

하드웨어 왜곡이 있는 다중입출력 시스템을 위한 데이터 증강 기반 심볼 검출 기법

강유진, 전요셉*
포항공과대학교

{yujinkang, yoseb.jeon}@postech.ac.kr

Data-Augmentation-aided Symbol Detection Method for MIMO Systems with Hardware Impairments

Yujin Kang, Yo-Seb Jeon
Pohang Univ. of Science and Technology (POSTECH)

요약

본 논문은 하드웨어 왜곡을 겪는 다중 입출력 시스템의 심볼 검출 성능을 향상시키기 위한 데이터 증강 기반 심볼 검출 기법을 제안한다. 제안된 기법은 일부 수신 신호에 잡음 신호를 주입하여 증강된 학습 데이터를 확보한다. 증강된 학습 데이터는 최대우도 검출기 또는 Kernel Density Estimation 검출기의 파라미터를 조정하는데 사용한다. 다양한 분산으로 잡음 신호를 주입하여 여러 검출기를 조정한 후, 균일한 라벨을 검출하는 검출기로 심볼 검출을 수행한다. 모의 실험을 통해, 제안된 기법이 하드웨어 왜곡이 있는 다중 입출력 시스템에서 심볼 검출 성능을 향상시킬 수 있음을 보인다.

I. 서론

초고주파 광대역 다중입출력(Multiple-input multiple-output, MIMO) 시스템은 차세대 통신 시스템의 핵심 기술로서 스펙트럼 효율성을 크게 향상시킬 수 있다. 하지만 주파수 대역과 대역폭의 증가는 전력 증폭기와 DAC/ADC 성능 저하로 인한 하드웨어 왜곡 문제를 야기한다[1]. 이러한 하드웨어 왜곡 문제는 비선형 잡음 신호를 발생시켜 채널 추정 및 데이터 검출 성능을 저하시킨다. 하드웨어 왜곡 잡음을 모델링하기 위한 기법들이 제안되었으나, RF 구성 요소별 특성을 반영하지 못하여 모델링 오류가 발생할 수 있다는 한계를 가진다. 따라서, 이를 해결하기 위해 하드웨어 왜곡 특성을 고려하여 MIMO 시스템의 심볼 검출 성능을 향상시키는 새로운 검출 기법이 필요하다.

하드웨어 왜곡이 존재하는 시스템의 심볼 검출에는 하드웨어 왜곡의 특성이 반영된 정보가 필수적이다. 이를 간단히 해결할 수 있는 방법으로 파일럿 수를 증가시켜 시스템의 입출력 관계를 파악할 수 있다. 그러나, 파일럿 수의 증가는 전송 가능한 데이터를 감소시킨다. 제한된 파일럿으로 하드웨어 왜곡이 존재하는 MIMO 시스템의 검출 성능을 향상시키기 위해 본 논문은 데이터 증강 기반 심볼 검출 기법을 제안한다.

제안하는 심볼 검출 기법은 일차적으로 검출된 신호를 이용하여 검출기 파라미터 추정을 수행한다. 이때, 검출된 신호를 그대로 사용하면 과적합 문제로 인해 검출 정확도가 저하된다. 이를 해결하기 위해 제안된 기법은 일부 수신 신호에 잡음을 주입하여 데이터를 증강하고, 이를 이용하여 검출기의 정확도를 향상시킨다. 데이터 증강은 일부 데이터만을 검출기의 학습에 이용하였을 때의 학습 데이터 부족 문제를 보완할 수

있으며, 잡음을 주입하여 양자화된 수신 신호를 연속적인 데이터로 변환하여 수신 신호의 다양성을 확보한다.

II. 본론

본 논문에서는 N_t 개의 송신 안테나와 N_r 개의 수신 안테나로 구성된 MIMO 통신 시스템을 고려한다. 이 때, 각 송신기와 수신기는 비선형 무선 구성요소를 장착한다고 가정한다. 채널 상관 시간 T 동안 각 송신 안테나에서 송신 신호 $\mathbf{x}_i[n] \in \mathcal{X}$ 를 송신하였을 때, 데이터 심볼 벡터 $\mathbf{x}[n] = [x_1[n], \dots, x_{N_t}[n]]^T$ 에 대한 수신 신호 벡터 $\mathbf{y}[n]$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y}[n] = f_{rx}(\mathbf{H}f_{tx}(\mathbf{x}[n]) + \mathbf{z}[n]), n \in \{1, 2, \dots, T\}, \quad (1)$$

위 식에서, f_{rx} 와 f_{tx} 는 수신기와 송신기의 하드웨어 왜곡에 의한 비선형 함수를, \mathbf{H} 는 시간 T 동안의 채널 행렬을, $\mathbf{z}[n] \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}_{N_r}, \sigma^2 \mathbf{I}_{N_r})$ 은 가우시안 잡음 벡터를 나타낸다.

제한된 파일럿으로 검출 성능을 높이기 위해 제안 기법은 검출된 데이터를 기반으로 검출기의 파라미터를 갱신한다. 수신된 데이터의 송신 신호를 정확히 알지 못하는 상황에서, 검출된 데이터 신호를 모두 검출기 갱신에 사용하면 검출기의 파라미터가 부정확한 데이터에 의해 과적합 될 수 있다. 이를 방지하기 위해 제안 기법은 일부 수신 데이터만을 이용하여 검출기의 파라미터를 계산한다. 하지만, 적은 데이터로 파라미터를 추정하는 것은 검출 성능 저하로 이어지므로 데이터 증강을 통해 검출기 학습 데이터를 증가시킨다. 수신된 데이터를 반복하여 동일하게 생성한 후, 특정한 분산을 가진 복소 정규 가우시안 잡음을 증강된 수신 데이터에 주입하여 새로운 학습 데이터를 생성한다. 증강된 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{y}_{sample} = \text{rep}(\mathbf{y}_{1:T_{SL}}, 10) + \sqrt{\sigma_p} \mathbf{z}, \mathbf{z} \sim \mathcal{CN}(0, 1) \quad (2)$$

위 식에서 $\text{rep}(x,y)$ 은 데이터 x 를 y 배 반복하여 생성하는 함수이다. y_{data} 는 T 시간의 수신 신호를 행렬로 나타낸 것이며, σ_p 는 주입하는 잡음의 분산을 나타낸다. 증강된 데이터는 EM(Expectation-Maximization) 알고리즘을 적용하여 수신 신호들의 평균과 분산을 추정한다. EM 알고리즘은 데이터의 평균과 분산 계산에 용이한 알고리즘으로 기대값 계산과 최대화 과정을 반복하여 평균과 분산을 갱신한다. EM 알고리즘으로 도출된 수신벡터의 평균과 분산은 최대우도 검출기 또는 KDE(Kernel Density Estimation) 검출기에 사용된다.

최대우도 검출기는 EM 알고리즘으로 추정된 평균과 분산으로 최대우도 검출을 수행한다. 최대 우도 검출 기법은 다음의 방식으로 송신 벡터를 검출한다.

$$\hat{\mathbf{x}}[n] = \mathbf{x}_{i^*}, \quad i^* = \underset{i \in \{1, \dots, K\}}{\text{argmax}} \frac{1}{(2\pi)^{N_{rx}} \Sigma_i} \exp\{-(\mathbf{y}[n] - \boldsymbol{\mu}_i) \Sigma_i^{-1} (\mathbf{y}[n] - \boldsymbol{\mu}_i)^T\} \quad (3)$$

위 식에서, K 는 전송되는 송신 벡터의 가능한 가짓수를 뜻한다. $\hat{\boldsymbol{\mu}}_i$ 과 $\hat{\Sigma}_i$ 는 EM 알고리즘에 의해 추정된 평균벡터와 분산 행렬을 나타낸다.

KDE 검출기는 커널 함수를 이용한 밀도 추정 알고리즘으로 데이터를 이용하여 확률밀도함수를 추정한다. 증강된 수신 데이터를 최대우도 검출기로 검출한 후, 송신 벡터 \mathbf{x}_i 를 송신했다고 가정하여 각 수신 신호에 대한 확률밀도함수를 KDE 알고리즘으로 구한다. 추정된 확률밀도함수는 아래와 같이 계산된다.

$$\hat{f}_i(\mathbf{y}[n]) = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} K_h(\mathbf{y}[n] - \mathbf{y}_{i,j}), \quad i \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (4)$$

위 식에서, n_i 는 T_{SL} 개의 수신 신호를 검출했을 때, \mathbf{x}_i 벡터가 검출된 개수를 뜻하며, $K_h(\cdot)$ 는 대역폭 파라미터로 h 를 가지는 커널 함수이다. 각 수신 신호에 대해 $\hat{f}_i(\mathbf{y}[n]), i \in \{1, 2, \dots, K\}$ 를 계산한 뒤, 가장 큰 확률밀도 함수에 대응하는 송신 벡터로 검출한다. 이 과정은 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\hat{\mathbf{x}}[n] = \mathbf{x}_{\hat{i}}[n], \quad \hat{i} = \underset{i \in \{1, \dots, K\}}{\text{argmax}} \hat{f}_i(\mathbf{y}[n]) \quad (5)$$

검출기는 T_{SL} 개의 수신 신호에 대한 송신 신호를 검출한 후, 라벨 균형 시험을 수행한다. 라벨 균형 시험은 송신한 송신벡터가 동일한 확률로 보내진다는 가정 하에서, 검출한 송신벡터가 균등하게 분포하는지 확인한다. 특정한 분산을 가정하여 증강한 데이터로 학습된 검출기 중에서 송신 신호를 가장 균등하게 검출하는 검출기로 확정한다. 확정된 검출기로 데이터 신호를 최종 검출한다.

본 논문에서 제안된 기법의 성능을 비교하기 위해 모의 실험을 진행하였다. 상관 시간 $T = 1000$, 파일럿 신호의 수 $T_p = 4$ 와 $N_t = 2, N_r = 4$ 개의 안테나를 가진 다중 입출력 시스템을 가정하였다. 상관시간 동안 변하지 않는 채널을 가정한다. 채널 \mathbf{H} 의 요소들은 $\mathcal{CN}(0,1)$ 에서 독립적으로 추출된다. 하드웨어 왜곡에 의한 영향을 확인하기 위해 송신기에서는 비선형 전력증폭기, 수신기에서는 저해상도 ADC 를 각각 f_{tx}, f_{rx} 로 설정하였다. 주입한 잡음의 분산은 $\sigma_p \in \{0.04, 0.08, 0.12, 0.16, 0.2\}$ 값을 가진다. $K_h(\cdot)$ 는 가우시안 커널이다.

그림 1 은 제안된 기법과 기존 기법의 심볼 검출 오류율을 비교한 결과이다. Approx MLD 기법은 추정된 채널을 이용한 최대 우도 검출 기법이며, Conv EM 기법은 EM 알고리즘으로 추정된 평균과 분산으로 최대우도 검출을 수행한 기법이다. EM-AN 과 KDE-AN 은 일부 데이터를 증강하여 검출기를 조정하는 기법이며 KDE 기법은 데이터 증강없이 KDE 검출기로 검출한 기법이다. 그림 1 은 제안된 데이터 증강 기법

검출 기법과 잡음 주입에 의한 데이터 증강 방식이 심볼 검출에 효과적임을 보인다.

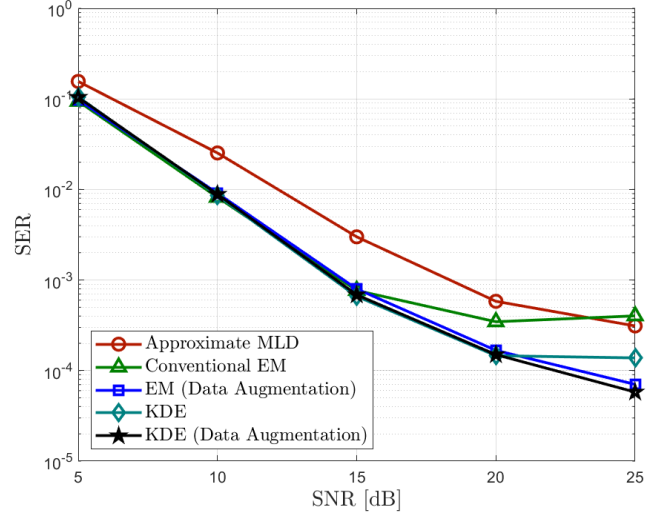


그림 1. 심볼 검출 오류율 비교

III. 결론

본 논문에서는 하드웨어 왜곡이 존재하는 MIMO 통신 시스템의 심볼 검출 성능을 향상시키기 위해 데이터 증강 기반 심볼 검출 기법을 제안하였다. 제안 기법은 일부 수신 신호에 잡음을 주입하여 증강한 뒤, 증강된 데이터로 검출기 파라미터를 조정한다. 주입하는 잡음의 분산을 조정하면서 송신 신호를 가장 균일하게 검출한 검출기를 선택한 후, 남은 수신 신호들을 검출한다. 모의 실험을 통해 제안하는 기법이 기존의 검출 기법들보다 우수한 검출 성능을 나타낼 수 있음을 입증하는 한편, 잡음 주입을 이용한 데이터 증강이 심볼 검출에 효과적임을 입증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2022R1C1C1010074)

참고 문헌

- [1] E. Björnson, J. Hoydis, M. Kountouris and M. Debbah, "Massive MIMO Systems with Non-Ideal Hardware: Energy Efficiency, Estimation, and Capacity Limits," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 60, no. 11, pp. 7112-7139, Nov. 2014.