

6G ISAC 기술의 실험적 검증을 위한 RFSoc 기반 HW/SW 프로토타입 개발

신상우¹, 신윤화¹, 이진영¹, 최정식²

¹경북대학교 전자전기공학부 석사과정

²경북대학교 전자전기공학부 교수

tlstkddn999@knu.ac.kr, jeenyh615@knu.ac.kr, wlsdud5706@knu.ac.kr,
jeongsik.choi@knu.ac.kr

Development of an RFSoc-Based HW/SW Prototype for Experimental Validation of 6G ISAC Technology

Sangwoo Shin¹, Yunhwa Shin¹, Jinyeong Lee¹, Jeongsik Choi²

^{1,2} Dept. of Electronic and Electrical Engineering,

Kyungpook National University

요 약

본 연구에서는 6G 시대의 핵심 기술인 integrated sensing and communication(ISAC)의 실험적 검증을 위해, radio frequency system-on-chip(RFSoc)을 기반으로 한 HW/SW 프로토타입 시스템을 개발하였다. 제안된 시스템은 다양한 변조 방식을 이용한 무선 송수신 실험을 통해 통신 성능을 평가하고, 실내 환경에서 사람을 대상으로 한 센싱 실험을 통해 환경 인지 성능을 검증하였다. 또한, 클라이언트-서버 기반 실시간 처리 시스템을 구현하여 수집된 데이터를 실시간으로 분석하고 시각화하는 대시보드를 구성하였다. 실험 결과, 제안된 ISAC 시스템이 24 GHz 대역에서 통신과 센싱 기능을 실시간으로 동시에 수행할 수 있음을 확인하였다. 제안된 시스템은 실시간 ISAC 플랫폼으로서 6G 기술 개발에 중요한 기여를 할 수 있으며, ISAC 기반 무선 네트워크 연구에 활용 가능한 유용한 참조 모델이 될 것으로 기대된다.

1. 서론

차세대 통신 시스템에서는 기존 통신 인프라의 기능을 넘어서, 센싱 기능을 융합한 integrated Sensing and Communication(ISAC) 기술이 핵심 기술로 자리 잡을 것으로 기대된다. 특히, 통신과 센싱을 하나의 통합 시스템 내에서 동시에 수행하는 ISAC 기술은 하드웨어 자원의 공유를 통해 기기 소형화, 전력 소비 절감, 스펙트럼 효율 향상 등 다양한 이점을 동시에 실현할 수 있는 잠재력을 지닌다[1]. 현재까지의 연구는 주로 ISAC의 알고리즘 설계 및 이론적 성능 분석에 집중되어 있으며, 실제 무선 환경에서의 하드웨어 구현 및 검증은 상대적으로 미비한 실정이다.

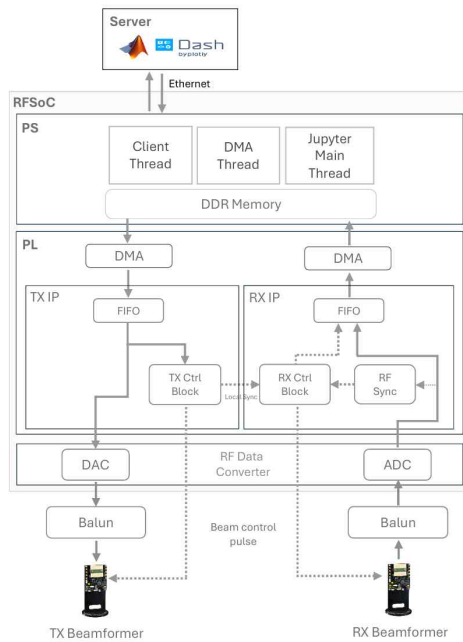
ISAC 기술의 실질적인 상용화를 위해서는 이론적 모델을 넘어 실제 무선 환경에서 동작 가능한 시스템을 구현하고, 이를 통해 이론과 현실 간의 성능 격차를 정량적으로 분석하는 과정이 필수적으로 병행되어야 한다. 본 논문에서는 실시간 통신 및 센싱

처리가 가능한 ISAC 시스템을 설계하고, 이를 무선 실험 환경에서 구현하여 그 성능을 검증하였다. 구체적으로, 6G의 유력한 후보 주파수 대역인 upper-mid 대역[2] 내 24 GHz 중심 주파수에서 동작하는 radio frequency system-on-chip(RFSoc) 기반의 송수신 플랫폼을 구축하였으며, 하나의 orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) 프레임 내에서 데이터 통신과 주변 환경에 대한 센싱을 동시에 수행할 수 있는 시스템을 설계하였다.

구현된 프로토타입 시스템을 통해 다양한 변조 방식으로 송수신을 진행하며 통신 성능을 측정하였고, 정지한 물체에 대한 센싱 성능 또한 실험적으로 검증하였다. 또한, 하드웨어에서 수집된 데이터를 소켓 통신을 통해 서버로 전송하고, 고성능 하드웨어가 탑재된 서버에서 이를 처리하여 통신 및 센싱 결과를 시각화하는 대시보드를 구성하였다. 이를 통해 실시간으로 ISAC 시스템을 운용할 수 있는 프레임워크를 구현하였다.

2. 시스템 구성 및 구현

본 연구에서는 Xilinx RFSoc 4x2 보드를 기반으로 기저대역 송수신 처리를 수행하고, 24 GHz의 upper-mid 대역에서 RF 신호 처리를 위해 Sivvers EVK02001 빔포머를 활용하여 ISAC 하드웨어 시스템을 구성하였다. 그림 1은 전체 시스템의 구성도를 나타낸다.



(그림 1) ISAC 프로토타입의 시스템 구성도.

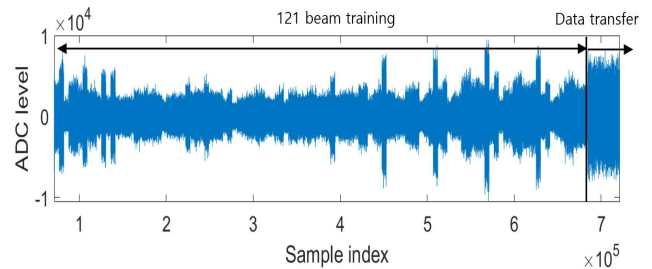
전체 시스템은 software-defined radio(SDR) 구조로 설계되어, 신호 대역폭, 처리 방식, 실시간 제어 등을 하드웨어 변경 없이 소프트웨어적으로 처리할 수 있어, 높은 수준의 유연성을 제공한다.

RFSoc의 programmable logic(PL) 영역에는 프레임 동기 검출, 빔 전환 제어 등과 같은 실시간 처리가 필요한 기능들을 하드웨어 IP 블록 형태로 구현하였다. PL은 processing system(PS)과 RF Data Converter(RFDC) 간 데이터 흐름을 제어하는 한편, 빔포머 제어와 같은 주요 기능을 수행하고, 실시간성이 요구되는 데이터 송수신 흐름을 안정적으로 관리한다. 구체적으로, PS에서 생성한 송신 데이터를 FIFO 버퍼를 통해 RFDC로 전달하고, 수신 측에서는 ADC로부터 디지털화된 데이터를 받아 이를 PS로 넘기기까지의 모든 고속 신호 흐름을 책임진다. 이러한 구조는 실시간성이 요구되는 기능을 하드웨어에서 신속하게 처리하고, 시간 민감도가 낮은 고속 DSP 연산은 PS에서 소프트웨어로 수행하도록 기능을 분산하기 위한 것이다.

PS 영역의 임베디드 ARM 코어에서는 OFDM 프레임 생성, 채널 추정 등의 DSP 알고리즘을 소프트웨어 기반으로 수행하였다. RFSoc의 고속 ADC/DAC를 통해 수집된 데이터는 AXI 인터페이스를 통해 실시간으로 메모리에 저장되며, PS에서 이를 읽어 처리함으로써 PL-PS-RFDC 간의 동기화된 동작을 가능하게 하였다. 시스템 제어는 Python 기반으로 하드웨어 제어 및 통신을 가능하게 하는 Xilinx의 오픈소스 프레임워크인 PYNQ를 활용하였으며, Jupyter 노트북 환경에서 구동됨으로써 송수신 제어, 데이터 수집 및 처리 과정을 통합적으로 수행할 수 있도록 구성하였다.

3. OFDM 프레임 구조

구현된 ISAC 시스템에서 사용되는 프레임 구조는 기존 통신 시스템에서 널리 사용되는 OFDM 파형을 기반으로 하며, 전체 프레임은 크게 프리앰블, 데이터 페이로드, 빔 트레이닝의 세 구간으로 구성된다. 그림 2는 실제 수신된 프레임에 대해 ADC로 측정된 값을 보여준다.



(그림 2) 전체 프레임 구조.

프레임의 시작부에서는 IEEE 802.11 표준에서 정의된 동기화 구조를 따라, short training sequence(STS)와 long training sequence(LTS)로 구성된 프리앰블을 이용하여, 송수신 하드웨어가 분리되어 있는 바이스태틱 시나리오에서 시간 및 주파수 동기화를 수행한다[3]. 반면, 단일 RFSoc 내에서 송수신이 이루어지는 모노스테틱 구조에서는 내부 PL 라우팅을 통해 로컬 동기화를 수행할 수 있도록 설계하였다.

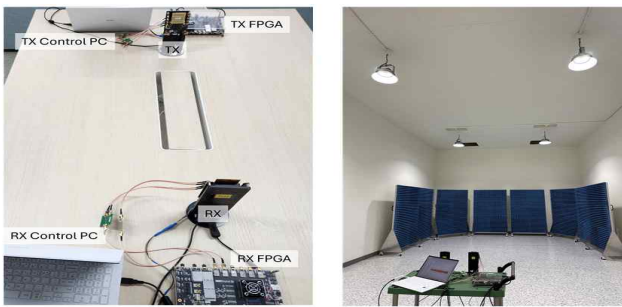
프레임의 두 번째 구간은 빔 트레이닝으로, 송신기와 수신기의 빔포밍 벡터를 사전에 정의된 코드북에 따라 순차적으로 전환하며 다양한 빔 조합에 대한 채널 응답을 측정한다. 본 구현에서는 송신 11개, 수신 11개의 빔을 조합하여 총 121가지 빔 쌍을 구성하였으며, 각 조합에 대해 파일럿 신호를 전송함

으로써 수신 신호 세기뿐만 아니라 전파 지연 시간과 같은 채널 파라미터를 추정할 수 있도록 하였다. 이와 같이 다각도에서 수집된 채널 정보는 최적의 빔 조합 선정에 위한 통신 기능뿐 아니라, 주변 환경의 센싱 기능에도 활용될 수 있으며, 빔 트레이닝을 통해 얻은 각도별 채널 응답 데이터를 바탕으로 별도의 레이더 신호 없이도 주변 물체의 존재 여부나 거리 및 방향 등을 추정할 수 있다.

마지막 데이터 구간에서는 다수의 OFDM 심볼을 통해 변조된 데이터를 전송하며, 이 중 첫 번째 심볼은 파일럿 심볼로 설정되어 채널 추정에 활용된다. 수신단은 해당 파일럿을 기반으로 least squares (LS) 기법을 적용하여 채널 응답을 추정하고[4], 이후 심볼에 대해 등화 및 복조를 수행하여 원래 데이터를 복원한다.

4. 클라이언트-서버 기반 실시간 처리 시스템

RFSoc 보드의 PS는 처리 성능이 제한적이므로, 실시간 데이터 수집 및 고속 분석을 위해 클라이언트-서버 기반 분산 구조를 채택하였다. 수신된 디지털 샘플 데이터는 PS를 통해 이더넷 인터페이스로 외부 서버에 실시간으로 전송되며, 서버에서는 이를 바탕으로 복조, 채널 추정 및 고해상도 센싱 분석을 수행한다. 해당 서버는 RFSoc로부터 데이터를 소켓 통신으로 수신하고, 오픈소스 Dash 프레임워크를 통해 결과를 시각화한다. 이와 같은 구조를 통해 RFSoc 보드의 하드웨어 제약을 극복하면서도 전체 시스템의 실시간 처리가 가능하도록 구성하였다.



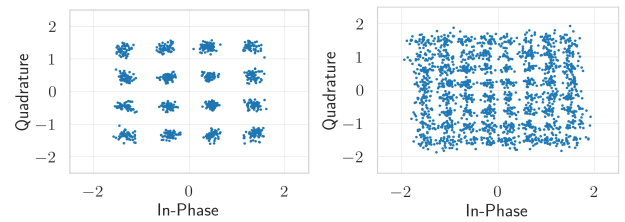
(그림 3) ISAC 프로토타입 성능 검증 실험:
(좌) 통신 성능 검증, (우) 무향실 환경 센싱 성능 검증.

5. 실험 및 성능 검증

ISAC 프로토타입의 성능을 검증하기 위해 실험을 통해 통신 성능 및 센싱 성능을 평가하였다. 그림 3은 통신 및 센싱 성능을 검증하기 위한 실험 환경을

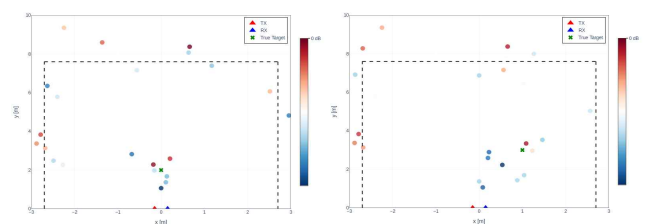
보여준다.

먼저, 통신 성능 검증은 서로 분리된 송수신단이며 보고 있는 상태에서 설계된 OFDM 프레임을 사용하여 데이터 송신하여, 수신단에서는 복조된 성상도를 분석하여 통신 품질을 평가하였다. 그림 4는 16-QAM 및 64-QAM 변조 방식을 사용하여 복원된 성상도를 보여준다. 본 실험을 통해 설계된 하드웨어의 무선 환경에서의 신호 전송 성능을 확인하였고, 다양한 SNR 조건에 따른 변조 방식 적용의 가능성도 검증하였다.



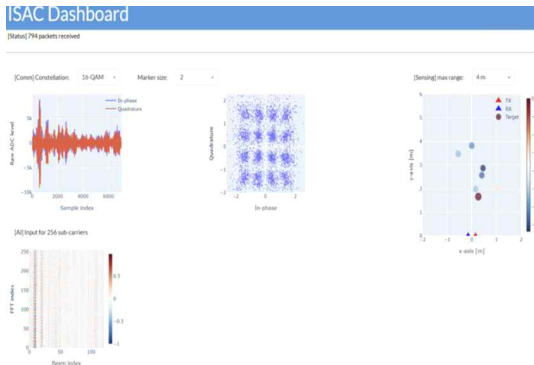
(그림 4) 16-QAM(좌) 및 64-QAM(우) 변조 방식의 성상도.

센싱 성능 검증은 실내 환경에서 서 있는 인체의 위치를 감지하는 방식으로 진행하였다. 우선, 각 빔 조합에서 얻은 channel frequency response(CFR)를 inverse fast Fourier transform(IFFT)하여 channel impulse response(CIR)를 계산하고, 해당 CIR에서 가장 큰 피크의 위치를 찾아 전파 지연 시간을 산출하여 거리를 추정하였다. 이때, 시스템 샘플링 주파수인 491.52 MHz에 의해 시간 해상도가 약 2.034 ns로 제한되며, 이는 약 61 cm의 해상도에 해당한다. 추정된 전파 지연과 함께 최대 수신 전력을 기록한 송수신기 빔 인덱스를 각각 출발각과 도착각으로 매핑하여 2차원 타깃 위치를 계산하였다. 본 연구에서는 빔포머 제조사가 제공하는 코드북에서 11×11개의 빔(-45°~45°, 9° 간격)을 사용하였으며, 각 경로마다 세기가 강한 빔 쌍만을 선택하여 빔 패턴 오차와 사이드로브 영향을 최소화하였다.



(그림 5) 인체 대상에 대한 센싱 실험 결과:
(좌) (0 m, 2 m) 위치, (우) (1 m, 3 m) 위치.

(그림 5)에서는 서 있는 대상의 실제 위치와 센싱 결과를 비교한 내용을 보여준다. 그림에서 검은색 점선은 흡음판의 위치를 나타내며, 초록색은 사람이 실제로 서 있는 위치(정답)를 나타낸다. 결과적으로 실제 위치 주변에 강한 신호 성분이 집중된 것을 확인할 수 있었으며, 이는 센싱이 정확히 이루어졌음을 나타낸다. 이를 통해 제작된 ISAC 하드웨어가 통신과 센싱을 동시에 수행할 수 있음을 입증하였다.



(그림 6) 실시간 ISAC 대시보드.

마지막으로, 구축한 시스템의 실시간 운용 능력을 확인하기 위해 서버 통신 기반으로 대시보드를 구현하고, 이를 통해 실시간 모니터링을 진행하였다. RF SoC 장치와 센싱 대상 환경을 구성한 후, 수집된 신호를 서버로 연속 전송하고, 서버에서 이를 처리하여 통신 및 센싱 결과를 대시보드에 실시간으로 표시할 수 있도록 하였다. 그 결과, 프레임 단위로 통신 데이터가 큰 손실 없이 전송되었으며, 빔 트레이닝을 통해 계산된 센싱 정보가 프레임마다 업데이트되어 표시되는 것을 확인할 수 있다. 이는 제안된 시스템이 실시간 환경에서도 정상적으로 동작할 수 있음을 의미한다.

6. 결론

본 연구에서는 6G ISAC 기술의 실험적 검증을 위한 RFSoc 기반 HW/SW 프로토타입을 개발하고, 이를 실험 환경에서 통신과 센싱 성능을 평가하였다. 제안된 시스템은 24 GHz 대역에서 동작하는 RFSoc 기반의 무선 송수신 플랫폼을 활용하였으며, 단일 OFDM 프레임 내에서 데이터 통신과 주변 환경 센싱을 동시에 수행한다.

실험 결과, 16-QAM, 64-QAM 등 다양한 변조 방식에서 준수한 통신 성능을 보였으며, 센싱 성능

또한 정지한 물체에 위치를 감지할 수 있음을 확인하였다. 또한, 실시간 클라이언트-서버 기반 처리 시스템을 통해 수집된 데이터를 실시간으로 처리하고 시각화할 수 있는 대시보드를 구현하여 실제 무선 환경에서의 ISAC 운용을 가능하게 했다. 본 연구는 ISAC 기술의 상용화를 위한 중요한 기초 자료를 제공하며, 향후 6G ISAC 시스템 개발에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] J. A. Zhang, F. Liu, C. Masouros, R. W. Heath, Z. Feng, L. Zheng, A. Petropulu, "An Overview of Signal Processing Techniques for Joint Communication and Radar Sensing," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 제15권, 제6호, p. 1295 - 1315, 2021.
- [2] M. Na, J. Lee, G. Choi, T. Yu, J. Choi, J. Lee 외, "Operator's Perspective on 6G: 6G Services, Vision, and Spectrum," *IEEE Communications Magazine*, 제62권, 제8호, pp. 178 - 184, 2024.
- [3] T. Schmidl, D. Cox, "Robust Frequency and Timing Synchronization for OFDM," *IEEE Transactions on Communications*, 제45권, 제12호, pp. 1613 - 1621, 1997.
- [4] Y. Liu, Z. Tan, H. Hu, L. J. Cimini, G. Y. Li, "Channel Estimation for OFDM," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 제16권, 제4호, pp. 1891 - 1908, 2014.

사사

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00210463).