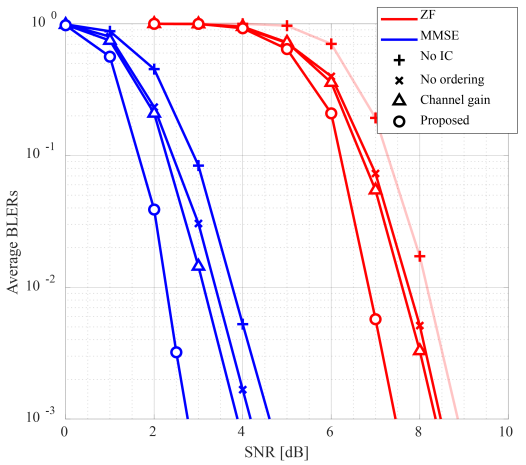

그림 1. 4X4 MIMO 시스템에서의 평균 BLER 성능
Fig. 1. Average BLERs for 4X4 MIMO systems

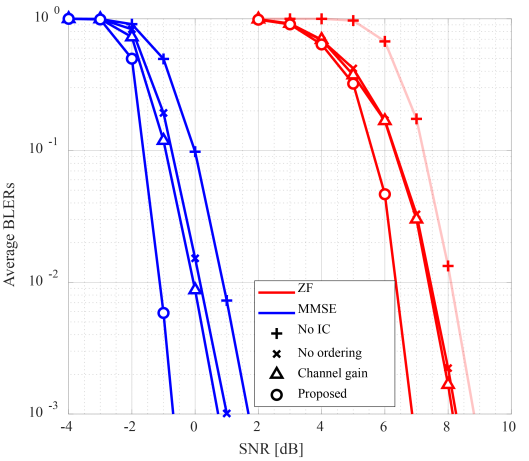

그림 2. 8X8 MIMO 시스템에서의 평균 BLER 성능
Fig. 2. Average BLERs for 8X8 MIMO systems

www.dbpia.co.kr

SNR을 이득을 얻는다. 특히 채널 이득 기반 방식의 경우 순서 결정을 하지 않은 방식 대비 성능 향상이 미약하며, 또한 채널 이득 기반 방식의 선형 수신기 대비 SNR 이득이 제안 기법의 채널 이득 기반 방식 대비 SNR 이득보다도 작거나 유사함을 확인할 수 있다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 독립적 레일리 감쇄 채널 하에서 부호어들의 평균 채널 이득이 유사하여 순서 결정이 성공적으로 이루어지지 않았기 때문이다.

V. 결 론

본 논문에서는 다중 부호어 전송 MIMO 시스템에서 순차적 간섭 제거 기법의 성능 향상을 위해 사전 복호 과정을 이용한 복호 및 간섭 제거 순서 결정 방식을 제안하였다. 모의실험 결과를 통해 제안 기법을 사용할 경우 채널 환경에 관계없이 기존의 순서 결정 방식 대비 시스템의 오류 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서는 사전 복호 과정 이후 경판정 부호어의 신드롬을 이용한 순서 결정 방식을 제시하였으나, 신드롬 이외에 사전 복호 과정의 출력 LLR 크기 등을 이용한 순서 결정 방식도 적용될 수 있다. 또한 본 논문에서는 일반적인 선형 블록 부호의 사용을 가정하였으나, 시스템에 적용된 채널 부호의 종류 및 해당 부호에서의 신뢰도 추정 방식에 따라 다른 순서 결정 방식도 설계될 수 있다. 이러한 연구는 향후 과제로 남는다.

References

[1] S. Bak, 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.

[2] N. Miridakis and D. Vergados, "A survey on the successive interference cancellation performance for single-antenna and multiple-antenna OFDM systems," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.,* vol. 15, no. 1, pp. 312-335, Feb. 2013.

[3] A. Toboso, et al., "Optimal detection ordering for coded V-BLAST," *IEEE Trans. Commun.,* vol. 62, no. 1, pp. 100-111, Jan. 2014.

[4] S. Adnan, et al., "Modified ordered successive interference cancellation MIMO detection using low complexity constellation search," *Int. J. Elec. Commun.,* vol. 121, pp. 153223-153232, Jul. 2020.

www.dbpia.co.kr