

ESP32 기반 Wi-Fi SoC 에서 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.

요 약

Wi-Fi 기기 간 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 기기 간 프레임 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.

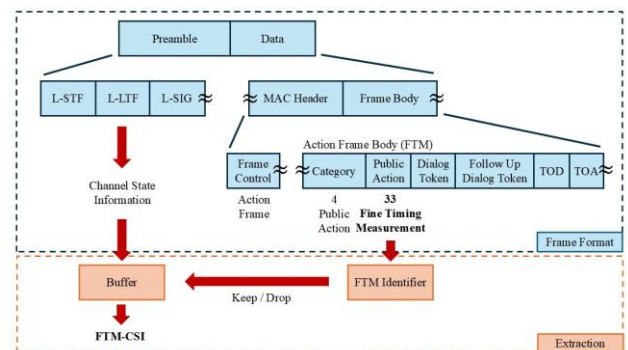


그림 1. FTM 프레임 구조 및 FTM-CSI 추출 방법

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

III. 시스템 실험 환경 및 결과 분석

실험은 그림 2 와 같이 Initiator 와 Responder 모두 ESP32-S3 Devkit 을 사용하였으며, LOS 환경과 직접 경로가 차단되고 반사 성분이 지배적인 NLOS 환경으로 구분하여 실험을 진행하였다. 측정 거리는 1~5 m 로 설정하였으며, 각 지점에서 64 개의 FTM 프레임과 이에 대응하는 CSI 를 수집하였다.



그림 2. FTM 실험 환경

그림 3 은 수집된 CSI 의 주파수 응답 크기를 시각화한 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.

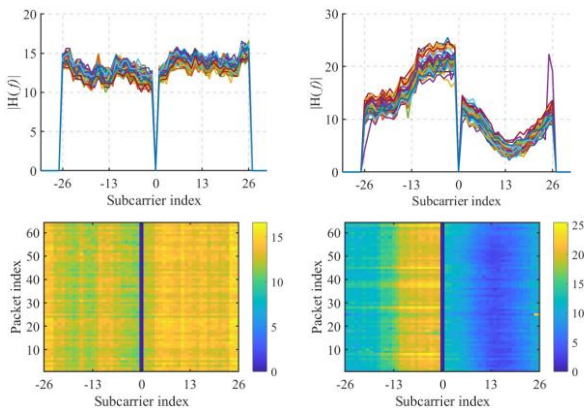


그림 3. LOS(왼쪽)/NLOS(오른쪽) 채널 주파수 응답 크기

그림 4 는 동일 환경에서 FTM 으로 얻은 RTT 측정값을 통해 별도의 보정 과정 없이 추정된 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 LOS 와 유사하거나 작게 나타났으며, 이는 FTM 으로 추정된 거리 정보만으로는 해당 거리 추정값이 LOS 기반의 유효한 측정인지, 또는 NLOS 로 인해 왜곡된 결과인지 판단하기 어려운 상황이 존재함을 보여준다. 이러한 결과는 FTM 으로 추정된 거리 정보만으로는 정밀한 위치 추정이 어려울 때, 물리적 채널

특성을 포함하는 CSI 가 보완적인 정보로 활용될 수 있음을 보여준다.

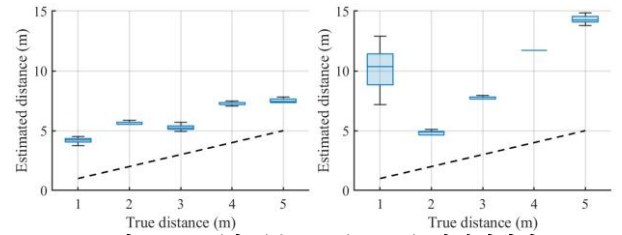


그림 4. LOS(왼쪽)/NLOS(오른쪽) 환경에서의 FTM 거리 추정 결과

IV. 결론

본 논문에서는 ESP32-S3 Devkit 에서 FTM 프레임 수신 과정 중 FTM 프레임의 CSI 를 실시간으로 추출하는 시스템을 구현하고 실험을 통해 그 적용 가능성을 확인하였다. ESP-IDF 에서 제공하는 CSI 수집 API 와 IEEE 802.11mc 표준에 정의된 FTM 프레임 내 활용가능한 식별자를 이용함으로써, FTM 으로 얻은 RTT 와 해당하는 CSI 를 동시에 수집할 수 있음을 보였다. 이러한 결과는 추가적인 장비 없이도 자원 제약적인 Wi-Fi SoC 에서 FTM 프레임의 CSI 를 추출하고 활용할 수 있음을 보여준다. 또한, FTM 으로 추정한 거리 정보만으로 구분이 어려운 LOS/NLOS 환경에서 CSI 가 채널 상태를 설명할 수 있는 유의미한 정보를 포함한다는 것을 실험적으로 확인하였다. 이는 향후 자원 제약적인 장치에서도 FTM 과 CSI 를 결합한 위치 추정 기법을 설계하기 위한 기초적인 실험적 근거를 제공한다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참 고 문 헌

- [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. Jiokeng, 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.