

심볼 기반 검출 중단 방식의 저복잡도 MMSE-ISDIC

기 지 연*, 임 아 름*, 팽 대 원*, 박 상 준^o

Low-Complexity MMSE-ISDIC with Symbol Based Detection Stopping Criterion

Jiyeon Ki*, Areum Lim*, Daewon Paeng*,
Sangjoon Park^o

요 약

본 논문에서는 MIMO 시스템의 수신단 반복 연판정 검출 기법인 MMSE-ISDIC의 복잡도 감소를 위한 심볼 기반 검출 중단 방식을 제안한다. 제안 방식은 매 반복 과정에서 각 심볼에 대한 MMSE-ISDIC 검출 과정 종료 후 특정 심볼의 검출 결과의 수렴 여부를 판단하여 다음 반복 과정부터 해당 심볼에 대한 검출 과정을 중단한다. 모의실험 결과 제안 방식이 기존 기법 대비 크게 절감된 복잡도로 그에 근접하는 오류 성능을 달성할 수 있음을 확인하였다.

Key Words : MIMO, MMSE-ISDIC, Stopping Criterion, Threshold, Symbol Detection

ABSTRACT

In this letter, we propose the low complexity MMSE-ISDIC with symbol-based detection stopping criterion for MIMO systems. In the proposed scheme, a detection procedure of a transmit symbol is terminated when the detection result of the symbol is determined to be convergent. Simulation results show that the proposed scheme can significantly reduce the computational complexity of the

conventional MMSE-ISDIC scheme, while the error performance of the proposed scheme is close to that of the conventional scheme.

I. 서 론

MMSE-ISDIC (Minimum Mean-Square-Error Iterative Soft Decision Interference Cancellation) 기법은 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 시스템을 위한 준최적 검출 기법으로 알려져 있다.^[1-3] 이러한 MMSE-ISDIC 기법은 연판정 간섭 제거 및 MMSE 검출을 각 송신 심볼 단위로 반복적으로 진행하는데, 이 때 검출 결과의 변화가 거의 발생하지 않는 송신 심볼에 대한 검출 과정 또한 수신 과정이 종료될 때까지 반복적으로 진행된다.

이렇게 검출 결과의 수렴이 발생한 송신 심볼에 대한 추가적인 검출 동작의 방지를 위해, 본 논문에서는 MMSE-ISDIC 기법을 위한 심볼 기반 검출 중단 방식을 제안한다. 제안 방식은 매 반복 과정에서 각 심볼에 대한 MMSE-ISDIC 검출 과정 종료 후, 특정 심볼의 검출 결과가 수렴되었다고 판단되면 해당 심볼에 대한 검출 과정을 다음 반복 과정부터 수행하지 않는다. 이 때 검출 결과의 수렴 기준은 MMSE-ISDIC 검출 과정 중에 계산되는 심볼 확률을 사용하므로, 제안 기법은 수렴 판단을 위한 추가적인 연산량 없이 MMSE-ISDIC 기법의 복잡도 절감을 수행할 수 있다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 MIMO 시스템 환경으로 송수신 안테나 수가 각각 N 및 M 이라고 가정한다. 본 논문에서는 비부호화 (uncoded) 시스템 환경을 고려하며, 송신단에서는 매 전송 시간마다 $N \times 1$ 송신 신호 벡터 $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_N]^T$ 를 생성하여 전송한다. 이 때 s_n ($1 \leq n \leq N$)은 n 번째 송신 안테나에 할당된 심볼로 변조 지수가 L 인 집합 $\mathbf{A} = \{a_1, \dots, a_Q\}$ 로부터 생성되며, 여기서 $Q = 2^L$ 이다. 이 때 시스템의 입력력 관계식은 다음과 같다.

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

• First Author : Kyonggi University, Department of Electronic Engineering, rlwldus305@naver.com, 학사과정, 학생회원

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

* Kyonggi University, Department of Electronic Engineering, dkfma4915@naver.com, 학사과정, 학생회원; fora22@naver.com, 학사과정
논문번호 : 202105-095-A-LU, Received April 30, 2021; Revised May 24, 2021; May 25, 2021; Accepted May 28, 2021

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

\mathbf{r} 및 \mathbf{n} 은 각각 $M \times 1$ 수신 신호 벡터 및 잡음 벡터를 나타내며, 이 때 \mathbf{n} 의 각 원소들은 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 가우시안 (Gaussian) 분포를 따른다. 또한 \mathbf{H} 는 송수신단 사이의 채널을 나타내는 $M \times N$ 행렬로, 이 때 n 번째 송신 안테나와 수신 안테나들 사이의 채널인 \mathbf{H} 의 n 번째 열은 \mathbf{h}_n 으로 나타낸다.

III. 제안 기법

3.1 기존 MMSE-ISDIC

MMSE-ISDIC 기법의 경우 아래와 같이 매 반복과 정마다 심볼 단위의 반복 연관정 간섭 제거를 적용한 MMSE 검출 과정의 적용을 통해 각 심볼들을 반복적으로 검출한다.^[2] 본 문에서는 서술의 편의상 송신 심볼의 검출 순서가 각 송신 안테나 순이라고 가정한다.

1) 먼저 반복 과정의 시작에 앞서 잔여 간섭분산 벡터 (residual interference variance vector) $\mathbf{v} = [v_1, \dots, v_N]^T$ 의 모든 원소를 1로, 연관정 벡터 (soft decision vector) $\bar{\mathbf{s}} = [\bar{s}_1, \dots, \bar{s}_N]^T$ 의 모든 원소는 0으로 초기화한다. 또한 반복 과정의 수를 나타내는 인덱스 i 및 검출될 송신 심볼의 인덱스 n 을 모두 1로 초기화한다. 마지막으로 최대 반복 과정의 수 $K (\geq 1)$ 을 정한다.

2) 주어진 i 및 n 에 대해 MMSE 필터 $\mathbf{f}_{i,n}$ 및 연관정 간섭 제거 신호 (soft interference-cancelled signal vector) $\mathbf{r}_{i,n}$ 을 다음과 같이 계산한다. 이 때 $\mathbf{D}_{i,n}$ 은 n 번째 대각 원소 1을 제외하고 \mathbf{v} 를 나머지 대각 원소로 갖는 대각 행렬 (diagonal matrix)이며, \mathbf{I}_M 은 $M \times M$ 단위 행렬 (identity matrix)이다.

$$\mathbf{f}_{i,n} = \mathbf{h}_n^H (\mathbf{H}\mathbf{D}_{i,n}\mathbf{H}^H + \sigma^2\mathbf{I}_M)^{-1} \quad (2)$$

$$\mathbf{r}_{i,n} = \mathbf{r} - \sum_{k=1, k \neq n}^N \mathbf{h}_k \bar{s}_k \quad (3)$$

3) $\mathbf{f}_{i,n}$ 및 $\mathbf{r}_{i,n}$ 을 이용하여, s_n 의 검출을 위해 a_q 에 대한 MMSE 필터 매트릭 $\phi_{n,q}$ 및 사후 확률 (posteriori probability) $p_{n,q}$ 을 $1 \leq q \leq Q$ 에 대해 다음과 같이 갱신한다. 이 때 $\mu_{i,n} = \mathbf{f}_{i,n}^H \mathbf{h}_n$ 은 s_n 의 검출을 위한 MMSE 필터의 비어스이다.

$$\phi_{n,q} = -|\mathbf{f}_{i,n}^H \mathbf{r}_{i,n} - \mu_{i,n} a_q|^2 / (\mu_{i,n} (1 - \mu_{i,n})) \quad (4)$$

$$p_{n,q} = \exp(\phi_{n,q}) / \sum_{q=1}^Q \exp(\phi_{n,q}) \quad (5)$$

4) s_n 에 대한 연관정 결과 \bar{s}_n 및 잔여 간섭분산 v_n 을 다음과 같이 갱신한다.

$$\bar{s}_n = \sum_{q=1}^Q a_q p_{n,q} \quad (6)$$

$$v_n = \sum_{q=1}^Q |a_q - \bar{s}_n|^2 p_{n,q} \quad (7)$$

5) 만약 $n < N$ 이라면, $n := n + 1$ 로 증가하고 단계 2)부터 반복한다. 만약 $n = N$ 이라면 단계 6)으로 진행한다.

6) 만약 $i < K$ 라면 $i := i + 1$ 및 $n = 1$ 로 설정하고 단계 2)부터 반복한다. 만약 $i = K$ 라면 검출 과정을 종료하고 $\bar{\mathbf{s}}$ 를 경판정하여 경판정 벡터 $\hat{\mathbf{s}} = [\hat{s}_1, \dots, \hat{s}_N]^T$ 를 얻는다.

3.2 제안 MMSE-ISDIC

앞서 설명과 같이 기존 MMSE-ISDIC 기법에서는 주어진 반복 과정이 종료할 때까지 식 (2)-(7)의 연관정 간섭 제거 및 MMSE 검출 과정을 각 송신 심볼 단위로 반복 진행한다. 이 때 검출 과정 중 심볼 검출 결과의 신뢰도가 높게 계산된 경우 검출 과정을 통해 경판정 결과 \hat{s}_n 가 달라질 확률은 낮아진다. 즉, 임의의 a_q 에 대한 사후 확률 $p_{n,q}$ 가 1에 가까울수록 검출 결과가 수렴되었다고 판단할 수 있다.

이러한 MMSE-ISDIC 검출 과정의 특성을 이용하여, 제안 기법에서는 i 번째 반복 과정에서 계산된 $p_{n,q}$ 중 최댓값이 시스템에서 정해진 문턱값 (threshold) $\epsilon (0 < \epsilon < 1)$ 이상일 경우 향후 $(i + 1)$ 번째 반복 과정부터 s_n 에 대한 검출 과정을 중단한다. 이를 위해 제안 기법은 기존 기법의 단계 1) 및 2)를 다음과 같이 변경하여 진행한다.

1) 기존 단계 1) 수행 이후 추가적으로 모든 $n (1 \leq n \leq N)$ 및 $q (1 \leq q \leq Q)$ 에 대해 사전 정보 (a priori information)가 존재하지 않음을 가정하여 $p_{n,q} = 1/Q$ 로 초기화한다. 또한, 현재 반복 과정에서 s_n 에 대한 검출 진행 여부를 나타내는 값 c_n

$(1 \leq n \leq N)$ 을 모두 1로 초기화 한다.

2) 기존 단계 2) 수행에 앞서, 만약 $\max_q(p_{n,q}) \geq \epsilon$ 라면 검출 결과의 수렴이 발생한 것으로 판단하여 $c_n = 0$ 으로 설정한 후 식 (2)-(7)의 과정을 생략한 후 단계 5)로 진행한다. 만약 $\max_q(p_{n,q}) < \epsilon$ 라면 검출 결과가 수렴되지 않은 것으로 판단하여 $c_n = 1$ 로 두고 기존 단계 2)부터 수행한다.

표 1에는 이러한 제안 기법의 진행 과정을 요약하여 나타내고 있다. 이와 같이 제안 기법은 수렴이 발생한 것으로 판단한 심볼들에 대한 검출 과정 생략을 통해 MMSE-ISDIC의 복잡도를 크게 낮출 수 있다. 제안 기법에서 사용하는 문턱값 ϵ 은 사전 정보가 없는 경우의 심볼 확률인 $1/Q$ 이상으로 설정되어야 한다. 이 때 문턱값 ϵ 이 낮을수록 조기에 수렴 여부를 판단할 수 있으므로 보다 많은 복잡도 절감이 가능하며, 반면 ϵ 가 높을수록 조기 수렴 판단에 따른 오류 가능성을 최소화하여 오류 성능의 열화를 최소화할 수 있다. 또한 통상적으로 각 심볼들의 해당 확률 값은 수신 SNR (Signal-to-Noise Ratio)이 클수록 작은 수의 반복 과정에서 더욱 큰 값을 가질 수 있으므로, 제안 기법은 수신 SNR이 높을수록 오류 성능의 열화를 최소화함과 함께 조기 검출 과정 종료율 유도하여 보

다 많은 복잡도를 절감할 수 있다.

IV. 모의실험 결과

모의실험의 송신단에서는 $Q=4$ 인 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 변조 기법을 고려하였으며, 채널 환경으로는 레일리 (Rayleigh) 채널을 고려하였다. 각 MMSE-ISDIC 기법에서는 순시 SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio)에 따른 검출 순서를 적용하였으며, $K=5$ 이다.

그림 1에서는 $N=M=8$ 및 $N=M=16$ 일 때 기존 기법 대비 제안 기법의 복잡도 비율을 나타내고 있으며, 이 때 복잡도 비율은 기존 기법에서의 심볼 검출 과정 수(=NK)와 제안 기법에서 수행한 평균 심볼 검출 과정 수의 비로 계산되었다. 앞서 분석된 바와 같이, 그림 1을 통해 문턱값 ϵ 이 낮을수록 또는 SNR이 높을수록 보다 높은 복잡도 절감 효과를 지닐 수 있음을 확인할 수 있다. 특히 High SNR 영역에서는 ϵ 에 상관없이 제안 기법은 기존 기법 대비 약 20%의 검출 과정만을 수행하며, 이는 SNR이 높을 경우 MMSE-ISDIC 기법의 첫 번째 반복 과정을 마친 후 대부분의 검출 심볼의 $\max_q(p_{n,q})$ 이 ϵ 이상으로 나타났기 때문이다.

그림 2에서는 $N=M=8$ 및 $N=M=16$ 일 때 기존 기법 및 제안 기법의 평균 BER (Bit Error Ratio)을 비교하고 있다. 역시 앞서 분석된 바와 같이, 문턱값 ϵ 이 클수록 제안 기법에서 기존 기법 대비 오류 성능의 열화가 거의 발생하지 않은 것을 확인할 수 있다. 특히 $\epsilon=0.99$ 인 경우에는 $N=M=8$ 및

표 1. 제안 기법의 의사 코드
Table 1. Pseudo code of the proposed scheme.

<p>Input: $\mathbf{H}, \mathbf{r}, K, \epsilon$</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Initialization: Set $\bar{\mathbf{s}}$ and \mathbf{v} as the all-zero and all-one vectors, respectively. Set $p_{n,q} = 1/Q$ for all $1 \leq n \leq N$ and $1 \leq q \leq Q$. Finally, set $c_n = 1$ for $1 \leq n \leq N$. 2. for $i = 1$ to K, do 3. for $n = 1$ to N, do 4. Set $c_n = 0$ if $\max_q(p_{n,q}) \geq \epsilon$. 5. if $c_n = 1$, do 6. Calculate $\mathbf{f}_{i,n}$ in (2) and $\mathbf{r}_{i,n}$ in (3). 7. for $q = 1$ to Q, do 8. Calculate $\phi_{n,q}$ in (4) and $p_{n,q}$ in (5). 9. end for 10. Calculate $\bar{\mathbf{s}}_n$ in (6) and \mathbf{v}_n in (7). 11. end if 12. end for 13. end for 14. Calculate $\hat{\mathbf{s}}$.
--

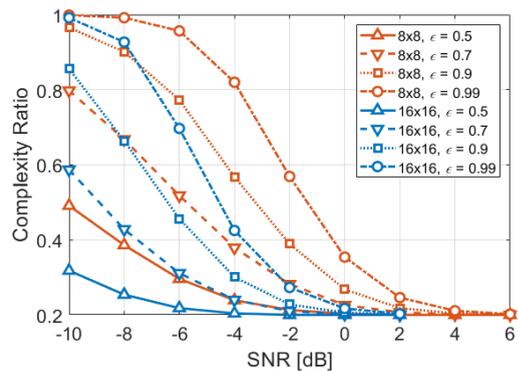


그림 1. 제안 MMSE-ISDIC 기법의 기존 기법 대비 복잡도 비율
Fig. 1. Complexity ratio of the proposed MMSE-ISDIC scheme compared to the conventional MMSE-ISDIC scheme

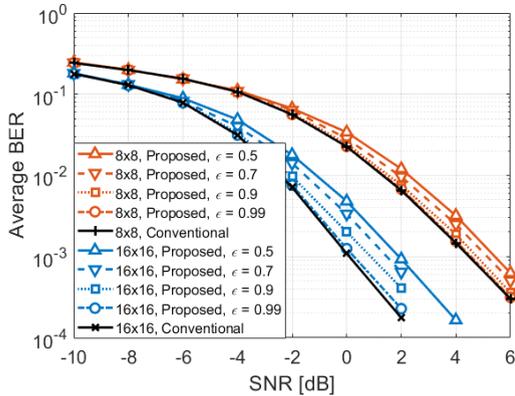


그림 2. 기존 및 제안 MMSE-ISDIC 기법의 평균 BER
 Fig. 2. Average BERs of the conventional and proposed MMSE-ISDIC schemes

$N=M=16$ 의 두 시스템 모두에서 제안 기법이 기존 기법과 거의 동일한 평균 BER을 달성함을 확인할 수 있다. 그림 1에서 확인한 바와 같이 높은 ϵ 을 갖더라도 SNR이 높은 경우 많은 복잡도를 절감할 수 있을 것을 고려할 때, 제안 MMSE-ISDIC 기법이 오류 성능의 열화를 최소화하며 기존 기법의 복잡도를 크게 감소하는 효율적인 준최적 MIMO 검출 기법임을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 MIMO 시스템을 위해 심볼 기반 검출 중단 방식을 적용한 저복잡도의 MMSE-ISDIC 검출 기법을 제안하였다. 제안 기법에서는 검출 과정에서 계산된 심볼 확률을 통해 각 송신 심볼의 검출 과정에서의 수렴 여부를 판단하였으며, 그를 바탕으로 복잡도를 크게 절감하는 동시에 기존 MMSE-ISDIC에 근접하는 오류 성능을 달성할 수 있음을 확인하였다. 이 때 제안 기법에서의 문턱값은 SNR 및 MIMO 시스템의 크기, 송신 심볼의 검출 순서, 순시 채널 상태 등에 따라 최적화될 수 있다. 또한 부호화 시스템에서 긴 길이의 부호어에 대한 복호 과정을 고려한 심볼 단위 중단 방식의 확장 및 분석이 필요하다. 이에 대한 연구는 향후 과제로 남는다.

References

- [1] S. Yang and L. Hanzo, "Fifty years of MIMO detection: the road to large-scale MIMO," *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 17, no. 4, pp. 1941-1988, Sep. 2015.
- [2] F. Cao, et al., "On the relation between PDA and MMSE-ISDIC," *IEEE Sign. Process. Lett.*, vol. 14, no. 9, pp. 597-600, Sep. 2007.
- [3] S. Park and S. Choi, "An MMSE based iterative soft decision interference cancellation scheme for massive MIMO systems," *J. KICS*, vol. 39, no. 9, pp. 566-568, Sep. 2014.