

아날로그 빔 조향을 이용한 단일 RF chain 기반 소프트웨어 정의 디지털 레이더 구현 및 검증

류승하, 신현준, 최정식
경북대학교

seungha.ryu@knu.ac.kr, guswns0467@knu.ac.kr, jeongsik.choi@knu.ac.kr

Implementation and verification of software-defined digital radar based on single RF chain using analog beam steering

Seungha Ryu, Hyeonjun Shin, Jeongsik Choi
Kyungpook National Univ.

요약

일반적으로 레이더 시스템은 각도 추정을 위하여 다중 안테나를 활용하여, 이는 다수의 RF chain을 필요로 하여 시스템의 복잡도를 증가시킨다. 본 연구에서는 아날로그 빔 조향을 적용하여 단일 RF chain으로도 전방 타겟의 거리, 속도 및 각도를 추정하여 구현 복잡도와 비용을 큰 폭으로 줄이는 연구를 수행하였다. 구체적으로 Xilinx RFSoC (Radio Frequency System on Chip)와 밀리미터파 빔포머 (Beamformer) 모듈을 활용하여 임의의 파형 송수신이 가능한 소프트웨어 정의 디지털 레이더를 구현하였다. 실내의 실험에서는 자가 상관 특성이 높은 시퀀스를 활용하는 PMCW (Phase-Modulated Continuous Wave) 레이더의 동작을 검증하였으며, 다중 타겟의 거리, 속도, 각도를 추정할 수 있음을 검증하였다.

I. 서론

최근 자율주행, IoT, 실내 모니터링 등 다양한 환경에서 레이더 센서의 활용도가 급증함에 따라, 다수의 레이더가 공존하는 환경에서의 상호간섭 문제가 심각한 기술적 과제로 대두되고 있다. 기존 FMCW (Frequency-Modulated Continuous Wave) 레이더는 구현이 간단하다는 장점이 있으나, 간섭에 근본적으로 취약하다는 한계를 가진다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 자가상관 특성이 우수한 시퀀스를 활용하는 PMCW (Phase-Modulated Continuous Wave) 레이더가 그 대안으로 주목받고 있다 [1], [2].

한편 어떠한 변조 방식을 사용하든지 상관없이 레이더 시스템이 타겟의 3차원 공간 정보를 추정하기 위해서는 다수의 수신 안테나를 활용한 도래각 추정이 필수적이다. 우수한 각도 분해능을 달성하기 위하여 디지털 빔포밍 방식이 활용되고 있지만, 해당 방식은 각 안테나마다 독립적인 RF chain 및 ADC (Analog-to-Digital Converter) 모듈을 필요로 하여 시스템의 복잡도와 비용을 증가시키는 요인이 된다. 이러한 문제는 초광대역의 신호 송수신이 필요한 PMCW 레이더 시스템에서 더욱 심각한 문제를 발생시킨다.

본 논문에서는 각도 추정의 복잡도를 대폭 줄이기 위하여 단일 RF chain 구조를 갖는 소프트웨어 정의 레이더 시스템을 제안한다. Xilinx RFSoC (Radio Frequency System on Chip) 모듈을 활용하여 기저대역에서 임의의 광대역 신호를 송수신하는 시스템을 설계하고, 밀리미터파 대역에서 동작하는 빔포머 (Beamformer)를 이용하여 신호의 송수신과 동시에 아날로그 방식으로 송수신 빔이 조향 되도록 설계하였다.

실내외 실험을 통해 제안된 시스템의 성능을 검증하였으며, 거리, 속도 추정 외에 각도 추정이 가능해짐에 따라 다중 타겟의 검출이 가능하다는 것을 확인하였다. 또한 아날로그 빔의 부엽 (Sidelobe)에 의해 발생하는 고스트 타겟 문제에 대해서도 고찰한다.

II. 시스템 구현

A. 하드웨어 플랫폼 및 RF 프론트엔드 구성

그림 1은 제안하는 시스템의 블록 다이어그램을 보여준다. 기저 대역 신호 처리를 위하여 RFSoC 4x2 보드를 활용하였으며 소프트웨어 영역 (Processing System)에서 송신 파형을 생성하여 하드웨어 영역 (Programmable Logic)으로 전달하면 RFDC (RF Data Converter)를 통하여 신호 송신이 되며, 반대로 RFDC에서 수집한 수신 신호가 하드웨어 영역을 통하여 소프트웨어 영역으로 전달되도록 구성하였다.

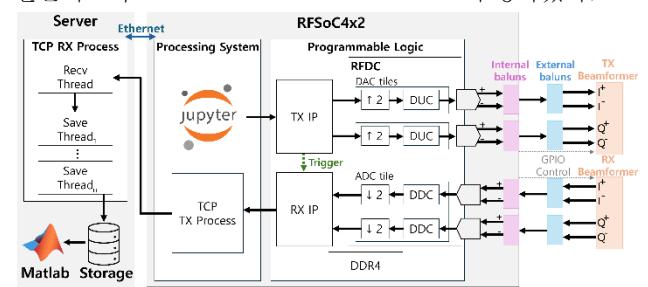


그림 1. RFSoC기반 PMCW 레이더 구현 다이어그램

아날로그 빔 조향을 위하여 RF Front-End에서는 60 GHz 대역에서 동작하는 Sivers사의 EVK06002 빔포머

모듈을 통합하였다. 빔포머 모듈에 차동 아날로그 신호를 전달하기 위하여 외부 balun들을 연결하였으며, balun들의 통과대역 특성을 고려하여 송수신 신호들을 1GHz의 IF (Intermediate Frequency) 대역으로 변환하였다.

고속으로 동작하는 신호의 송수신과 빔 조향을 완벽하게 동기화하기 위해 하드웨어 영역에서 빔을 제어하는 FSM (Finite State Machine) 기반 블록을 구현하였으며 빔 제어 신호를 GPIO (General Purpose Input/Output) 포트를 이용하여 빔포머에 전달하였다. 빔포머에서는 사전 정의된 빔복을 GPIO신호를 통해 인덱싱 함으로써 아날로그 빔 조향이 수행된다.

B. 소프트웨어 정의 기반 운용 및 신호처리

시스템의 제어 및 과정생성은 소프트웨어 영역에서 Python 언어를 기반으로 수행된다. 시스템은 신호 송신을 위하여 자가상관 특성이 우수한 m-sequence (maximum length sequence)를 생성하였으며, 특히 고해상도 거리추정 및 대역폭 최적화를 위하여 디지털 RRC (Root Raised Cosine) 필터를 적용하였다. 구체적인 파라미터는 표 1에 정리하였다. 수신된 신호는 TCP/IP 연결을 통해 실시간으로 서버로 전송되며, 이후 서버에서 레이더 파라미터 추정을 위한 연산을 수행한다.

System parameters	Values
Center frequency [GHz]	62.64 + IF
Intermediate Frequency [GHz]	1
Chip rate [MHz]	500
Chip length	1023
Roll-off Factor	1
Upsampling Factor	4
Sampling Rate [GHz]	4
DAC/ADC Rate Conversion	2

표 1. 구축된 레이더 시스템 파라미터

III. 실내외 측정 실험 결과

제안되는 시스템의 검증을 위하여 실내외 환경에서 실험을 진행하였으며, 송수신 빔을 각각 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 의 범위에서 63개의 빔으로 조향하여 약 1.45° 의 이론적 각도 분해능을 달성하였다.

A. 실내 정적 환경 실험 결과

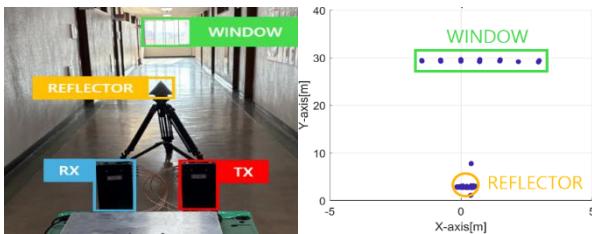


그림 2. 실내 실험 환경(좌) 및 결과(우)

그림 2는 실내 실험 환경 및 결과를 보여준다. 정적인 복도 환경에서 송수신기 정면에 높은 RCS (Radar Cross Section)를 가지는 반사체 (Reflector)를 배치하여 레이더의 거리 및 각도 추정 성능을 검증하였다.

아날로그 빔 조향이 수행됨에 따라 동일한 환경에서 서로 다른 송수신 빔 조합에 대해 신호가 수신된다. 각 타겟의 각도를 추정하기 위하여 다수의 빔 조합에

대하여 신호가 크게 측정된 빔 조합을 선택함으로써 타겟의 각도를 추정하는 방식을 적용하였다.

실험 결과, 바닥 또는 벽에 의한 반사로 인하여 클러터가 많은 환경임에도 높은 신호 세기가 측정된 빔 조합들을 선택함으로써 타겟의 거리와 위치를 추정할 수 있음을 확인하였다. 또한 실험 결과에서는 임의로 설치한 반사체 외에 레이더에서 29m 거리에 위치한 복도 끝 창문에 의한 반사도 측정할 수 있음을 확인하였다. 다만, 탐지되는 반사체와 창문의 point cloud가 x축으로 퍼지는 현상이 관측되었는데, 이는 빔 패턴의 부엽이 야기하는 고스트 타겟에 의한 영향으로 판단된다.

B. 실외 동적 환경 실험 결과

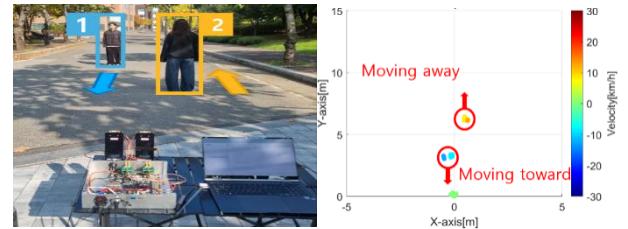


그림 3. 실외 실험 환경(좌) 및 결과(우)

그림 3은 실외 환경에서 두 명의 보행자 타겟이 서로 반대방향으로 이동하는 동적 시나리오와 해당 환경에서의 실험 결과를 보여준다. 속도 추정을 위하여 각 빔 조합에서 자가상관 및 2D-FFT (Two-Dimensional Fast Fourier Transform)를 수행하였다. 보행자 타겟들의 속력값과 방향을 정확하게 추정함으로써 제안하는 시스템이 다중 타겟의 거리, 속도, 각도 추정이 모두 가능함을 확인하였다.

III. 결론

본 연구에서는 단일 RF chain 기반 소프트웨어 정의 PMCW 레이더를 구현하고, 실내외 실험을 통해 다중 타겟의 3D 파라미터 추정 가능성을 입증하였다. 제안된 시스템은 광대역 신호 송수신 환경에서 하드웨어 복잡도를 획기적으로 낮추면서도 유효한 탐지성능을 보였으나, 아날로그 빔의 부엽에 의한 문제가 확인되었다. 향후 연구에서는 탐지 정확도를 더욱 높이기 위해 신호처리 기반의 부엽에 의한 고스트 타겟 억제 기술을 중점적으로 다룰 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00415938, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

참 고 문 헌

- [1] A. Bourdoux, U. Ahmad, D. Guermandi, S. Brebels, A. Dewilde, and W. Van Thillo, "Pmcw waveform and mimo technique for a 79 ghz cmos automotive radar," in Proc. IEEE Radar Conf. (RadarConf), 2016, pp.1–5.
- [2] J.-H. Park, D. Ham, J. Choi, S. Lee, and S.-C. Kim, "Compressive sensing-based demultiplexing of fast-time CDM-MIMO PMCW radar signals for self-code interference cancellation," IEEE Internet Things J., 2025.