

초정밀 초절전 센싱을 위한 통신센싱 통합시스템 검증

장갑석, 김용선, 조원철, 이유성*, 정영배**, 고영조, 김일규
6G 무선방식연구실, 이동통신연구본부, 입체통신연구소, 한국전자통신연구원
(주)시그웍스*, 국립한밭대학교**

{kschang,doori,woncheol,koyj,igkim}@etri.re.kr, yusung.lee@sigworks.co.kr*, ybjung@hanbat.ac.kr**

Validation of an Integrated Sensing and Communication Sensing System for Ultra-Precise and Ultra-Low-Power Sensing

Kapseok Chang, Yong Sun Kim, Woncheol Cho, Yusung Lee*, Young-Bae Jung**, Young-Jo Ko, Il-Gyu Kim
Electronics and Telecommunications Research Institute
Sigworks*, Hanbat National University**

요약

통신과 센싱 기능을 동시에 수행하는 ISAC(Integrated Sensing and Communication)은, 2023년 6월 ITU-R에서 승인된 6G 사용 시나리오 중 하나로, 3GPP 6G Release-21의 Day 1 기능으로 유력하다. ISAC이 도입되는 6G 이동통신시스템은 기존 이동통신시스템의 한계를 넘어 통신 기능의 지원을 바탕으로 초정밀·초절전 센싱을 구현할 수 있는 핵심 기술이 규정될 것이다. 본 논문에서는 이러한 ISAC 시스템 하에 초정밀·초절전 센싱에 대한 선행 연구개발 내용을 소개하고 플랫폼에 의한 검증 결과를 제시한다.

I. 서론

ITU-R에서 새로운 사용 시나리오로 승인된 ISAC[1] 기술은, 2025년 3월 인천에서 열린 6G 워크샵에서 확인되었듯이, 6G 시스템은 OFDM 기반의 통신 기능과 예컨대 LFM(Linear Frequency Modulation) 기반의 센싱 기능을 통합하는 프레임워크를 도입하고 네트워크와 UE(User Equipment) 모두에서 에너지를 저감하는 등의 TCO(Total Cost of Ownership) 감소를 실현하면서 XR 서비스를 중용할 것으로 기대된다. 이 프레임워크는 기지국(TRP, Transmission Reception Point) 기반 센싱 뿐만 아니라 UE 기반 센싱도 포함한다[2].

이러한 ISAC 기술은 6G 이동통신시스템에서 XR 게임 및 스트리밍, 스마트 팩토리 자동화, 자율주행, 무인항공기(UAV, Unmanned Aerial Vehicle) 제어, 물류 관리 등 초정밀 센싱이 요구되는 서비스 구현에 있어 필수적인 요소로 작용할 것이다[3],[4]. 대표적 일례로 그림. 1과 같이 초정밀 센싱의 도움을 받아 아레나 환경에서 UE가 장애물을 회피하며 XR 게임을 즐기는 가상과 현실 융합 서비스를 들 수 있다.

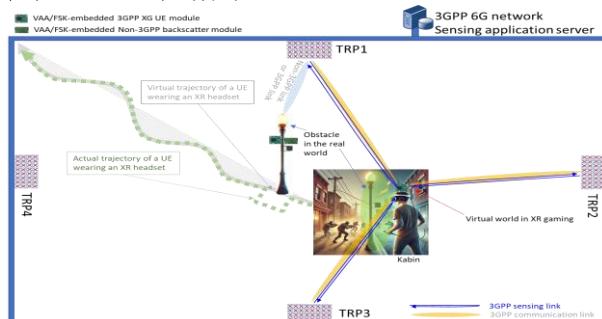


그림. 1 가상·현실 융합 이동 XR 서비스 예

이에 본 논문에서는 ISAC 선행 연구개발의 일환으로, 6G 기반 초정밀 서비스 실현을 위한 통신·센싱 통합 시스템을 제안한다. 제안된 ISAC 시스템은 통신을 활용해 초정밀 센싱을 수행하는 TRP와, 초저전력 기반 센싱 기능을 갖춘 VAA(Van-Atta Array)/FSK(Frequency Shift Keying)-임베디드 백스캐터러(backscatterer)를 장착한 UE로 구성되며, 본 논문에서는 이를 개념검증하기 위한 플랫폼과 성능 평가 결과를 제시한다.

II. 초정밀·초절전 관점의 5G 센싱 기술 한계

TRP 1과 UE 1 간의 무선 전파 지연 추정은 센싱의 핵심 항목 중 하나이며, 그림. 2의 좌측에서 볼 수 있듯이 5G 시스템에서는 OFDM 기반의 RTT(Round-Trip Time) 기술이 규격화되어 있다[5]. 하지만 RTT 기반 방식은 아무리 넓은 대역폭을 확보하고 최적화된 센싱 신호를 규정하더라도 hardware impairment에 의해 발생하기 때문에 실질적으로 제거하지 못하는 송신 타이밍 오차 ($e_{TRP,DL,TX}$, $e_{UE,UL,TX}$)에 의해 초정밀 센싱 한계가 발생한다. 또한, 동기 추정과정과 메시지 송수신을 위한 채널 코딩으로 인해 전력 소모가 발생하여 초절전 센싱 실현에도 제약이 따른다.

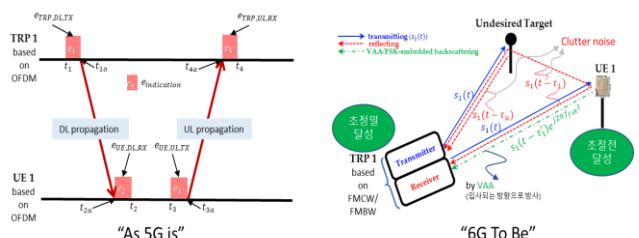


그림. 2 센싱 기술 관점에서의 5G 한계

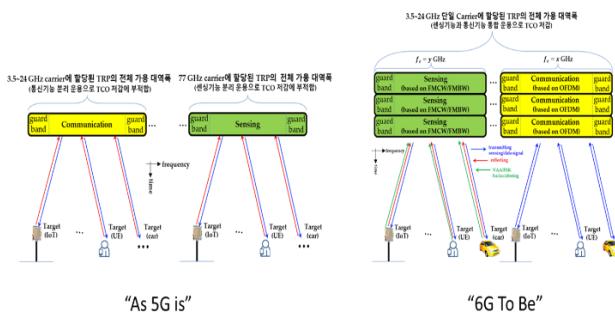


그림. 3 TCO 관점의 통신/센싱 기능 지원 5G 한계

더불어, 그림. 3의 좌측에서 나타난 바와 같이, 5G 시스템은 3.5~24 GHz 대역에서는 RTT를 통한 일부 센싱 기능을 제공하나, 대부분은 통신 기능에 집중되어 있으며, 차량 등의 외부 시스템에서는 77 GHz 대역의 레이더를 활용해 5G 와는 별도로 초정밀 센싱을 수행하고 있다[6]. 이러한 방식이 6G에 그대로 적용될 경우, 통신 기능과 센싱 기능이 분리 운영됨에 따라 6G가 추구하는 TCO 절감 목표에는 부합하지 않게 된다.

III. 6G 센싱 방향성 및 후보 CUPPS 기술

기존의 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) radar 기술은 그림. 2에서 제시한 RTT 방식의 한계점을 대부분 극복할 수 있는 장점을 지니고 있어, 6G 시스템에 채택될 가능성이 높다. 그러나 이 레이더(i.e., 일종의 mono-static sensing) 기술은 본질적으로, 그림. 4에서 볼 수 있듯이 원하는 대상(desired target)과 원하지 않는 대상(undesired target)을 명확히 구분하지 못하는 문제가 있다. 이로 인해, 주변 환경에서 발생하는 클러터 노이즈(clutter noise) 및 undesired target으로부터 되돌아오는 간섭 신호의 영향을 효과적으로 억제하는데 한계가 있으며, 이는 초정밀 센싱 성능을 저해하는 주요 요소로 작용한다.

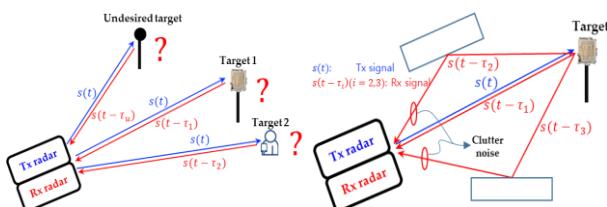


그림. 4 레이더의 identification 및 clutter noise 문제

제안하는 CUPPS(Communication-assisted Ultra-Precision ultra-low Power Sensing system)은 그림. 2 내지 그림. 4에서 언급한 문제들을 해결하기 위해, 그림. 3의 우측과 같이 단일 carrier에서 주파수분배 다중화 형태로 OFDM 기반 통신 기능과 아날로그/디지털 FMCW 기반 센싱 기능을 통합 운용해 TCO를 저감한다. 또한, 그림. 2의 우측과 같이 desired target을 VAA/FSK-embedded backscatterer로 삼아 이를 TRP와 시스템 연결을 수행하는 UE에 탑재함으로써 TRP 관점에서 초정밀 센싱을, UE 관점에서 초절전 센싱을 이루는 장점이 있다[7].

- ① 고정밀·저복잡 위상왜곡에 강한 시스템 동기화 및 접속
- ② 고신뢰 저지연 다이버시티 통신을 통한 제어 정보 전달
- ③ 초절전 센싱(절대동기 포함)을 위한 Backscattering On at t_s
- ④ 센싱 신호 전송
- ⑤ 반사 및 VAA/FSK-embedded backscattering 신호 수신
- ⑥ 초정밀 센싱
- ⑦ 초절전 센싱을 위한 Backscattering Off at t_e

그림. 5 CUPPS 시스템기술 절차

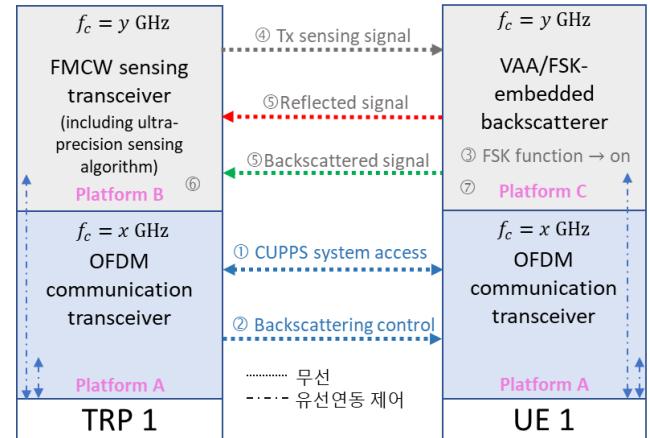


그림. 6 ETRI PoC 시스템 블록 다이어그램

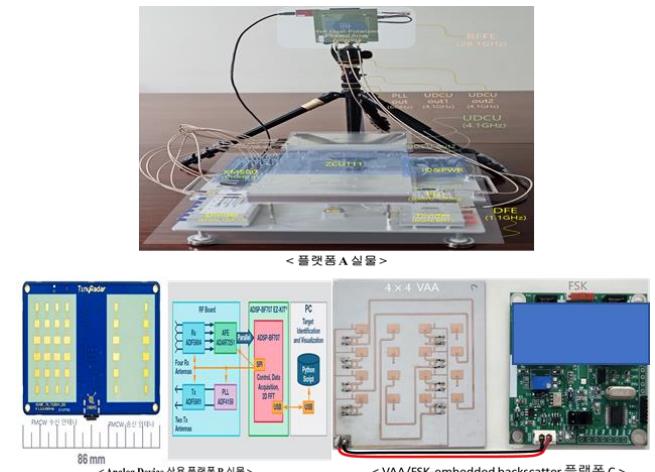


그림. 7 ETRI PoC 시스템 구현 플랫폼 실물

그림. 5 내지 그림. 7은 각각 TRP에서 초정밀 센싱을, UE에서 초절전 센싱을 실현하는 시스템기술 절차, ETRI PoC 시스템 블록 다이어그램 및 구현 플랫폼 실물이다. 그림. 2의 우측에 도시한 TRP 1은 그림. 6과 같이 통신을 담당하는 플랫폼 A와 FMCW 송신과 센싱을 담당하는 플랫폼 B로 구성된다. 그림. 2의 우측에 도시한 UE 1은 그림. 6과 같이 통신을 TRP 1과 페어가 되는 플랫폼 A와 VAA/FSK-embedded backscattering을 담당하는 플랫폼 C로 구성된다.

그림. 5의 CUPPS 시스템기술 절차에 따르면, 그림. 6과 그림. 7에 보인 OFDM 기반 통신 플랫폼 A, FMCW 송수신 플랫폼 B 및 VAA/FSK-embedded

backscatterer 플랫폼 C 를 이용하여 다음과 같은 절차가 수행된다.

- ① UE 1 은 ETRI 가 개발한 위상왜곡에 강한 고정밀·저복잡 동기 기술을 적용하여 TRP 1 에 시스템 접속 및 연결 수행
- ② TRP 1은 UE 1의 FSK 기능의 on/off를 제어하기 위한 정보 전달
- ③ 정해진 시간에 UE 1은 플랫폼 C FSK 기능 on
- ④ TRP 1은 FMCW 기반 플랫폼 B 를 동작해 센싱 신호를 UE 1로 전송
- ⑤ 그러면 UE 1의 표면에서 반사된 신호와, VAA/FSK 변조를 통해 backscattering 된 신호가 TRP 1로 되돌아옴. VAA 는 입사 방향에 따라 4×4 위상배열 범포밍으로 방사되기 때문에 비가시거리 환경에서의 클러터 노이즈(clutter noise) 영향을 저감하며, FSK 는 플랫폼 B에서 송신된 신호의 클러터 노이즈를 회피하면서 동시에 UE 1 임을 식별하는 역할 수행
- ⑥ 이러한 backscattering 신호로부터 클러터 노이즈를 회피하고 SNR 을 향상시키며, ETRI 에서 개발한 초정밀 센싱 알고리즘을 적용해 TRP 에서의 초정밀 센싱 제공
- ⑦ UE 에서의 초절전 달성을 위한 FSK 기능 off

IV. CUPPS 시험 검증 환경 및 성능 평가

센싱 성능 평가를 위한 시험 환경은 그림. 8 과 같이 TRP 1(플랫폼 A&B)과 UE 1(플랫폼 A&C) 사이에 원하지 않는 클러터 노이즈를 발생시키기 위해 corner reflector 를 이용한 2 개의 undesired target 들을 배치하였다. 이와 같은 시험 환경은 본 논문의 제안 기술이 센싱에 가장 걸림돌이 되는 클러터 노이즈를 효과적으로 회피하면서 초정밀 센싱과 초절전 센싱을 실현할 수 있다는 것을 이해하기 쉽게 보여주기 위함 임을 참고한다.

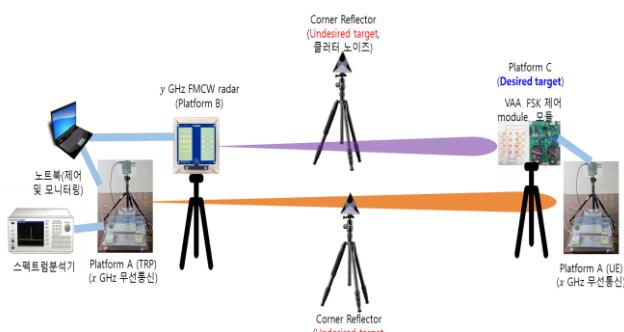


그림. 8 시험 검증 환경

그림. 9 에서 관찰된 바와 같이, 하나의 chirp 만을 전송해 센싱하는 기법에 비해 다수의 chirps 전송하고 클러터 노이즈 제거와 SNR enhancement 을 적용하는 제안 기법이 5G RTT 표준 기술의 무선전과 추정 정확도 요구치 1 μ s 에 비해 100 배 이상의 정확도를 보여준다. 이 성능 결과는 제안 CUPPS 시스템기술이 TRP 에서 초정밀 센싱을 UE 에서 초절전 센싱을 실현해 줄 수 있는 하나의 후보 기술이 될 수 있음을 비추어 준다.

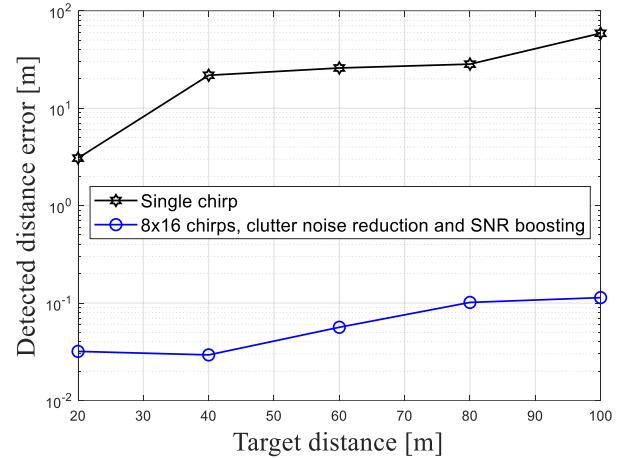


그림.9 구현형상 시험 검증 성능

V. 결 론

본 논문에서는 5G 센싱 기술의 한계를 극복하고 초정밀·초절전 센싱에 최적화된 CUPPS 시스템을 제안하였고 이에 대한 개념검증을 위해 구축된 PoC 플랫폼을 소개하였고, CUPPS 의 구현형상 시험 검증 환경에서의 평가를 통해 5G 에서 요구하는 센싱 정확도 대비 100 배 이상의 우수한 성능을 얻을 수 있음을 보였다. 구축된 PoC 플랫폼으로 다양한 시험 검증 환경에서 센싱 성능 평가를 진행할 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2018-II180218, 초고주파 이동통신 무선백홀 전문연구실)

참고문헌

- [1] ITU-R, “Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond,” WP5D, June, 2023.
- [2] 3GPP 6G Workshop, “Chair’s summary of the 3GPP workshop on 6G,” WP5D, 6GWS-250238, March 10-11, 2025.
- [3] 장갑석, 고영조, 김일규, “대용량 초정밀 서비스 실현을 위한 무선 액세스 기술 동향,” 전자통신동향분석, Vol. 39, No. 1, pp. 1-13, 2024.
- [4] TR 22.837, “Feasibility study on integrated sensing and communication (Release 19),” 3GPP TSG RAN1, Feb., 2024.
- [5] 장갑석, 김용선, 조원철, 고영조, 김일규, “6G 초정밀·초절전 센싱 시스템 기술에 관한 연구,” KICS 하계통신학술대회, June, 2024.
- [6] 장갑석, 김용선, 조원철, 김경표, 고영조, “센싱과 통신 결합 기술 동향,” KICS 하계통신학술대회, June, 2024.
- [7] 장갑석, 김용선, 조원철, 김경표, 김근영, 고영조, 김일규, “6G 초정밀 초절전 센싱 시스템기술에 관한 개념검증,” JCCI2025, April, 2025.