

# 수동 센싱을 위한 주변 통신 신호 실내외 환경별 수신 신호 대 잡음비 실측 및 평가

이한결, 정진곤\*

중앙대학교 전자전기공학과

{forener; jgjong}@cau.ac.kr

## Measurement and Evaluation of Signal-to-Noise Ratio of Ambient Communication Signals for Passive Sensing in Indoor and Outdoor Environments

Han-Gyeol Lee and Jingon Joung\*

Department of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University

### 요약

본 논문은 주변 상용 통신 신호를 활용하는 수동 센싱 기술 가능성을 연구한다. 이를 위해 universal software radio peripheral과 표준 수신 신호처리 기술을 적용하여 실내외 환경에서 WiFi, LTE, NR 방송 신호를 수집하고, 수신 SNR을 측정한다. 실측 결과 WiFi 5.0 GHz 대역과 LTE 1.8 GHz 및 2.1 GHz 대역 신호가 높은 SNR을 달성함을 확인하였으며, 이는 해당 신호들이 수동 센싱 신호원으로 충분히 활용 가능함을 나타낸다.

### I. 서론

최근 통합형 센싱 및 통신 (ISAC: integrated sensing and communication) 기술이 차세대 무선 통신 시스템 핵심 기술로 주목받고 있다 [1]–[4]. ISAC 기술은 통신과 센싱 기능을 동일 단말기와 주파수 대역에서 수행함으로써, 주파수 및 하드웨어 자원 효율성을 향상할 수 있다. 그러나 ISAC 기술을 실제 네트워크에 도입할 경우, 기존 통신 사용자 서비스 품질을 저하시킬 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 별도 자원 없이 주변에 존재하는 상용 통신 표준 신호를 활용하는 수동 센싱 기반 ISAC 기술 연구가 필요하다 [3], [4]. 본 논문에서는 센싱에 활용 가능한 상용 통신 표준 신호를 선정하고, 실내외 환경에서 universal software radio peripheral (USRP)과 표준 수신 신호처리 기술을 활용해 상용 통신 신호를 수집한다. 수집한 신호의 신호 대 잡음비 (SNR: signal-to-noise ratio)를 측정하고, 이를 바탕으로 통신 표준 신호의 수동 센싱 활용 가능성을 평가한다. 측정 결과, WiFi 5.0 GHz 대역 및 LTE 1.8 GHz와 2.1 GHz 대역 신호가 높은 수신 SNR을 달성함으로써 수동 센싱 신호원으로서의 활용 가능성을 확인하였다.

### II. 센싱 활용 가능 주변 통신 신호

최근 wireless fidelity (WiFi), long-term evolution (LTE), new radio (NR) 등 표준 통신 신호를 활용하여 전용 파형 없이 센싱을 수행하는 연구가 활발히 진행 중이다. 이러한 연구들은 주로 송신기가 센싱을 목적으로 신호를 송신하고, 수신기가 해당 신호로부터 채널 상태 정보 (CSI: channel state information)를 획득하여 분석하는 능동 센싱 방식이다. 하지만, 센싱 동작을 위해 별도의 무선 자원을 할당해야 하므로, 한정된 자원 내에서 통신과 센싱 간 trade-off가 발생한다는 한계가 있다 [4].

이러한 능동 센싱 한계를 극복하기 위하여, 주변 통신 신호를 활용하는 수동 센싱 기술을 고려할 수 있다 [4]. 이때, 수동 센싱은 송신 제어권 없이 주변 통신 신호를 활용하므로, 안정적인 CSI 획득을 위해 대상 신호가 개방성과 주기성을 갖추어야 한다. 개방성이란 단말기가 별도 인증 과정 없이 해당 신호를 포착하고 데이터를 추출할 수 있는 특성을 의미한다. 다

음으로 주기성은 송신기가 해당 신호가 예측 가능한 시점에 반복적으로 송신하는 특성을 말한다. 일반적으로 무선 센싱은 통신 데이터 수신 대비 긴 관측 시간을 요구한다. 따라서 센서가 신호를 주기적으로 수신해야 관측 구간 동안 지속적인 CSI 확보가 가능하며, 이를 통해 안정적인 센싱을 수행할 수 있다.

개방성과 주기성을 고려할 때, 수동 센싱을 위한 신호원으로써 통신 표준 방송 신호를 활용할 수 있다. 방송 신호는 기지국이나 액세스 포인트가 커버리지 내 모든 단말기에 네트워크 정보를 알리기 위해 주기적으로 송출하는 신호이다. 이 신호는 불특정 다수 단말기가 수신할 수 있도록 설계되었기 때문에 개방성을 보장하며, 안정적인 네트워크 운영을 위해 사전에 정의된 주기에 따라 반복적으로 전송되므로 주기성을 가진다.

이러한 방송 신호 체계를 운용하며, 일상적인 생활 공간 내에 상시 존재하는 대표적인 통신 표준으로 WiFi, LTE, 그리고 NR이 있다. 먼저 WiFi 표준의 경우, 비콘 프레임에 포함된 long training field (LTF)가 센싱에 활용 가능하다. 비콘 프레임은 액세스 포인트가 존재를 알리기 위해 주기적으로 방송하는 관리 프레임으로, 단말기는 비콘 프레임의 LTF를 활용하여 CSI를 획득한다. LTE 표준의 경우, 센싱에 활용 가능한 방송 신호로 셀 특정 기준 신호 (CRS: cell-specific reference signal)이 있다. CRS는 단말기들이 하향 링크 채널 품질을 측정할 수 있도록 기지국이 대역폭 전체에 걸쳐 전송하는 기준 신호이다. 특히, 1 ms의 짧은 주기를 가지기 때문에 CRS를 활용하여 주변 환경변화에 따른 CSI 변화를 정밀하게 포착할 수 있다. NR 표준에서는 동기 신호 블록 (SSB: synchronization signal)에 포함된 복호 기준 신호 (DMRS: demodulation reference signal)을 센싱에 활용할 수 있다. NR 기지국은 단말기의 동기화와 무선 접속을 위하여 SSB를 주기적으로 송신하며, 단말기는 SSB에 포함된 DMRS를 통해 CSI를 획득한다. 이러한 방송 신호 내 기준 신호를 활용하여, 센서는 CSI를 획득하고 이를 분석하여 센싱을 수행할 수 있다.

### III. 주변 통신 표준 방송 신호 SNR 측정 결과

통신 표준 방송 신호의 센싱 활용 가능성을 평가하기 위하여, 본 논문에서



(a) (b)

그림 1. 신호 측정 환경. (a) 실내 사무실 환경. (b) 실외 환경.

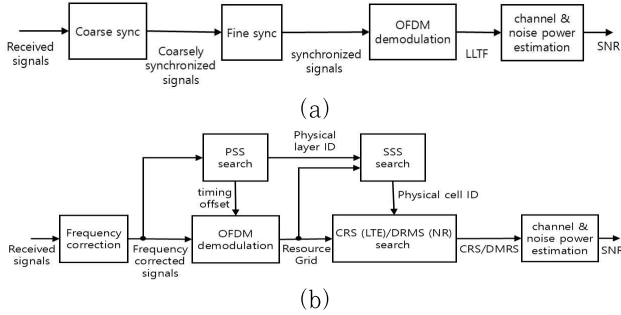


그림 2. SNR 측정 과정. (a) WiFi. (b) LTE와 NR.

	주파수 대역	
	2.4 GHz	5.0 GHz
실내	35.3, 0.1, 8.5	28.8, 6.7, 26.3
실외	26.4, 0.1, 14.1	26.4, 3.6, 21.6

표 1. 실내외 환경 WiFi LLTF 최대, 최소, 평균 수신 SNR (dB).

	주파수 대역	
	1.8 GHz	2.1 GHz
실내	33.9, 9.9, 25.5	32.8, 10.6, 27.6
실외	26.7, 9.0, 20.2	29.6, 7.1, 22.2

표 2. 실내외 환경 LTE CRS 최대, 최소, 평균 수신 SNR (dB).

	주파수 대역	
	3.5 GHz	
실내	18.9, 12.5, 15.7	
실외	23.3, 10.5, 16.9	

표 3. 실내외 환경 NR DMRS 최대, 최소, 평균 수신 SNR (dB).

서는 실내외 환경에서 sub-6 GHz 대역 표준 방송 신호 수신 SNR을 측정한다. 그림 1은 측정을 진행한 실내외 환경 사진을 나타낸다. 두 환경에서 SNR 측정을 위하여, 표준별 센싱 활용 가능 신호를 포함하는 방송 신호 프레임을 100개씩 수집한다. 신호 수집을 위하여 Ettus사 USRP B210와 MATLAB communication toolbox를 활용하며, 각 표준 물리 계층 파라미터와 그림 2에 나타난 수신 신호 처리 과정을 적용한다. 이때, 그림 2에서 PSS와 SSS는 각각 primary synchronization signal과 secondary synchronization signal을 의미한다. 수신 SNR은 다음과 같이 측정한다:

$$\gamma = \frac{1}{N} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \frac{|\hat{H}[k, l]|^2}{\hat{\sigma}^2}. \quad (1)$$

여기서,  $\mathcal{K}$ 와  $\mathcal{L}$ 는 각각 채널 추정을 위한 참조 신호의 부반송파 및 OFDM 심볼 인덱스 집합,  $\hat{H}[k, l]$ 은 리소스 그리드 내  $k$ 째 부반송파,  $l$ 째 OFDM 심볼 위치에서의 채널 추정치, 그리고  $\hat{\sigma}^2$ 는 추정 잡음 분산이다. 표 1은 실내외 환경에서 측정된 WiFi LLTF 수신 SNR 결과이다. 두 환경 모두 2.4 GHz와 5.0 GHz 대역에서 WiFi 통신을 지원하는 액세스 포인트가 하나 이상 존재한다. 측정 결과, 2.4 GHz 대역은 최대 SNR과

평균 SNR 간 차이가 두드러지게 나는데, 그 이유는 높은 송신 전력을 갖는 액세스 포인트뿐만 아니라, 저전력으로 동작하는 다수 스마트 기기가 방송 신호를 빈번하게 송출하기 때문이다. 한편, 5.0 GHz 대역은 높은 데이터 용량을 요구하는 단말기들이 request to send와 같은 제어 신호를 간헐적으로 방송하므로 최소 SNR은 낮게 측정될 수 있으나, 그 빈도가 낮아 최대 SNR과 평균 SNR의 차이가 작다. 따라서 2.4 GHz 대역 대비 5.0 GHz 대역은 높은 송신 전력을 가지는 액세스 포인트의 방송 신호를 활용하여 안정적인 CSI 획득이 가능하므로, 수동 센싱에 더 적합한 무선 환경을 제공할 수 있다.

표 2와 3은 각각 실내외 환경에서 측정된 LTE CRS와 NR DMRS 수신 SNR 결과이다. LTE 표준의 넓은 커버리지 덕분에, 두 측정 환경에서 모두 20 dB 이상의 평균 수신 SNR을 달성한다. 반면, NR 표준은 더 높은 주파수를 사용함에 따른 전파 감쇄로 인해 상대적으로 낮은 평균 수신 SNR을 기록하였다. 두 표준 모두 최대 SNR 대비 최소 SNR이 현저히 낮게 측정되는 양상을 보이나, 평균 SNR은 최대 SNR과 비교적 작은 차이를 유지한다. 결과적으로 수동 센싱 시스템은 이러한 안정적인 평균 SNR 특성을 바탕으로, 일시적인 SNR 저하 구간을 제외한 대부분의 시간 동안 신뢰도 높은 CSI를 확보하고 주변 환경을 지속적으로 모니터링할 수 있다. 특히, SNR 관점에서 LTE는 NR 대비 전 구간에서 더 높은 신호 레벨을 유지하므로, 수동 센싱 시나리오에서 보다 우수한 센싱 성능을 달성할 수 있을 것으로 기대한다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 CSI 기반 수동 센싱에 활용 가능한 상용 통신 표준 신호를 선정하고, 해당 신호의 수신 SNR을 실내외 환경에서 실측하여 수동 센싱 활용 가능성을 평가했다. 실측 결과, WiFi 표준 5.0 GHz 대역 LLTF와 LTE 표준 1.8 GHz 및 2.1 GHz 대역 CRS가 실내외 환경에서 모두 높은 SNR을 보였으며, 해당 대역 통신 표준 신호들이 수동 센싱 신호원으로 충분히 활용 가능할 것으로 기대한다.

#### ACKNOWLEDGMENT

본 연구성과는 과학기술정보통신부(RS-2024-00405510)와 2025년도 교육부(RS-2025-25397301) 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.

#### 참고 문헌

- [1] K. Kim, J. Kim, and J. Joung, "A survey on system configurations of integrated sensing and communication (ISAC) systems," in *Proc. international conf. ICT convergence (ICTC)*, Jeju, Korea, Oct., 2022.
- [2] J. Joung, H. Yu, and T. Q. S. Quek, "Integrated single target sensing and multiuser communications based on zero-forcing beamforming," *Veh. Comm.*, vol. 43, pp. 1-11, Jul. 2023.
- [3] J. Kim and J. Joung, "Movable antenna-assisted integrated single-target passive sensing and multiuser communication systems," in *Proc. IEEE VTS Asia Pacific Wireless Comm. Symposium (APWCS)*, Tokyo, Japan, Aug. 2025.
- [4] H.-G. Lee, C. K. Ho, and J. Joung, "WiFi sensing: Data-aided approach," in *Proc. IEEE Wireless Commun. and Netw. Conf. (WCNC)*, Milan, Italy, pp. 1-5, Mar. 2025.