

SDR 기반의 광대역 OFDM 송수신기를 이용한 단방향 거리 추정 성능 분석

안현선, 하영훈, 이종욱, 최정식

경북대학교 전자전기공학부

gustjs1882@knu.ac.kr, gghh1073@knu.ac.kr, lju0621@knu.ac.kr, jeongsik.choi@knu.ac.kr

Analysis of Distance Estimation Performance in One-Way Systems Using SDR-Based Wideband OFDM Transceivers

An Hyeon Seon, Ha Young Hun, Lee Jong Uk, Choi Jeong Sik

Kyungpook National Univ.

요약

본 논문에서는 최근 정의된 Wi-Fi 7 표준을 고려하여 최대 320 MHz 대역폭의 OFDM 신호를 송수신하여 두 기기 간 단방향 거리를 추정하는 방식에 대해 연구하였다. 이를 위하여 기 구축된 SDR (Software-defined radio) 기반 송수신기의 하드웨어를 수정하여 송신기에서는 패킷을 전송할 때 clock 정보를 포함하도록 하였으며, 수신기에서는 해당 정보를 복조한 후 자신의 clock 정보와 차이를 구한 후 추정된 OFDM 채널 상태에서 다중경로의 첫 번째 경로 성분의 시간을 추출하여 보정하는 방식으로 구현하였다. 실제 실험을 통하여 단방향 거리 추정이 가능함을 검증하였고 단방향 거리 추정값에는 송수신기 사이의 비동기로 인한 거리 오프셋과 clock 속도 차이에 의한 clock drift 성분이 포함되는 것을 확인하였으며, 이를 보정한 결과 거리 추정 성능을 높일 수 있음을 보였다.

I. 서론

여러 위치 기반 서비스에서 정밀한 위치 정보를 요구함에 따라 무선 표준에서는 단말의 위치를 추정하기 위한 거리 추정, 각도 추정 등의 방법을 정의하고 있으며, 특히 Wi-Fi에서는 IEEE802.11-2016 표준에서 두 기기 간 왕복 여행 시간을 측정하여 거리를 추정하는 FTM (Fine timing measurement) 프로토콜을 정의하였다. 기존에는 Wi-Fi의 비교적 좁은 대역폭 (예: 20, 40, 80 MHz) 때문에 정밀한 거리 추정이 어려웠지만, 최근 Wi-Fi 7으로 불리는 IEEE 802.11be 표준에서 최대 320 MHz 대역폭의 신호 송수신이 정의되면서 UWB를 이용한 거리 추정 정확도와 유사한 수준의 정확도 달성이 가능할 것으로 예상되고 있다.

본 연구에서는 OFDM 신호를 송수신하여 송수신기 사이의 단방향 거리를 추정하는 방법에 대해 연구하였으며 Wi-Fi 7 표준을 고려하여 최대 320MHz 대역폭의 신호를 송수신하는 RFSoc (Radio frequency system on chip) 기반의 송수신기를 활용하였다 [1]. 거리 추정을 위하여 해당 송수신기의 하드웨어를 수정하여, 송신기에서 패킷을 송신할 때 clock 정보를 실시간으로 OFDM 심볼로 합성하여 송신한 후 수신기에서는 이를 수신하여 단방향 거리 추정이 가능하도록 구성하였다. 6 GHz 비면허 대역에서 거리 추정 실험을 수행한 후 결과를 분석하였다.

II. 본론

2.1 거리 추정을 위해 개선된 송수신 하드웨어 구조

그림 1은 본 연구에서 사용한 송수신 하드웨어 구조를 보여준다. 기 구축된 송수신 하드웨어에서 거리 추정을 위하여 송신 IP (Intellectual property) 및 수신 IP에 clock 정보를 기록하는 clock timer를 포함하여 하드웨어의 clock 속도인 320 MHz 속도로 동작하도록 구성하였다. 송신 IP에서는 소프트웨어 영역인 PS (Processing system)에서 패킷 송신을 요청하는 순

간 Online preamble generation 블록에서 Wi-Fi 신호의 Legacy STF (Short-training field) 및 LTF (Long-training field)를 실시간으로 합성하는 동시에 현재의 clock 정보를 OFDM 심볼로 변환한다. 이후 해당 신호는 PS에서 합성된 OFDM 송신신호와 함께 패킷을 구성하여 송신된다.

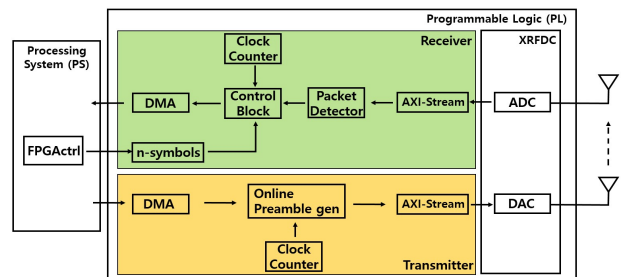


그림 1 거리 추정을 위한 송수신기 하드웨어 구조.

수신 IP에서는 ADC를 통해 디지털 신호 샘플을 획득한 후 Packet Detector 블록에서 Schmid & Cox 알고리즘을 적용하여 패킷의 STF를 식별하며 식별된 이후 수집된 샘플을 PS로 전송한다 [2]. 이때 패킷을 식별할 당시의 수신 IP clock 정보를 PS에 같이 전송하여 소프트웨어 영역에서 거리 추정을 수행하도록 구성하였다.

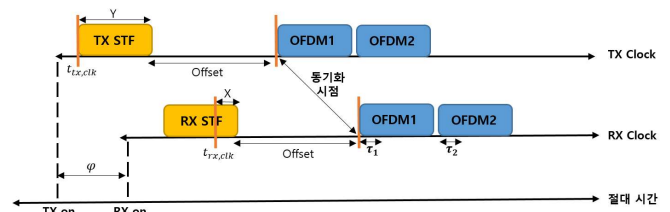


그림 2 패킷 송수신 타이밍.

2.2 거리 추정 신호처리 기법

그림 2는 패킷의 송수신 타이밍을 나타낸다. Legacy STF를 이용하여 패킷의 시작점을 검출하는 경우 STF의 중간지점부터 검출이 이루어지기에 PS에서는 수신신호의 에너지를 모니터링하여 STF 수신에 종료되고 GI (Guard interval)이 시작되는 지점을 한 번 더 정밀하게 검출한다. 패킷 수신으로부터 GI가 종료되는 지점까지의 clock을 X 로, STF의 길이를 clock으로 환산한 값을 Y 로 정의하면 보정된 수신 clock은 아래와 같이 표현된다.

$$\tilde{t}_{rx,clk} = t_{rx,clk} + X - Y. \quad (1)$$

위 식에서 $t_{rx,clk}$ 는 패킷이 검출될 때의 수신기 clock을 나타낸다. 이후 수신 패킷에서 송신 clock을 복조한 값을 $t_{tx,clk}$ 라고 하면 송수신기 사이의 단방향 시간 측정값은 아래와 같이 계산된다.

$$\Delta t = (t_{tx,clk} - \tilde{t}_{rx,clk}) T_s + \tau_1. \quad (2)$$

위 식에서 $T_s=1/320$ MHz로 clock 속도의 역수로 정의되며 τ_1 은 송수신기 사이의 다중경로 채널 성분 중 첫 번째 성분의 지연시간으로 OFDM 채널 추정된 결과에서 획득할 수 있다.

본 연구에서는 송수신기가 동기화되지 않은 일반적인 상황을 고려하기 때문에 수식 (2)에는 비동기에 의한 거리 오프셋과 송수신기의 clock 속도 차이에 의해 발생하는 clock drift 성분이 포함되어 있다. 따라서 송수신기 사이의 실제 거리 d 에 대하여 측정된 단방향 시간 측정값은 아래와 같이 모델링 될 수 있다.

$$\Delta t = d/c + \varphi + \alpha t_{rx,clk}. \quad (3)$$

위 식에서 c 는 전자기파의 속도, φ 는 송수신기의 절대시간 차이, α 는 clock drift를 나타낸다. 마지막으로 다중경로의 채널을 추정하기 위하여 송신기에서는 Legacy LTF 외에 송신 대역폭에 맞는 LTF를 송신하고 수신기에서는 해당 신호를 수신하여 OFDM 채널 추정 과정을 수행한다. 추정된 채널에서 다중경로 신호를 추출할 수 있으며, 본 연구에서는 최대 320 MHz를 고려하기에 구현이 용이한 FFT 기반의 채널 임펄스 응답 추정 과정을 수행한다.

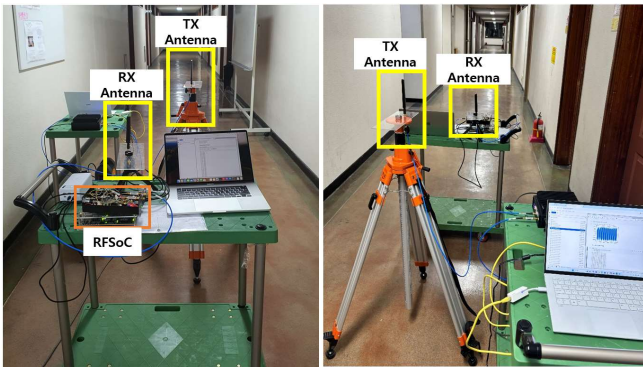


그림 3 송수신 거리 측정 실험.

2.3 실험 결과 및 분석

구현한 송수신기의 동작을 분석하기 위해 PS 단에서는 신호 생성 및 복조를 위해 PYNQ 플랫폼을 활용하였으며 [3], 실험에서 사용한 송수신기 안테나 및 실험 사진은 그림 3과 같다. 송신기는 direct RF 방식으로 6.425 GHz의 신호를 송신하였고, 최대 4.8 GHz의 샘플링 속도를 가진 수신기는 수신신호를 하향 변환하여 샘플링을 수행하였다. 또한 대역폭별 채널 추정의 정확도를 분석하기 위해서 20, 40, 80, 160, 320 MHz의 대역폭을 가지는 LTF를 순차적으로 송신하여 채널 추정을 수행하였다. 각 대역

폭에서 채널 추정을 통해 얻은 지연시간을 반영하여 송수신기의 전송 시간을 계산하였고, 대역폭에 따라 나노초(ns) 단위의 지연시간 추정이 가능하였다. 이를 통해 더욱 정확한 전송 시간을 획득할 수 있었다.

그림 4(좌)는 거리마다 10회씩 실험을 수행하여 얻은 단방향 시간 측정값을 정규화한 결과를 나타낸다. 이를 통해 예측한 전송 시간이 거리에 비례하여 선형적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 또한, 식 (3)에 따라 수신된 측정값에 포함된 clock drift를 송수신기의 개별 clock 기율기로 보정하여 drift 보정 전후의 결과를 비교 분석하였다. 계산된 drift의 분포는 그림 4(우)와 같으며, 이를 통해 수신기의 시간에 대해 10회 반복 실험한 모든 clock drift의 분포를 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 이러한 반복 실험과 drift 보정을 통해 전송 시간 추정의 시간 해상도를 μs (마이크로초)에서 ns (나노초) 수준으로 향상하여 거리 추정의 정확도를 높일 수 있음을 확인하였다.

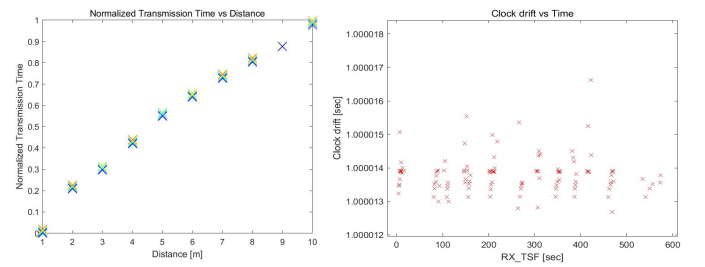


그림 4 거리별 전송 시간 변화(좌) 및 clock drift 분석(우).

III. 결론

본 연구에서는 새로운 Wi-Fi 표준 기반의 320MHz 대역폭에서 직접 신호를 송수신하는 RFSoc 기반 SDR 방식의 장비를 개발하였다. 단방향 통신 방식을 통해 송수신 장치 간의 거리를 추정하고 분석한 결과, 설계한 시스템이 원활히 작동하며 거리가 증가함에 따라 전송 시간도 함께 증가하는 경향이 있음을 확인하였다. 또한, 반복 실험을 통해 drift 보정을 수행하여 전송 시간 추정의 시간 해상도를 마이크로초에서 나노초 단위로 향상할 수 있었다. 이를 통해 OFDM 파형을 활용한 광대역 및 Wi-Fi 7 환경에서의 사용 가능성을 검증하였다. 추후에는 drift를 반영한 절대적인 거리 변화 값의 획득을 통해 정확도를 높이고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참고 문헌

- [1] H. An, Y. Ha, and J. Choi, "RFSoc-Based Wideband OFDM Transceiver Design", Submitted to The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, 2024.
- [2] T. M. Schmidl and D. C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," in IEEE Transactions on Communications, vol. 45, no. 12, pp. 1613-1621, Dec. 1997.
- [3] PYNQ: Python Productivity, (<https://www.pynq.io/>).