

USRP를 활용한 Digital Self-Interference Cancellation 알고리즘 성능 평가

김태규, 유홍재, 고갑석*

강원대학교

tbvjxorb@kangwon.ac.kr, yoo024@kangwon.ac.kr, *ksko@kangwon.ac.kr

Performance Evaluation of Digital Self-Interference Cancellation Algorithms using USRP

Kim Taekyu, Yoo Hongjae, Ko Kabseok*

Kangwon National University

요약

6G의 핵심 후보 기술 중 하나인 In-Band Full Duplex 방식은 Half-Duplex 방식과는 다르게 동일한 주파수 대역에서 동시에 송신 및 수신 가능한 기술이기 때문에 효율성이 좋다. 하지만 가장 큰 문제점은 수신기에 유입되는 Self-Interference(SI) 신호이다. 이 SI 신호를 제거한다면 이론적으로 Half-Duplex 방식에 비해 전송 용량이 최대 2배 증가하고, Latency가 감소한다. 본 논문은 디지털 영역에서 SI 신호를 제거하는 알고리즘을 소개하고 성능을 비교하였다.

I. 서론

최근 정보통신 기술의 발전과 함께, 무선 통신 시스템의 효율성 및 성능 향상에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다. 특히, 다양한 무선 장치와 애플리케이션의 등장으로 인해 무선 스펙트럼의 효율적인 활용이 필수적이다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 여러 가지 기술적 접근법이 제안되고 있으며, 그중에서도 In-Band Full Duplex(IBFD) 기술은 최근 혁신적인 기술로 주목받고 있다. 그러나 IBFD 기술의 가장 큰 문제점은 수신기로 유입되는 SI 신호이다. 송신 신호가 수신 신호에 간섭을 일으켜 통신 품질을 저하한다. 이런 수신 신호 품질 저하를 막기 위해서는 SI 신호를 일정 수준 이상 제거해야만 한다.

본 논문은 USRP를 이용한 Digital SI 신호 알고리즘의 성능을 평가한다. 특히, 송수신 안테나를 공유하는 방법인 서큘레이터 기술을 기반으로 실험환경을 구축하고, 아날로그 영역에서의 SI 제거는 감쇄기를 사용하여 구현한다. 아날로그 SIC 이후의 잔여 SI 신호를 디지털 영역에서 제거한다.

본 논문에서는 먼저 실험환경을 설명하고 이후 SI를 제거하기 위한 여러 방법을 소개한 후 각각의 성능을 비교한다.

II. Digital Self-Interference Cancellation 알고리즘

1) Model-based Algorithm

모델 기반 Digital SIC 알고리즘은 수학적 공식을 활용하여 비선형 및 시간 변동 SI 채널의 복잡한 특성을 정확하게 표현하려는 접근 방식이다. 이를 통해, 모델을 기반으로 한 알고리즘은 도메인 지식을 활용하여 효과적으로 SIC를 진행할 수 있다. 단순한 선형 모델만으로는 비선형 특성을 충분히 표현할 수 없기 때문에 다음과 같은 Parallel Hammerstein Polynomial(PH) 모델이 개발되었다.

$$\psi_P(n) = |x(n)|^{p-1} x(n) \quad (1)$$

IBFD 환경에서 신호가 송수신되는 과정에서 송신 신호는

Digital-to-Analog Converter(DAC), IQ Mixer, Power Amplifier(PA) 등 다양한 RF 부품을 지나게 된다. 신호를 송신하기 위해 PA의 출력 전력을 크게 증가시키면 송신 신호에 뜻하지 않은 비선형성이 발생하게 된다. 이 때 (1)에서 설명한 PH Model을 사용하여 PA와 같은 비선형 시스템의 복잡한 동작을 수식적으로 표현할 수 있다. SI 신호를 PH Model을 사용하여 수식적으로 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$y_{SI}(n) = \sum_{\substack{p=1, q=0 \\ p \text{ odd}}}^P \sum_{m=0}^p \sum_{m=0}^{M_i-1} h_{m,q,p} x(n-m)^q x^*(n-m)^{p-q} \quad (2)$$

여기서 P 는 Power Amplifier(PA)의 비선형 최대 차수, M_i 는 PA의 메모리 효과와 채널 길이, $h_{m,q,p}$ 는 PA, IQ Mixer, SI Channel의 전체적인 영향을 포함하는 임펄스 응답이다.

여기서 $\hat{h}_{m,q,p}$ 은 LS Algorithm을 사용하여 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{h}_{m,q,p} = (X^H X)^{-1} X^H y_{SI} \quad (3)$$

X 는 송신 신호를 행렬로 나타낸 것이고, $(\cdot)^H$ 는 Hermitian Transpose를 나타낸다. 이후 추정된 채널 값 $\hat{h}_{m,q,p}$ 로 $y_{SI}(n)$ 을 처리하는 것이 모델 기반의 LS Algorithm을 통한 SIC이다.

2) Model-free Algorithm

머신러닝 기술을 활용한 Model-free Algorithm은 최근 데이터 세트의 증대와 현대 딥러닝 파이프라인의 향상된 성능 덕분에 인기가 증가하고 있다. Model-free Algorithm의 주요 목표는 방대한 양의 입력 데이터로부터 기대 출력을 학습하는 것이다. Model-based Algorithm과 달리 비선형 SIC 채널을 블랙박스로 취급하며 입력 및 출력 데이터 포인트를 사용하여 매개변수를 학습한다. 대표적인 방법으로 Complex Feed Forward

Neural Networks가 있다. Complex FFNN은 그림 1과 같은 형태의 1개의 Input Layer, 1개의 Hidden Layer, 1개의 Output Layer로 이루어져 있고 식(4)과 같은 Mean Squared Error(MSE)를 손실함수로 사용한다.

$$L = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y_{SI}(n) - \hat{y}_{SI}(n)|^2 \quad (4)$$

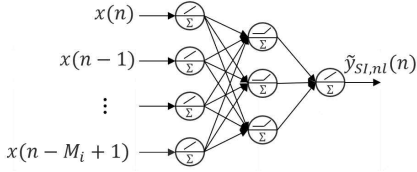


그림 1. Complex FFNN 예시 (4 Input Neurons, 3 Hidden Neurons, 1 Output Neurons)

학습을 할 때는 식(5)과 같이 오류 역전파 알고리즘을 사용하여 손실함수에 대한 Gradient를 계산하고 이를 통해 가중치를 업데이트하며 이 과정을 여러 번 반복하여 모델이 충분히 학습될 때까지 반복한다. 여기서 η 는 학습률을 나타낸다.

$$W_{i+1} = W_i - \eta \frac{\partial L}{\partial W_i} \quad (5)$$

III. 실험환경 및 실험결과

먼저 SIC를 진행하기 위한 실험환경은 다음과 같다. Ettus사의 NI-USRP-2954R을 그림 2와 같이 Circulator와 안테나, 감쇠기를 연결하고 GNU Radio Companion(GRC)을 사용한 Software Defined Radio(SDR) 기반의 IBFD 환경을 구축하였다. 사용한 Circulator는 Ditom사의 D3C0810S로 주파수 영역은 0.8GHz부터 1.0GHz이고 Isolation은 최소 20dB, Insertion Loss는 최대 0.4dB인 특성을 가진 제품이다. 안테나는 Ettus사의 Vert900으로 주파수 영역은 824MHz부터 960MHz이다. 감쇠기의 주파수 영역은 DC부터 6GHz이고, 30dB 감쇠된다.

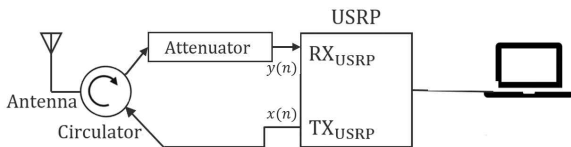


그림 2. Circulator를 사용한 FD Transceiver 실험환경
IBFD 환경에서 SIC의 성능을 검증하기 위해 GRC의 OFDM Transmitter로 OFDM Symbol을 반복적으로 생성하여 Tx Data로 이용하였다. 생성한 OFDM Symbol의 특성은 다음 Table 1과 같다.

System Parameters	Value
Number of Pilot Carriers	151
Center Frequency	837MHz
Sampling Rate	1M Samples/sec
Bandwidth	1MHz
Header Modulation	BPSK
Payload Modulation	QPSK
FFT Size	1024
CP Size	256

Table 1. System Parameters

Table 2는 Table 1과 같이 생성한 OFDM Symbol을 반복적으로 전송했을 때 GRC의 UHD: USRP Sink 블록의 Gain Value 값을 조절해가면서 Spectrum Analyzer로 측정한 Tx Power와 Rx Power 값(감쇠기 없을 때)이다.

Gain Value	Tx Power(dBm)	Rx Power(dBm)
25	17.8	-15
26	18.3	-13
27	18.7	-13
28	19	-14
29	19.1	-13
30	19.1	-12

Table 2. USRP Gain Value에 따른 Tx Power and Rx Power

Table 3은 USRP Tx Gain Value에 따른 선형 SIC와 식 (2)에 기반한 비선형 SIC의 결과를 나타낸다.

Gain Value	Linear(dB)	Linear+ Non-Linear(dB)
25	32.8703	32.8492
26	32.2771	32.2728
27	32.8367	32.8243
28	31.6921	31.8
29	33.6762	33.9076
30	32.5098	33.3020

Table 3. LS Algorithm의 Digital SIC 성능

Complex FFNN은 1개의 Input Layer, 1개의 Hidden Layer에 40개의 Neurons, 1개의 Output Layer로 구성하였고 약 33.67dB 제거되었다.

IV. 결론

Digital SIC 실험을 837MHz 대역에서 진행했다. 하지만 이 주파수 대역은 이동통신 주파수 대역이기 때문에 이동통신 주파수에서 들어오는 간섭이 어느 정도 영향을 미치는 것으로 짐작된다. SIC를 진행할 때, Noise가 Receiver 안에서 생기는 Noise만 존재하는 것이 아니라, 이동통신 대역에서 또한 수신단에 영향을 주어 Noise가 발생하기 때문에 만족하는 성능을 얻지 못했다. LS Algorithm으로 Digital SIC를 진행한 성능에서 USRP Gain Value 값이 28일 때, 즉 Tx Power가 약 19dBm을 넘어갈 때 Non-Linear SIC 성능이 조금씩 증가하는 모습을 보였다. 미루어 볼 때 Tx Power가 약 19dBm을 넘어가기 시작하면 PA로 인한 Non-Linearity가 생긴다는 것을 짐작해 볼 수 있다. 다음 연구에서는 Non-Linearity가 발생하기 시작하는 부분에 대해 집중적으로 탐구하여 SIC를 진행할 계획이다.

참고 문헌

- [1] A. Balatsoukas-Stimming, "Non-linear digital self-interference cancellation for in-band full-duplex radios using neural networks," in Proc. IEEE Int. Workshop Signal Process. Adv. Wireless Commun. (SPAWC), Jun. 2018
- [2] 박하은, 윤지용, 김영식, "USRP 장치를 이용한 동일대역 전이중 무선 통신 연구", 한국전자과학회논문지, 2019
- [3] M. Elsayed, A. A. A. El-Banna, O. A. Dobre, W. Shiu, and P. Wang, "Full-duplex self-interference cancellation using dual-neurons neural networks," IEEE Commun. Lett., Mar. 2022.
- [4] M. Elsayed, A. A. Aziz El-Banna, O. A. Dobre, W. Shiu, and P. Wang, "Machine learning-based self-interference cancellation for full-duplex radio: Approaches, open challenges, and future research directions," IEEE Open J. Veh. Technol. 2024.