

심벌간 간섭을 갖는 대규모 MIMO 시스템을 위한 칼만 필터 및 스무더 기반 반복 등화기

박 상 준[°]

Kalman Filter and Smoother Based Iterative Equalizer for Massive MIMO Systems with Intersymbol Interference

Sangjoon Park[°]

요 약

본 논문은 심벌간 간섭을 갖는 대규모 MIMO 시스템을 위한 저복잡도 칼만 필터 및 스무더 기반 반복 등화기를 제안한다. 제안 등화기는 매 Iteration마다 각 송신 심벌 벡터 단위로 단 한 번의 칼만 필터 및 스무더 연산을 수행하여 기존 칼만 필터 및 스무더 기반 반복 등화기 대비 연산량을 크게 낮추었다. 모의실험 결과 제안 기법은 기존 기법 대비 크게 낮은 복잡도로 그에 근접하는 BER 성능을 달성할 수 있음을 확인하였다.

Key Words : Massive MIMO, Kalman Filter, Kalman Smoother, ISI, Iterative Equalizer

ABSTRACT

This letter proposes a low-complexity Kalman filter and smoother based iterative equalizer for massive MIMO systems with intersymbol interference. The proposed equalizer performs one Kalman filter and one Kalman smoother operations for each transmit symbol per iteration, which leads a significantly lower computational complexity compared to the conventional Kalman filter and smoother based iterative equalizer. Simulation results confirm that the proposed equalizer can achieve a

BER performance close to that of the conventional equalizer with significantly lower computational complexity.

I. 서 론

무선 통신 채널에서 빈번하게 발생하는 심벌간 간섭 (Intersymbol Interference) 현상은 간섭 성분의 증가를 통해 수신 신호의 신뢰도를 크게 저하시킬 수 있으며, 따라서 심벌간 간섭을 갖는 통신 시스템의 오류 성능 확보를 위해 다양한 준최적 등화기가 제안되어 왔다.^[1-4] 칼만 필터 및 스무더 기반 반복 등화기는 최적의 성능을 보이는 MLSE (Maximum Likelihood Sequence Estimation) 및 MAP (Maximum A Posteriori) 등화기 또는 기타 준최적 등화기 대비 상대적으로 낮은 연산량을 통해 준최적 BER (Bit Error Rate, 비트오율) 성능을 달성할 수 있는 것으로 알려져 있다.^[4] 하지만 기존의 칼만 필터 및 스무더 기반 반복 등화기는 매 Iteration 마다 개별 심벌들을 위한 칼만 필터 및 스무더 과정을 별도 진행한다. 칼만 필터 및 스무더 과정에서 채널 행렬들로 구성된 상태 행렬들의 곱 및 역행렬 계산들이 이루어짐을 고려할 때, 기존 기법은 송수신단에서 대규모의 입출력이 적용되는 대규모 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 시스템에서 수신단 복잡도로 인한 문제를 야기할 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 심벌간 간섭을 갖는 대규모 MIMO 시스템을 위한 저복잡도의 칼만 필터 및 스무더 기반 반복 등화기를 제안한다. 제안 기법에서는 매 Iteration 마다 각 송신 심벌 벡터 단위로 단 한 번의 칼만 필터 및 스무더 동작을 수행하여 등화 과정을 마무리하며, 이를 통해 제안 기법은 대규모 MIMO 시스템에서 기존 기법 대비 연산량을 크게 감소시킬 수 있다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 입력 및 출력의 수가 각각 N 및 M 이며 채널 탭 수가 L 인 대규모 MIMO 시스템을 고려한다. $\mathbf{s}_k = [s_k(1), \dots, s_k(N)]^T$ 는 $N \times N$ 단위행렬

※ 이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2016R1D1A1B03934546)

•° First and Corresponding Author : Wonkwang University, Department of Information and Communication Engineering, sjpark24@wku.ac.kr, 정희원

논문번호 : KICS2017-11-334, Received November 6, 2017; Revised December 18, 2017; Accepted December 22, 2017

I_N 에 대해 $E[\mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^H] = I_N$ 을 만족하는 $k(1 \leq k \leq K)$ 번째 송신 신호 벡터로, 이 때 $k(1 \leq k \leq K+L-1)$ 번째 수신 신호 벡터 $\mathbf{y}_k = [y_k(1), \dots, y_k(M)]^T$ 는 다음과 같이 나타난다.

$$\mathbf{y}_k = \sum_{l=0}^{L-1} \mathbf{H}_k^l \mathbf{s}_{k-l} + \mathbf{n}_k \quad (1)$$

식 (1)에서 \mathbf{n}_k 는 $M \times 1$ 잡음 벡터로 각 원소들은 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 i.i.d. 순환 대칭 복소 가우시안 분포를 따른다. \mathbf{H}_k^l 은 $l(1 \leq l \leq L)$ 번째 탭의 채널 응답을 나타내는 $M \times N$ 행렬이다. 이 때 k 번째 시간에서의 채널 응답들이 단위 에너지를 갖는 환경을 가정하며, 따라서 평균 SNR (Signal-to-Noise Ratio)은 $1/\sigma^2$ 로 정의될 수 있다.

III. 제안 저복잡도 칼만 필터 및 스무더 기반 반복 등화기

본문에서는 기존 준최적 칼만 필터 및 스무더 기반 반복 등화기와 동일한 상태 공간 모델 (State-Space Model)의 사용을 가정한다.^[4] 이 때 칼만 필터 및 스무더의 동작을 각각의 입출력을 통해 아래 식 (2) 및 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\hat{\mathbf{x}}_{a|a}, \mathbf{P}_{a|a}\} = \text{KF}(\{\hat{\mathbf{x}}_{a-1|a-1}, \mathbf{P}_{a-1|a-1}\}, \{\bar{\mathbf{s}}_a, \mathbf{v}_a\}) \quad (2)$$

$$\{\hat{\mathbf{x}}_{a|b}\} = \text{KS}(\hat{\mathbf{x}}_{a+1|b}, \{\hat{\mathbf{x}}_{a|a}, \mathbf{P}_{a|a}\}) \quad (3)$$

여기서 $\hat{\mathbf{x}}_{a|b}$ 는 \mathbf{y}_b 까지의 수신 신호 벡터를 이용한 상태 벡터 $\mathbf{x}_a = [\mathbf{s}_a^T \dots \mathbf{s}_{a-L+1}^T]^T$ 에 대한 추정치를 나타내며, $\mathbf{P}_{a|b}$ 는 그에 대한 오류 공분산 행렬을 나타낸다. 또한 $\bar{\mathbf{s}}_k$ 및 \mathbf{v}_k 는 각각 사전 정보(A Priori Information)를 통해 얻어진 \mathbf{s}_k 의 각 원소들의 평균 및 분산을 포함하는 벡터이다.

기존 기법의 경우 각 \mathbf{s}_k 의 n 번째 원소 $s_k(n)$ 에 대한 등화 과정에서 해당 심벌에 대한 사전 정보만을 제거한 채로 칼만 필터 및 스무더 과정을 각각 F 번 및 S 번 진행한 후 $s_k(n)$ 에 대한 사전 정보를 갱신하여 $s_k(n)$ 의 등화 과정을 종료한다. 이러한 방식으로 전송 블록 내의 모든 송신 심벌들에 대한 등화 과정을 순차적으로 진행하여 한 번의 Iteration을 마치게 된다.

이렇게 특정 심벌의 등화 과정에서 해당 심벌의 사전 정보를 제외하는 방식은 터보 원리를 이용한 연관성 반복 등화 방식으로 일반 MIMO 환경에서도 준최적 BER 달성이 가능하지만, 모든 송신 심벌들에 대한 복수의 칼만 필터 및 스무더 과정의 수행을 요구하여 특히 대규모 MIMO 시스템에서 매우 높은 연산량을 요구하게 된다.

이러한 기존 기법의 연산량 문제 개선을 위해 본문에서는 저복잡도 칼만 필터 및 스무더 기반 반복 등화기를 제안한다. 먼저 제안 기법의 매 Iteration에서는 순차적인 칼만 필터 과정을 다음과 같이 $k=1$ 부터 $k=K+L-1$ 까지 진행한다.

$$\{\hat{\mathbf{x}}_{k|k}, \mathbf{P}_{k|k}\} = \text{KF}(\{\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{P}_{k-1|k-1}\}, \{\bar{\mathbf{s}}_k, \mathbf{v}_k\}) \quad (4)$$

식 (4)가 종료된 이후에는 해당 출력들을 이용하여 순차적인 칼만 스무더 과정을 다음과 같이 $k=K+L-2$ 부터 $k=1$ 까지 진행한다.

$$\{\hat{\mathbf{x}}_{k|K+L-1}\} = \text{KS}(\hat{\mathbf{x}}_{k+1|K+L-1}, \{\hat{\mathbf{x}}_{k|k}, \mathbf{P}_{k|k}\}) \quad (5)$$

마지막으로, 제안 기법은 식 (5)에서 얻은 $\hat{\mathbf{x}}_{k|K+L-1}$ 을 이용하여 모든 k 에 대해 $\bar{\mathbf{s}}_k$ 및 \mathbf{v}_k 을 갱신하여 해당 Iteration의 등화 과정을 종료한다.

검출 성능의 측면에서 살펴볼 때, 기존 기법은 특정 송신 심벌의 등화 과정에서 해당 송신 심벌의 사전 정보 사용을 예방하는 반면, 제안 기법은 매 Iteration마다 모든 사전 정보를 활용한다. 따라서 제안 기법은 기존 기법 대비 특히 Iteration 수가 작을 경우 성능 열화가 발생할 수 있다.^[4] 하지만, 기존 기법의 경우 이를 위해 전송 블록 내의 모든 NK 심벌에 대해 각각 F 번 및 S 번의 칼만 필터 및 스무더 과정을 진행하여 매 Iteration 별로 총 NKF 및 NKS 번의 칼만 필터 및 스무더 과정을 진행하는 반면, 제안 기법은 매 Iteration 별로 각각 $(K+L-1)$ 번 및 $(K+L-2)$ 번의 칼만 필터 및 스무더 과정만을 진행한다. 따라서, $K \gg L$ 을 고려할 때, 제안 기법은 기존 기법 대비 약 $1/N$ 이하의 연산량만을 필요로 하며, 이를 통해 입력 N 이 커지는 대규모 MIMO 시스템에서 기존 기법 대비 수신단 복잡도를 크게 낮출 수 있다.

IV. 모의실험 결과

모의실험을 위해 $L=3$ 이며 각 채널 탭들이 균등

전력 프로파일 (Uniform Power Profile) 및 각 시간별 고정된 채널 응답을 갖는 블록 레일리 (Block Rayleigh) 환경을 고려하였다. 또한 $K=20$, QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 변조를 고려하였으며, 기존 기법에서 $F=5$ 및 $S=2$ 로 설정되었다. 제안 기법 및 기존 기법 모두 Iteration 종료 후 비트 오류가 검출되지 않을 시 추가 Iteration의 수행을 중단하는 조기 종료 방식을 적용하였다. 또한 대조군의 하나로 LLR (Log-Likelihood Ratio) Ordering 기반 결합 칼만 등화기가 고려되었으며, 기존 및 제안 기법과 동일한 크기의 상태 벡터를 사용하였다.^[2] 한편 또 다른 대조군으로 심벌간 간섭이 없는 환경($L=1$)에서 SINR (Signal to Interference-plus-Noise Ratio) Ordering이 적용된 MMSE (Minimum Mean Square Error) V-BLAST 수신기 또한 고려되었다.^[1]

그림 1 및 2는 각각 $N=M=16$ 및 32인 환경에서 각 기법들의 평균 BER 성능을 나타내고 있다. 여기서 IT 는 기존 및 제안 기법의 Iteration 수를 나타낸다. 앞서 예측된 바와 같이 $IT=1$ 인 경우 제안 기법의 BER 성능이 기존 기법 대비 크게 열화되나, Iteration 수가 증가할수록 제안 기법의 성능이 점차적으로 향상됨을 확인할 수 있다. 특히 $IT=10$ 인 제안 기법의 경우, $IT \geq 3$ 인 기존 기법 대비 약 1.0 dB 내의 BER 성능을 달성하며 또한 $IT=1$ 인 기존 기법 대비 크게 우수한 BER 성능을 달성함을 확인할 수 있다. 본 모의실험 환경에서 $IT=10$ 인 제안 기법은 $IT=1$ 인 기존 기법보다도 더욱 낮은 연산량만을 요구함을 고려할 때, 충분한 수의 Iteration이 제공되는 경우 제안 기법은 기존 기법 대비 크게 낮은 연산량으로 그에 근접하거나 또는 상회하는 BER 성능을 달성할 수 있음을 확인하였다. 한편, 결합 칼만 등화기 및 MMSE V-BLAST 수신기와 비교할 경우, 제안 기법

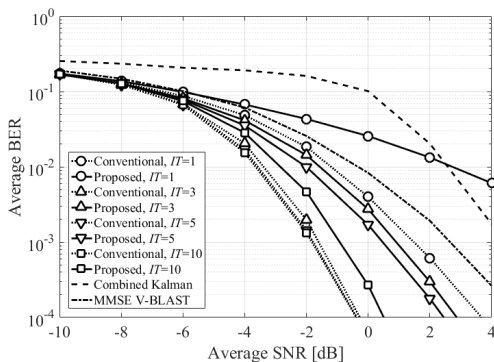


그림 1. 16x16 MIMO 시스템에서의 평균 BER
Fig. 1. Average BERs in 16x16 MIMO system

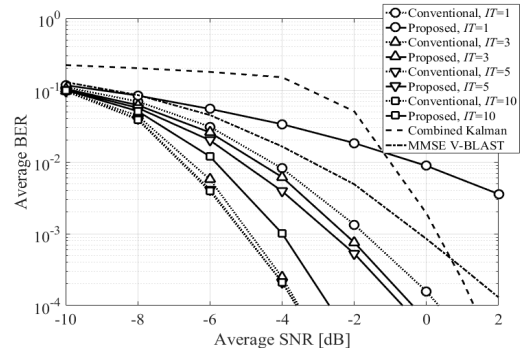


그림 2. 32x32 MIMO 시스템에서의 평균 BER
Fig. 2. Average BERs for 32x32 MIMO system

은 Iteration 수가 1인 경우를 제외하고는 안테나 수 및 복잡도에 관계없이 해당 기법들 대비 향상된 BER 성능을 달성함을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 심벌간 간섭을 갖는 대규모 MIMO 시스템을 위한 저복잡도의 칼만 필터 및 스무더 기반 반복 등화기를 제안하였다. 제안 기법은 대규모 MIMO 시스템의 입력 수가 증가할수록 기존 기법의 연산량을 크게 감소시킨다. 모의실험을 통해 대규모 MIMO 시스템 환경에서 충분한 수의 Iteration이 제공될 시 제안 기법이 기존 기법에 근접하는 BER 성능을 달성할 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] A. Paulraj, et al., *An Introduction to Space-Time Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2003.
- [2] J. He, et al., "MMSE interference suppression in MIMO frequency selective and time-varying fading channels," *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 56, no. 8, pp. 3638-3651, Aug. 2008.
- [3] J. An, et al., "Performance of sphere decoding algorithm at MIMO channel with ISI," in *Proc. KICS Summer Conf.*, pp. 1718-1719, Jeju, Korea, Jun. 2009.
- [4] S. Park and S. Choi, "Iterative equalizer based on Kalman filtering and smoothing for MIMO-ISI channels," *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 63, no. 19, pp. 5111-5120, Oct. 2015.