

6G 중고주파수 대역 다중입출력 전이중통신 프로토타이핑에 관한 연구

김윤태, 채찬병*

연세대학교

kyt0410@yonsei.ac.kr, *cbchae@yonsei.ac.kr

A Study on Full Duplex MIMO for 6G Upper-mid Band System Prototyping

Yoon-Tae Kim, Chan-Byoung Chae*

Yonsei University

요약

본 연구는 중고주파수 대역 전이중 무선 통신 시스템에서 두 가지 과제인 자기 간섭(SI)과 전력 증폭기(PA)의 비선형성 해결 및 분석에 초점을 맞춘다. SI 및 PA 비선형성을 분석 및 개선하기 위해 Proof of Concept (PoC) 시스템을 구성하고 MIMO FD에서 자기 간섭 제거(SIC) 알고리즘을 구현한다. 또한, 다중 사용자 MIMO 시스템을 구현하기 위해 레이 트레이싱 기술을 사용하며, 시뮬레이션 결과를 통해 SI 채널을 생성한다. 비선형성을 최소화하는 알고리즘은 pre-calibration 및 SI를 줄이는 방향으로의 후처리 빔포밍을 통해 구축되며, 시뮬레이션을 통해 결과가 검증된다. 본 연구는 중고주파수 대역 전이중 무선 통신 시스템의 성능 향상에 기여하며, SI 및 PA 비선형성에 대한 효과적인 해결책을 제공할 것이다.

I. 서론

이 연구는 5G 이후 차세대 통신 네트워크의 요구 사항을 해결하기 위해 다중 사용자 MIMO (MU-MIMO) 및 전이중 통신과 같은 기술을 통합하고 있으며, 이에 하위 대역 및 동일 대역 duplex가 포함된다. 이러한 기술은 신호 통신 패러다임에서 용량과 커버리지를 향상시키는데 중요하다. [1] 최근 mmWave의 한계가 드러나며 연구가 FR3 상위 중간 대역 통신에 초점이 맞춰지고 있다.

MU-MIMO FD 시스템에서 신호가 기지국 (BS)의 전력 증폭기 (PA)를 통해 증폭 과정을 거치면서 송신기(Tx)에서 수신기(Rx)로 전달되며, 이 과정에는 IDFT 변환, 증폭 기능 및 소규모 페이딩 채널이 필요하다. 이 과정에서 자기 간섭 (SI) 및 PA 비선형성이라는 전이중 시스템 실현의 제약 요소가 발생한다. 또한, 상호변조 왜곡 (IMD) 및 신호 대 잡음비 (SNR) 저하와 같은 문제점 또한 유발된다. [2]

SI 및 PA 비선형성 문제를 해결하는 것은 과거 연구에서 중요한 관심사였다. 비선형 기저와 계수의 복잡성과 다중 경로 환경에서 지연 탭 수의 기하급수적 증가로 인해 기존 방법은 한계가 존재한다.

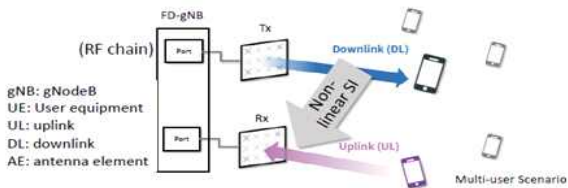


그림 1. MU-MIMO FD 시스템 시나리오

본 연구에서는 MU-MIMO 전이중 시스템에서 SI 및 비선형성을 측정하기 위해 LabVIEW 기반의 개념 증명(PoC)을 구성한다. 레이 트레이싱을 구현하여 MU-MIMO를 통합하고 SI 채널을 구축한 후, MATLAB에서 후처리 시뮬레이션을 통해 입증되는 알고리즘을 개발하여 SI 및 비선형성을 감소시키고자 한다.

또한, 실제 소프트웨어 정의 라디오 (SDR) 플랫폼에서 위상 배열 안테나를 활용하여 실제 빔포밍을 고려하고 있으며, PoC에서 예상되는 결과를 추론하려 한다. [3] PoC는 일반적으로 실제 환경에서 제안된 알고리즘의 실행 가능성을 검증하기 위해 사용되는데, 이의 목표는 SI 및 PA 비선형성 문제에 대한 해결책을 제공하는 동시에 무선 통신 시스템의 향상에 실질적으로 기여하는 실용적인 해결책을 제공하는 것이다.

결론적으로, 이 연구는 SI 및 PA 비선형성을 분석하여, 자기 간섭 제거 (SIC)를 수행하기 위한 방법을 제안하며, 전력 증폭기 (PA) 비선형성을 제거하는 방법을 탐구한다. 이 연구의 주요 기여 사항은 다음과 같다.

- MU-MIMO FD 시스템에서 SI의 영향을 완화하기 위한 새로운 SIC 방법 구현
- PA 비선형성을 보상하기 위한 사전 보정 방법 및 다양한 기술 제안
- 제안된 알고리즘의 실제 환경에서의 실행 가능성을 검증하기 위한 PoC 디자인

II. 본론

이 연구를 진행하기 위해 시스템 모델을 다음과 같이 디자인했다.

a. PoC (LabVIEW 활용)

이 연구에서는 MU-MIMO FD 무선 통신 시스템의 특성을 입증하기 위해 PoC를 사용합니다. PoC는 자기 간섭(SI) 및 PA 비선형성의 정도를 측정하고 분석하도록 구성된다. MIMO FD 시스템에서 원하는 신호는 상향링크(UL) 과정 중에 사용자 장비(UE)에서 기지국(BS)으로 수신된다. 또한, 각 시스템의 처리량 이득을 평가하여 성능을 분석한다. 모든 노드 용어를 포함하는 통신 시스템은 LabVIEW 시스템 설계 소프트웨어와 PXIe 소프트웨어 정의 라디오 플랫폼을 사용하여 구현된다. 이 시스템은 네 가지 주요 구성 요소로 구성된다: 이중 다이폴 안테나, 컨트롤러, 필드 프로그래밍 게이트 어레이 (FPGA) 모듈, RF 전면부

구체적인 구성 요소는 다음과 같다:

PXIe-8133: LabVIEW의 실시간 OS에 기반을 둔 임베디드 컨트롤러로, 신속한 시스템 시각화를 제공하며 디지털 SIC 기능을 갖추고 있으며, FPGA에서 프로그래밍 기반 알고리즘의 실행을 허용하는 인터페이스로 매개 변수 입력을 제공한다.

NI 5791R: RF 송수신기 모듈로, 각각 130 MS/s에서 작동하는 ADC 및 DAC 변환기를 포함하고 있으며, 6GHz 이하에서 Tx 및 Rx 모두에 대해 MHz 대역폭까지의 기능을 지원하며, 스펙트럼 이동을 위한 공유 로컬 오실레이터를 포함된다.

PXIe-7965: Virtex-5 SX95T FPGA를 갖추고 있으며, NI FlexRIO 어댑터 모듈 및 PXIe chassis와 인터페이스하여 모든 베이스밴드 신호 처리를 수행합니다. 여기에는 NI LabVIEW FPGA 모듈을 통해 프로그래밍된 신호 전송, 수신 및 디지털 SIC가 포함된다.

Upper-Mid Band Duplex Antenna: 12.1-12.9 GHz 범위 내에서 작동하며, -21.41dB의 높은 반사 손실 값과 -43.77dB의 격리 값을 특징으로 하여, 효율성과 상호 간섭 방지 기능을 입증함으로써 해당 주파수 범위 내 다양한 통신 응용 분야에 이상적입니다.

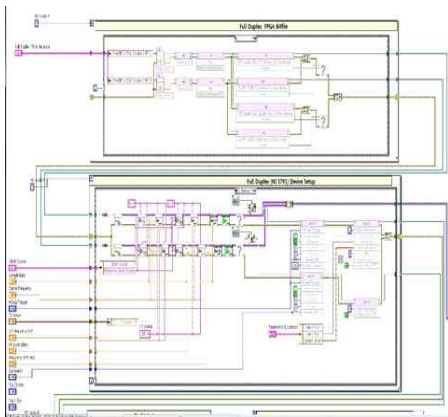


그림 2. PoC MU-MIMO FD Labview 코드의 일부

b. 레이 트레이싱(Ray-tracing)

비선형 디지털 SIC의 필요성을 탐구하고 시스템 처리량 관점에서 PA 비선형성 해결책 제시 및 시스템 성능 평가를 위해, wireless insight를 사용하여 레이 트레이싱을 구현함으로써 MU-MIMO 시나리오를 입증했다.

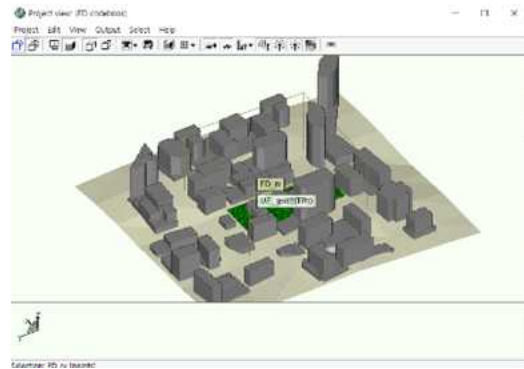


그림 3. Ray-tracing Outdoor 환경 세팅

c. 후처리

레이 트레이싱을 통해 제공된 데이터를 기반으로, SI 채널을 측정했다. 또한, 레이 트레이싱과 PoC에서 얻은 결과를 활용하여 SIC의 효과와 PA 비선형성의 영향을 최소화하기 위해 적용 전후의 변화를 정량화하여 평가했다. 더욱이, 사전 보정 기능을 사용하여 PA 비선형성의 결과를 보상할 수 있는 능력을 입증했다.

III. 결론

이 연구에서는 MU-MIMO와 전이중 기술을 통합하여 자기 간섭 (SI) 및 전력 증폭기(PA) 비선형성 문제에 대한 해결책을 탐구했다. 또한, LabVIEW와 무선 인사이트를 사용하여 SI 및 비선형성과 같은 필요한 값을 측정하고, SIC 및 비선형성 제거 알고리즘을 구현하여 시스템 성능이 향상되었다. 추가적으로, 위상 배열 및 빔포밍을 적용하여 실제 SI 및 비선형성 감쇄 사례를 시뮬레이션하고 평가했다. SI 및 비선형성 제거를 위한 지속적인 연구 및 개발은 향후 더욱 향상된 무선 통신 시스템의 실현을 용이하게 할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023년도 두뇌한국21사업(4단계 BK21 사업)에 의하여 지원되었음. School of Integrated Technology/BK21 Graduate Program in IST

참고 문헌

[1] 5G Forum, "5G Vision, Requirements, and Enabling Technologies,"v. 2.0, Mar. 2016.

[2] K. Komatsu, Y. Miyaji, and H. Uehara, "Theoretical analysis of in-band full-duplex radios with parallel Hammerstein self-interference cancellers," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 20, no. 10, pp. 6772 - 6786, 2021.

[3] D. Bharadia, E. McMillin, and S. Katti, "Full duplex radios," in Proc. Of ACM SIGCOMM, 2013, pp. 375 - 386