

MIMO 시스템을 위한 Gauss-Seidel 근사화 기반 정적 OSIC 기법

박 상 준*

Gauss-Seidel Approximation Based Static OSIC Scheme for MIMO Systems

Sangjoon Park*

요 약

본 논문에서는 MIMO 시스템을 위해 Gauss-Seidel 근사화에 기반을 둔 LMMSE 검출 기반 정적 OSIC 기법을 제안한다. 제안 OSIC 기법에서는 초기화 과정에서 Gauss-Seidel 근사화를 이용하여 얻어진 송신 심볼들의 후처리 SINR 계산 결과에 따라 전체 검출 과정에서의 간섭제거 순서를 결정한다. 이러한 제안 기법은 기존의 채널 이득 기반 정적 OSIC 기법과 동일한 연산 복잡도 차수를 통해 보다 정확한 간섭제거 순서를 결정할 수 있다. 모의실험 결과 제안 OSIC 기법이 유사한 복잡도를 갖는 채널 이득 기반 정적 OSIC 기법 대비 안테나 환경에 관계없이 보다 우수한 오류 성능을 달성함을 확인하였다.

Key Words : MIMO, OSIC, Post-Processing SINR, LMMSE, Gauss-Seidel Approximation

ABSTRACT

In this letter, an LMMSE-based static OSIC scheme using the Gauss-Seidel approximation is proposed for MIMO systems. In the proposed scheme, the IC order of the transmit symbols during the entire OSIC process is determined by the post-processing SINR calculated at the initialization

procedure using the Gauss-Seidel approximation. Therefore, compared with the conventional channel gain based static OSIC scheme, the proposed scheme offers a more accurate ordering results at the identical computational complexity order. Simulation results verify that the proposed scheme outperforms the conventional channel gain based static OSIC scheme regardless of the antenna configuration.

I. 서 론

송신 심볼들 간 순차적인 검출 및 간섭제거 과정을 반복하여 진행하는 SIC (Successive Interference Cancellation) 기법은 복수의 심볼들이 동시에 전송되는 공간다중화 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 시스템에서 선형 검출기 대비 크게 우수한 오류 성능을 거둘 수 있다.^[1-5] 이 때 채널 이득 또는 후처리 SINR (Post-Processing Signal To Interference Plus Noise Ratio) 등에 기반을 둔 간섭제거 순서가 도입된 OSIC (Ordered SIC) 기법은 SIC 방식의 검출 성능을 크게 향상시킬 수 있다.

통상적인 동적 OSIC 기법은 매 검출 및 간섭제거 단계에서 남아있는 미검출 심볼들의 후처리 SINR을 계산하여 가장 큰 후처리 SINR을 갖는 심볼에 대한 검출 및 간섭제거를 진행한다. 이러한 후처리 SINR에 기반을 두고 매 단계별로 동적으로 간섭제거 순서를 결정하는 OSIC 기법은 우수한 검출 성능을 달성할 수 있는 반면, 모든 검출 및 간섭제거 단계에서 후처리 SINR을 계산해야 하므로 안테나 수 증가에 따라 크게 높은 복잡도를 요구할 수 있다.^[1] 한편 각 송신 심볼의 채널 이득에 기반을 둔 OSIC 기법의 경우 간섭제거 과정 이전 각 심볼들의 간섭제거 순서를 초기화 단계에서 사전에 결정하여 후처리 SINR 기반 동적 OSIC 기법 대비 크게 낮은 복잡도를 요구하지만, OSIC 적용에 따른 성능 향상은 상대적으로 제한될 수 있다.

이에 본 논문에서는 LMMSE (Linear Minimum Mean-Square-Error) 검출 기반 OSIC 기법을 위해, Gauss-Seidel 근사화에 기반을 둔 정적 OSIC 기법을 제안한다. Gauss-Seidel 근사화는 대규모 MIMO 시스템에서 LMMSE 검출기의 복잡도를 낮추기 위해 주로 연구되었으며,^[6] 본 연구에서는 이를 LMMSE 검

* 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 : 202207-149-A-LU, Received July 25, 2022; Revised July 26, 2022; Accepted July 26, 2022

출 기반 OSIC 기법의 간섭제거 순서 결정에만 활용한다. 즉, 제안 기법에서는 초기화 과정에서 채널 이득 대신 간섭제거가 이루어지지 않은 초기화 과정에서의 각 송신 심볼들의 후처리 SINR을 Gauss-Seidel 근사화를 통해 계산하여, 이를 바탕으로 간섭제거 순서를 사전에 결정한다. 이를 통해 제안 기법은 유사한 수준의 복잡도를 요구하는 기존의 채널 이득 기반 정적 OSIC 기법 대비 보다 정확한 간섭제거 순서 결정을 통해 오류 전파 (error propagation)의 가능성을 감소시켜 오류 성능 향상을 도모할 수 있다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 송수신단 안테나의 수가 각각 N 및 M 인 공간 다중화 MIMO 시스템을 고려한다. 송신단에서는 변조 및 공간 다중화 과정을 거쳐 N 개의 송신 심볼을 포함하는 송신 신호 벡터 $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_N]^T$ 를 송신하며, 이 때 각 송신 심볼의 평균 전력은 1이다. 따라서 수신단에서의 수신 신호 벡터 $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_M]^T$ 및 \mathbf{x} 와의 관계식은 다음과 같이 나타난다.

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

이 때 \mathbf{H} 는 송수신 안테나 사이의 채널 응답을 나타내는 $M \times N$ 채널 행렬이며 \mathbf{n} 은 $M \times 1$ 잡음 벡터로 각 원소들은 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 i.i.d.한 가우시안 (Gaussian) 분포를 따른다. 따라서 이 때 수신단에서의 평균 SNR (Signal To Noise Ratio)는 $1/\sigma^2$ 으로 정의된다.

III. 제안 Gauss-Seidel 근사화 기반 정적 OSIC 기법

기존의 채널 이득 기반 정적 OSIC 기법은 다음과 같이 동작한다. 총 N 개의 심볼이 전송되었으므로 검출 및 간섭 제거 단계는 총 N 번 수행된다. N 개의 심볼들에 대한 검출 및 간섭 제거 단계는 초기화 과정에서 결정되며, 초기화 과정에서는 다음 식을 통해 각 심볼들에 대한 채널 이득을 결정한다.^[1-3]

$$f_k^{\text{CV}} = [\mathbf{H}^H \mathbf{H}]_k \quad (2)$$

식 (2)에서 f_k^{CV} 는 k 번째 심볼의 채널 이득값을 나타내며, $[\mathbf{A}]_k$ 은 행렬 \mathbf{A} 의 k 번째 대각 원소를 나타내

다. 따라서 기존 채널 이득 기반 정적 OSIC 기법은 n 번째 단계에의 심볼을 다음과 같이 선택한다.

$$k^* = \operatorname{argmax}_{k \in \mathbf{G}_n} f_k^{\text{CV}} \quad (3)$$

이 때 \mathbf{G}_n 은 n 번째 단계를 수행하기 이전 잔여 송신 심볼들의 인덱스들의 집합으로 $\mathbf{G}_1 = \{1, \dots, N\}$ 이며 \mathbf{G}_{n+1} 은 \mathbf{G}_n 에서 n' 번째 단계에서 선택된 심볼을 제외하여 구성된다. 또한 식 (3)의 k^* 는 본래 채널인 \mathbf{H} 에서의 송신 심볼의 인덱스를 나타낸다. 선택된 k^* 에 대해 유효 채널 행렬을 이용하여 검출 및 간섭제거 과정을 수행하며, 이를 $n = 1$ 부터 $n = N$ 까지 반복하여 수신 과정을 종료한다.

이러한 채널 이득 기반 정적 OSIC 기법은 후처리 SINR 기반 동적 OSIC 기법과 달리 매 검출 및 간섭제거 단계에서의 추가적인 계산을 필요로 하지 않아 연산 복잡도를 크게 절감할 수 있다. 하지만 간섭 및 잡음 성분의 고려가 수행되지 않아 OSIC 도입에 따른 SIC 대비 성능 향상은 상대적으로 제한된다.

이러한 채널 이득 기반 정적 OSIC 기법의 성능 향상을 위해, 제안 기법에서는 초기화 과정에서 각 심볼들의 후처리 SINR을 Gauss-Seidel 근사화를 통해 계산하는 정적 OSIC 기법을 제안한다. Gauss-Seidel 근사화는 역행렬 계산을 위해 적용되며, 해당 근사화를 적용했을 때 k 번째 송신 심볼의 후처리 SINR f_k^{PR} 은 Hermitian 행렬의 Diagonal-Dominant 특성을 가정할 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[6]

$$f_k^{\text{PR}} = E_{kk}^2 / \left(\sum_{n \neq k} E_{nk} + U_{kk} \sigma^2 \right) \quad (4)$$

식 (4)에서 E_{nk} 는 행렬 $\mathbf{D}^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{H}$ 의 n 번째 행 및 k 번째 열에 위치한 원소를 나타내며, U_{kk} 는 행렬 $\mathbf{D}^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{D}^{-1}$ 의 k 번째 대각 원소를 나타내며, \mathbf{D} 는 $\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \sigma^2 \mathbf{I}_N$ 의 대각 원소들만을 포함하는 대각 행렬을 나타낸다. 이러한 Gauss-Seidel 근사화를 적용하여 계산된 초기 후처리 SINR 값을 이용하여, 각 n 번째 단계에서 검출 및 간섭제거 과정을 거칠 심볼을 다음과 같이 선택할 수 있다.

$$k^* = \operatorname{argmax}_{k \in \mathbf{G}_n} f_k^{\text{PR}} \quad (5)$$

즉, 제안 기법에서는 Gauss-Seidel 근사화를 가정

한 초기 후처리 SINR의 계산을 통해 송신 심볼들의 검출 및 간섭제거 순서를 결정하여, 채널 이득 기반 순서 결정 대비 보다 정확한 검출 및 간섭제거 순서 결정을 수행할 수 있다. 여기서 구체적인 연산량 이득을 확인하기 위해 기존 기법 및 제안 기법의 연산 복잡도 차수를 비교한다. 기존 채널 이득 기반 정적 OSIC 기법의 경우 $\mathbf{H}^H\mathbf{H}$ 의 계산을 위해 $O(MN^2)$ 의 연산 복잡도 차수를 갖는다. 한편, 제안 기법의 경우 행렬 $\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}^H\mathbf{H}$ 의 전체 원소를 계산해야 하며, 또한 $\mathbf{D}^{-1}\mathbf{H}^H\mathbf{H}\mathbf{D}^{-1}$ 의 대각 원소들을 계산하여야 한다. 즉, 제안 기법의 경우 대각 행렬의 곱셈을 추가적으로 수행하여야 하여 기존 채널 이득 기반 정적 OSIC 기법 대비 추가적인 연산량을 요구할 수 있다. 하지만, 연산 복잡도 차수 측면에서는 \mathbf{D} 가 대각 행렬이므로 제안 기법은 $O(MN^2)$ 로 채널 이득 기반 정적 OSIC 기법과 동일한 연산 복잡도 차수를 갖는다. 따라서 연산 복잡도 측면에서 기존 기법 및 제안 기법은 동일한 수준의 연산량을 요구하는 것으로 여겨질 수 있다.

IV. 모의실험 결과 및 결론

그림 1 및 2에서는 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 변조 및 독립적 레일리 감쇄 채널 하에서 선형 수신기, 순서 결정을 적용하지 않은 SIC, 채널 이득 기반 정적 OSIC, 그리고 제안 OSIC 기법의 평균 BER (Bit Error Rate) 성능을 비교하였다. 이 때 그림 1에서는 $N=M=8$ 및 $N=M=16$ 인 소규모 MIMO 시스템을, 그림 2에서는 $N=M=64$ 및 $N=M=128$ 인 대규모 MIMO 시스템을 고려하였다.

그림 1 및 2에서 나타나는 것처럼 제안 기법 및 채널 이득 기반 정적 OSIC 기법은 간섭제거가 없는 선형 검출기 및 검출 순서를 임의대로 정하는 SIC 기법 대비 크게 우수한 오류 성능을 달성함을 확인할 수 있다. 한편 제안 기법은 기존의 채널 이득 기반 정적 OSIC 기법 대비 소규모 MIMO 시스템에서는 BER 10^{-4} 을 기준으로 약 3~4 dB 내외의 SNR 이득을, 대규모 MIMO 시스템에서는 약 0.5~1 dB 내외의 SNR 이득을 달성함을 확인할 수 있다. 이는 Gauss-Seidel 근사화를 적용한 제안 방식이 특히 소규모 MIMO 시스템에서 채널 이득에 기반을 둔 순서 결정 방식 대비 보다 정확한 검출 및 간섭제거 순서 결정이 가능함을 나타내고 있으며, 대규모 MIMO 시스템에서는 Channel Hardening 현상으로 채널 이득 기반 순서 결정 방식의 정확도가 향상될 수 있음을 나타낸다. 하지

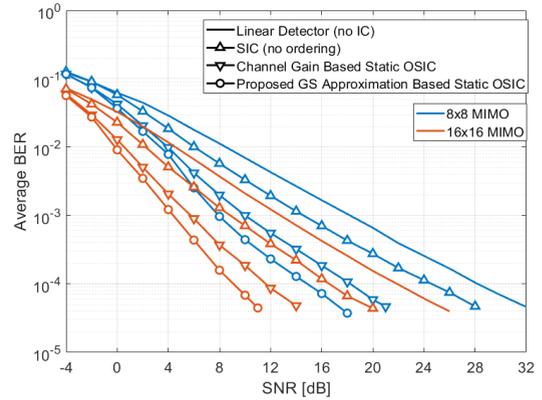


그림 1. 소규모 MIMO 시스템에서의 평균 BER
Fig. 1. Average BERs for small MIMO systems

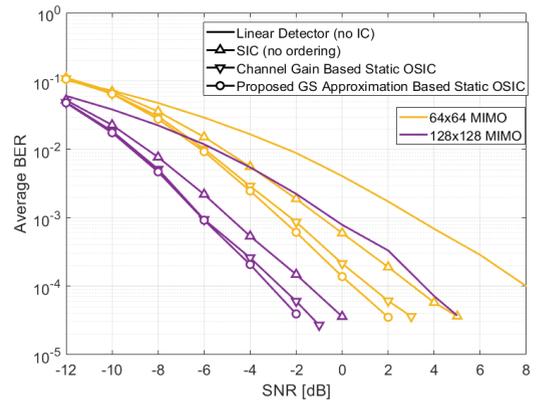


그림 2. 대규모 MIMO 시스템에서의 평균 BER
Fig. 2. Average BERs for massive MIMO systems

만 제안 기법은 안테나 환경에 관계없이 채널 이득 기반 정적 OSIC 기법 대비 항상 우수한 오류성능을 달성하며, 유사한 수준의 연산 복잡도를 요구함을 감안할 때 제안 기법이 효율적인 정적 OSIC 기법으로 활용될 수 있음을 확인할 수 있다.

이러한 제안 기법은 시스템 안테나의 수가 크게 증가할 경우 여전히 높은 복잡도를 요구할 수 있다. 이에 정적 OSIC 기법의 순서 결정 과정에서의 연산량 절감을 위한 새로운 메트릭에 대한 연구가 추가적으로 필요하다. 또한 간섭 증가에 따라 시스템 성능이 전반적으로 감소하는 경우 또는 하이브리드 빔포밍이 적용된 경우 등 다양한 채널 및 시스템 상황에 따라 제안 기법의 성능 도출 및 분석이 요구된다. 이는 향후 과제로 남는다.

References

- [1] A. Paulraj, et al., *An Introduction to Space-Time Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2003.
- [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. (<https://doi.org/10.1109/SURV.2012.030512.00103>)
- [3] S. Yang and L. Hanzo, "Fifty years of MIMO detection: The road to large-scale MIMOs," *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 17, no. 4, pp. 1941-1988, Oct. 2015. (<https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2475242>)
- [4] X. Jin, "Successive interference cancellation on zero-forcing receiver in two-hop relay channel," *J. KICS*, vol. 42, no. 10, pp. 1947-1950, Oct. 2017. (<https://doi.org/10.7840/kics.2017.42.10.1947>)
- [5] H. Hijazi, et al., "Near-optimal performance with low-complexity ML-based detector for MIMO spatial multiplexing," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 25, no. 1, pp. 122-126, Jan. 2021. (<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3024107>)
- [6] L. Dai, et al., "Low-complexity soft-output signal detection based on Gauss-Seidel method for uplink multiuser large-scale MIMO systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 10, pp. 4839-4845, Oct. 2015. (<https://doi.org/10.1109/TVT.2014.2370106>)