

ESP32 기반 Wi-Fi SoC에서 FTM 프레임의 CSI 추출 연구

이종욱, 하영훈, 김주원, 최정식
경북대학교 전자전기공학부

lju0621@knu.ac.kr, gghh1073@knu.ac.kr, joowonk0317@knu.ac.kr, jeongsik.choi@knu.ac.kr

Study on CSI Extraction from FTM Frames on an ESP32-Based Wi-Fi SoC

Lee Jong Uk, Ha Young Hun, Kim Joo Won, Choi Jeong Sik
Kyungpook National Univ.

요약

Wi-Fi 기기간 정밀한 거리 추정을 위하여 IEEE 802.11mc 표준에서 FTM (Fine Timing Measurement) 프로토콜을 정의하고 있으나, 상용 칩의 경우 칩 내부에 구현된 알고리즘이 적용된 거리 측정 값만 활용할 수 있어 정밀 거리 추정 연구에 제약이 따른다. 따라서 본 논문에서는 ESP32 기반 Wi-Fi SoC (System-on-Chip)에서 거리 추정에 사용되는 FTM 프레임의 CSI (Channel State Information)를 실시간으로 추출하는 시스템을 연구하여 추후 새로운 거리 추정 알고리즘의 연구가 가능하도록 하였다. ESP-IDF의 CSI 수집 API와 FTM 프레임 식별 기법을 이용하여, FTM으로 얻은 거리 측정 값과 CSI를 추가 오버헤드 없이 동시에 수집할 수 있음을 보였다. 구현한 시스템의 LOS/NLOS 환경 실험 결과, 주파수 응답 특성의 차이가 관찰되었으며, 이는 자원 제약적인 Wi-Fi SoC에서도 FTM과 CSI를 결합한 위치 추정 기법 설계가 가능함을 시사한다.

I. 서 론

최근 실내 위치 인식 및 무선 센싱 기술에 대한 관심이 증가함에 따라 Wi-Fi 기반 측위 기술이 다양한 응용 분야에서 주목받고 있다. Wi-Fi 비콘 신호를 수신하여 획득 가능한 RSS (Received Signal Strength) 값은 쉽게 이용 가능하다는 장점이 있으나, 환경 변화 등 다양한 요소에 의해 결정되어 정밀한 측위에 활용되기 어렵다는 단점이 존재한다. 이를 보완하기 위해 CSI (Channel State Information)를 활용한 환경 인식 및 위치 추정 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]. CSI는 무선 채널의 주파수 응답을 나타내는 정보로서, 다중경로 특성, LOS/NLOS 환경 차이 등 물리적 채널 특성을 구분할 수 있어 정밀한 측위 시스템 개발로 이어질 수 있다. 이를 확보하기 위하여 Wi-Fi 시스템에서는 송수신기가 동시에 알고 있는 시퀀스 (예: 프리앰블의 LTF (Long Training Field))를 송수신한다.

한편 Wi-Fi를 활용한 측위 연구가 활발하게 진행됨에 따라 IEEE 802.11mc 표준에서는 FTM (Fine Timing Measurement) 프로토콜을 정의하여 두 기기간 교환을 통하여 RTT (Round Trip Time)를 측정할 수 있도록 하였다. 상대 기기에서 송신된 프레임의 도달 시간을 측정하기 위하여 각 기기에서는 CSI를 먼저 추정하고 이로부터 시간 정보를 추출한다. 또한 Wi-Fi 신호의 송신 대역폭이 비교적 좁기 때문에 (예: 20 MHz) 고해상도 추정 알고리즘을 적용하여 정밀한 시간을 측정한다. 하지만 상용 Wi-Fi 장비의 경우 각 제조사가 적용한 알고리즘의 결과인 RTT 값만 제공하고 있어 CSI를 활용한 개선된 알고리즘 연구에 제약이 존재한다. 이를 보완하기 FTM 거리 측정과, CSI를 획득하는 두 종류의 기기를 동시에 활용하여 RTT 값과 CSI를 획득하려는 시도가 제안되었다 [2].

본 논문에서는 FTM 프로토콜에서 거리 추정에 사용되는 프레임의 CSI를 획득하는 시스템을 구현하여, 제조사가 제공하는 거리 측정 값과, 해당 값을 산출하기 위하여 사용한 원천 정보인 CSI를 동시에 획득할 수 있는 시스템을 제안한다. 이를 위하여 ESP32 기반 Wi-Fi SoC를 활용하였으며, 제안한 시스템에서 획득한 거리 측정 값과 CSI 값의 차이를 LOS 및 NLOS 환경에서 비교함으로써 정상적으로 동작함을 확인하였다.

II. 시스템 구현

본 연구에서는 ESP32-S3 DevKit과 Espressif ESP-IDF 프레임워크를 기반으로, IEEE 802.11mc 표준을 따르는 FTM 프레임 수신 과정에서 CSI를 실시간으로 수집하는 시스템을 구현하였다. 제안하는 시스템은 ESP-IDF에서 제공하는 CSI 수집 API를 활용하여, FTM 프레임 수신 시 PHY 계층에서 프리앰블 내 LTF를 이용해 ESP-IDF 내부에서 추정된 CSI를 획득한다 [3]. 동시에 MAC 계층에서의 수신 프레임 유형을 분석하여 FTM 프레임 여부를 식별한다.

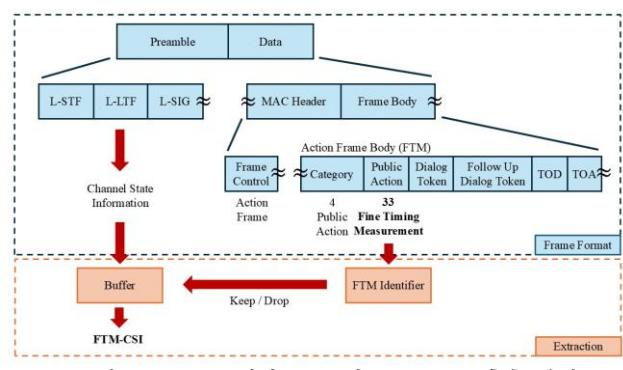


그림 1. FTM 프레임 구조 및 FTM-CSI 추출 방법

그림 1에서 볼 수 있듯이, IEEE 802.11mc 표준에 정의된 Action Frame 형식에 따라, 수신된 프레임의 Action Frame Body에서 Category 필드가 Public Action(4)이고 Action 필드가 FTM(33)인 경우 해당 프레임을 FTM 프레임으로 판별한다 [4]. FTM 프레임으로 식별된 경우에만 ESP-IDF를 통해 획득된 CSI 데이터를 유효 데이터로 저장함으로써, 추가적인 오버헤드 없이 FTM으로 얻은 RTT와 CSI를 동시에 수집할 수 있다.

III. 시스템 실험 환경 및 결과 분석

실험은 그림 2와 같이 Initiator와 Responder 모두 ESP32-S3 Devkit을 사용하였으며, LOS 환경과 직접 경로가 차단되고 반사 성분이 지배적인 NLOS 환경으로 구분하여 실험을 진행하였다. 측정 거리는 1~5 m로 설정하였으며, 각 지점에서 64개의 FTM 프레임과 이에 대응하는 CSI를 수집하였다.



그림 2. FTM 실험 환경

그림 3은 수집된 CSI의 주파수 응답 크기를 시작화한 결과이다. LOS 환경에서는 전 대역에 걸쳐 비교적 평탄하고 안정적인 진폭 분포가 관찰되었다. 반면 NLOS 환경에서는 주파수 선택적 페이딩이 뚜렷하게 나타났으며, 특정 서브캐리어에서 깊은 감쇄가 발생하였다.

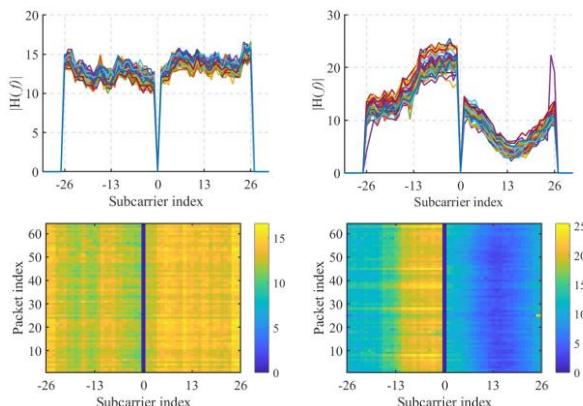


그림 3. LOS(원쪽)/NLOS(오른쪽) 채널 주파수 응답 크기

그림 4는 동일 환경에서 FTM으로 얻은 RTT 측정값을 통해 별도의 보정 과정 없이 추정한 거리를 나타낸 결과이다. LOS 환경에서는 측정값이 오프셋을 가지면서도 거리마다 안정적으로 증가하는 분포를 보여주는 반면, NLOS 환경에서는 큰 양의 편향이 발생하였다. 또한 NLOS 환경에서 측정 오차는 매우 크지만 일부 분산은 LOS와 유사하거나 작게 나타났으며, 이는 FTM으로 추정된 거리 정보만으로는 해당 거리 추정값이 LOS 기반의 유효한 측정인지, 또는 NLOS로 인해 왜곡된 결과인지 판단하기 어려운 상황이 존재함을 보여준다. 이러한 결과는 FTM으로 추정한 거리 정보만으로 정밀한 위치 추정이 어려울 때, 물리적 채널

특성을 포함하는 CSI가 보완적인 정보로 활용될 수 있음을 보여준다.

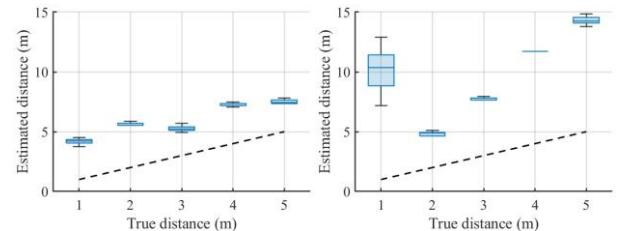


그림 4. LOS(원쪽)/NLOS(오른쪽) 환경에서의 FTM 거리추정 결과

IV. 결론

본 논문에서는 ESP32-S3 Devkit에서 FTM 프레임 수신 과정 중 FTM 프레임의 CSI를 실시간으로 추출하는 시스템을 구현하고 실험을 통해 그 적용 가능성을 확인하였다. ESP-IDF에서 제공하는 CSI 수집 API와 IEEE 802.11mc 표준에 정의된 FTM 프레임 내 활용 가능한 식별자를 이용함으로써, FTM으로 얻은 RTT와 해당하는 CSI를 동시에 수집할 수 있음을 보였다. 이러한 결과는 추가적인 장비 없이도 자원 제약적인 Wi-Fi SoC에서 FTM 프레임의 CSI를 추출하고 활용할 수 있음을 보여준다. 또한, FTM으로 추정한 거리 정보만으로 구분이 어려운 LOS/NLOS 환경에서 CSI가 채널 상태를 설명할 수 있는 유의미한 정보를 포함한다는 것을 실험적으로 확인하였다. 이는 향후 자원 제약적인 장치에서도 FTM과 CSI를 결합한 위치 추정 기법을 설계하기 위한 기초적인 실험적 근거를 제공한다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참고 문헌

- [1] J. Choi, "Sensor-aided learning for Wi-Fi positioning with beacon channel state information," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 21, no. 7, pp. 5251–5264, July 2022.
- [2] K. Jioskeng, G. Jakllari, A. Tchana and A. -L. Beylot, "When FTM discovered MUSIC: Accurate WiFi-based ranging in the presence of multipath," in Proc. IEEE Conf. Comput. Commun., pp. 1857–1866, Toronto, ON, Canada, Aug. 2020.
- [3] Espressif IoT Development Framework, (<https://github.com/espressif/esp-idf>).
- [4] IEEE, "IEEE standard for information technology—telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks—specific requirements – part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications," IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012), pp. 1–3534, Dec. 2016.