

동일대역 전이중 시스템에서 EBD 튜닝을 위한 신경망

김현진, 박승영

강원대학교

lahyunjin@kangwon.ac.kr, s.young.park@kangwon.ac.kr

Neural Network for EBD Tuning in IBFD Systems

Kim Hyun Jin, Seungyoung Park

Kangwon National Univ.

요약

In-band full duplex (IBFD) 시스템에서는 자기간섭 신호를 감소시키기 위해 electrical balance duplexer (EBD)의 양단에 안테나와 balance network를 연결하고, 안테나의 임피던스의 변화에 대응하여 송수신 격리도가 최대화 되도록 balance network의 임피던스를 조정한다. 구체적으로, balance network는 다수의 가변 커패시터의 임피던스를 디지털 비트 조합으로 조정할 수 있으나, 생성 가능한 비트 조합의 수, 즉 탐색 공간의 크기가 매우 커 최적의 비트 조합을 찾는 데 많은 시간이 소요된다. 본 논문에서는 신경망을 이용하여 탐색 공간을 축소시켜, 짧은 시간 내에 준최적 비트 조합을 찾는 기법을 제안한다. 예를 들어, 4개의 5비트 가변 커패시터를 사용하는 경우, 탐색 공간은 약 백만 개에 달하며, 이로 인해 실시간 최적화가 어렵다. 제안 기법은 신경망을 통해 각 커패시터의 비트 조합에 대한 확률을 계산하고, 이를 기반으로 가장 가능성이 높은 3개의 커패시터 비트 조합을 선정하여 탐색 공간의 크기를 81로 크게 줄였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 최적 기법에 비해 평균 송수신 격리도 성능 감소를 약 0.7dB 이내로 줄일 수 있음을 보였다.

I. 서론

디지털 기기의 사용이 증가하면서 온라인에서 생성하고 소비하는 데이터의 양이 급증하고 있다. 이에 따라 기존의 time division duplex (TDD) 및 frequency division duplex (FDD) 통신 방식의 한계를 극복하고 무선 자원을 효과적으로 관리하기 위한 새로운 전략이 요구되고 있다 [1]. 이에 대한 방안으로 동일한 주파수 대역에서 데이터를 동시에 송수신할 수 있는 IBFD 시스템이 주목받고 있지만, 자기간섭은 여전히 중요한 도전 과제로 남아 있다 [2].

이를 해결하기 위해 개발된 EBD는 송수신기와 안테나를 포함하는 시스템에서 balance network 내의 커패시턴스를 미세조정함으로써 임피던스 매칭을 달성하여 자기간섭을 효과적으로 감소시킬 수 있다. EBD의 미세 조정을 위해 여러 기법이 연구되었다 [3, 4]. 이들은 자기간섭을 감소시키는 데 효과적이지만, 여전히 탐색 공간의 방대함으로 인해 최적의 비트 조합을 효율적으로 찾는 데 어려움을 겪고 있다. 본 논문은 balance network 내에서 가변 커패시터 뱅크의 방대한 탐색 공간을 효율적으로 다루기 위한 신경망 기법을 제안한다.

II. 본론

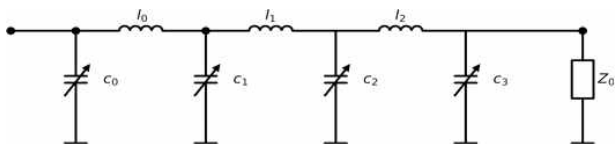


그림 1 Balance network의 블록 다이어그램

A. 시스템 구성

본 논문에서는 EBD 시스템이 주파수 대역 1.88GHz에서 1.92GHz 사이,

중심 주파수는 1.9GHz이며 특성 임피던스는 50Ω에서 작동한다고 가정한다. 이 가정을 바탕으로, 그림 1과 같이 2.85nH의 고정된 인덕턴스 값을 가진 세 개의 인덕터와 네 개의 가변 커패시터를 포함하는 balance network를 사용한다 [5]. 각 커패시터는 5비트 해상도를 지니며, 조절 가능 범위는 1.14pF에서 5.10pF 사이이다. 이 범위는 32개의 독립적인 단계로 나누어져 있으며, 따라서 각 가변 커패시터의 커패시턴스 인덱스는 0부터 31까지이다.

격리 이득은 안테나와 balance network 간의 반사 계수 차이의 제곱으로 정의되며, 이는 EBD 시스템의 자기간섭 신호 감소 능력을 평가하는 주요 성능 지표이다 [3]. 본 논문의 최적화 목표는 시스템 대역폭에 걸쳐 균등하게 분할된 40개의 하위 대역에서 평균화된 격리 이득을 최소화하는 것이다 [4]. 이를 바탕으로, 본 연구는 격리 이득을 최소화하기 위한 최적의 커패시터 비트 구성을 찾는 과제를 다룬다.

탐색 공간은 가변 커패시터의 모든 가능한 비트 조합, 즉 커패시턴스 인덱스 조합으로, 총 $2^{4 \times 5}$ 가지 조합에 달한다. 커패시터 추가 및 비트 레벨마다 시스템의 복잡성이 기하급수적으로 증가한다. 이러한 방대한 탐색 공간에서 효과적인 전략을 찾고 최적화하는 것이 중요하다.

B. 제안 기법

신경망 훈련을 위한 데이터셋은 입력값과 해당하는 목표값으로 구성된다. 목표값은 주어진 안테나 임피던스에 대해 격리 이득을 최소화하는 커패시터 인덱스 벡터로, 이는 완전탐색을 통해 찾아진다. 입력값으로는 고정된 중간값 커패시터 인덱스 벡터 하에서 측정된 복소 스펙트럼 벡터를 사용한다.

추론 과정에서, 신경망은 제공된 복소 스펙트럼 벡터에 대해, 각 가변 커패시터의 모든 가능한 커패시턴스 인덱스에 대한 조건부 확률을 출력한다. 각 커패시터에 대해 가장 높은 확률을 보이는 상위 k개 인덱스를 고려

하여, 이 후보들의 격리 이득을 측정된 후, 가장 이득이 작은 구성을 준최적의 커패시터 बैं크 구성으로 선택한다. 이 기법은 탐색 공간을 $2^{(4 \times 5)}$ 에서 k^4 로 크게 줄이며, 격리 이득을 최소화하는 준최적 커패시터 인덱스를 보다 효율적으로 식별할 수 있다. 예를 들어, $k = 3$ 일 경우, 총 81개의 후보가 생성되며, 이들 중 격리 이득이 가장 낮은 하나의 후보를 준최적 커패시터 인덱스로 선택한다.

안테나는 사용자 조작과 같은 요인에 의해 임피던스가 변화한다 [6]. 훈련을 위한 데이터를 확보하기 위해, 기존 연구의 실제 측정을 모방한 시뮬레이션 기반 접근법을 사용하였다. MATLAB에서 제공하는 표준 1.9GHz PIFA 안테나 모델의 디자인 파라미터에 작은 크기의 난수 값을 추가하여 총 10,000개의 안테나 임피던스 데이터를 수집하였다. 이 중 9,000개의 안테나 임피던스 샘플을 사용해 신경망을 훈련하였고, 나머지 1,000개의 샘플을 사용해 성능을 평가하였다.

C. 실험 결과

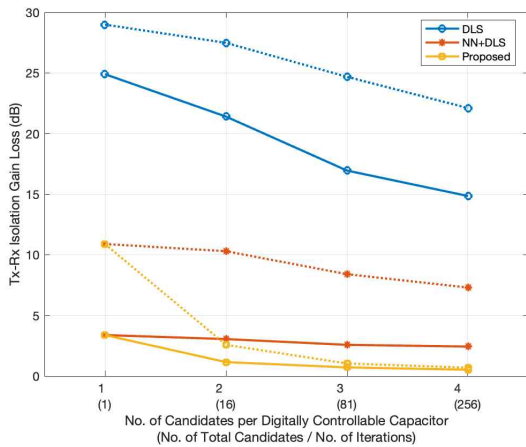


그림 2 다양한 탐지 기법에 따른 격리 이득 손실 비교

그림 2는 안테나 임피던스 모델에 대해 제안된 기법과 기존 기법들의 격리 이득 성능을 반복횟수에 따라 격리이득 손실을 비교한 결과를 보여준다. 여기서, 격리이득 손실이란, exhaustive search를 통해 달성할 수 있는 최적 격리이득 대비 제안기법 및 기존 기법들에 의해 달성한 격리이득과의 차이를 의미한다. 이 그림에서 실선과 점선은 각각 평균 격리 이득 손실과 90번째 백분위수 격리 이득 손실을 나타낸다. 기존 기법들과의 성능 비교를 위해, DLS 기법[3, 4] 과 신경망과 DLS를 결합한 기법 [7]을 사용했다. 이 기법에서는 먼저 신경망을 사용하여 최적의 초기 가중치를 결정한 후, DLS로 가중치를 미세 조정한다.

DLS와 신경망 DLS 결합 기법은 지정된 반복 횟수에 도달할 때까지 가중치를 반복적으로 업데이트한다. 이 과정에서 이전에 발견된 동일한 커패시터 인덱스로 업데이트가 될 수 있다. 제안된 기법과의 공정한 비교를 위해, 이러한 반복은 총 반복 횟수에 포함하지 않았다. 반면에 제안된 기법은 가능한 모든 커패시터 인덱스 후보를 평가했다. 예를 들어, $k = 3$ 인 경우, 성능을 평가할 후보가 81 ($=3^4$)개이다. 81회 반복 기준으로 DLS 기법, 신경망 DLS 결합 기법, 그리고 제안 기법의 평균 격리 이득 손실은 각각 약 16.94dB, 2.57dB, 0.7dB 임을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 EBD에 신경망을 적용하여 IBFD 시스템의 자기간섭 문제를 해결하는 새로운 최적화 기법을 제안했다. 제안된 방식은 기존의 커

패시터 बैं크 조정 기법에 비해 탐색 공간을 크게 줄여 처리 효율성을 높이고 격리 이득을 최소화하는 데 효과적이었다. 이는 향후 다양한 통신 환경에서의 적용 가능성을 열어주며, 무선 통신 시스템의 자원 관리와 성능 개선에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No. RS-2023-00221494)과 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 스마트팜다부처패키지혁신기술개발 사업 (421040-04)의 지원을 받아 연구되었음.

참고 문헌

- [1] S. K. Sharma, T. E. Bogale, L. B. Le, S. Chatzinotas, X. Wang, and B. Ottersten, "Dynamic spectrum sharing in 5G wireless networks with full-duplex technology: Recent advances and research challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 1, Nov. 2018.
- [2] T. Chen, S. Garikapati, A. Nagulu, A. Gaonkar, M. Kohli, I. Kadota, H. Krishnaswamy, and G. Zussman, "A survey and quantitative evaluation of integrated circuit-based antenna interfaces and self-interference cancellers for full-duplex," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 1753 - 1776, Jul. 2021.
- [3] E. Manuzzato, J. Tamminen, M. Turunen, D. Korpi, F. Granelli, and M. Valkama, "Digitally-controlled electrical balance duplexer for transmitter-receiver isolation in full-duplex radio," in *Proc. European Wireless Conference, Oulu, Finland, May 2016*, pp. 210 - 217.
- [4] S. A. Hassani, V. Lampu, K. Parashar, L. Anttila, A. Bourdoux, B. vanLiempd, M. Valkama, F. Horlin, and S. Pollin, "In-band full-duplex radar-communication system," *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 1086 - 1097, Mar. 2021.
- [5] S. H. Abdelhalem, P. S. Gudem, and L. E. Larson, "Tunable CMOS integrated duplexer with antenna impedance tracking and high isolation in the transmit and receive bands," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 9, pp. 2092 - 2104, Sep. 2014.
- [6] N. B. A. Rahman, A. A. Al-Hadi, and S. N. Azemi, "Impedance analysis of mobile phone antenna in the presence of user's hand," in *Proc. International Conference on Emerging Electronic Solutions for IoT, Penang, Malaysia, Oct. 2017*, pp. 1 - 6.
- [7] K. E. Kolodziej, A. U. Cookson, and B. T. Perry, "RF canceller tuning acceleration using neural network machine learning for in-band full-duplex systems," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 1158 - 1170, May 2021.