

6G 초정밀-초절전 센싱 시스템 기술에 관한 연구

장갑석, 김용선, 조원철, 고영조, 김일규
6G 무선방식연구실, 이동통신연구본부, 입체통신연구소, 한국전자통신연구원
{kschang, doori, woncheol, koyj, igkim}@etri.re.kr

Study on 6G Ultra-Precise and Ultra-Energy-Efficient Sensing System Solution

Kapseok Chang, Yong Sun Kim, Woncheol Cho, Young-Jo Ko, and Il-Gyu Kim
Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

ITU-R 에서 2023 년 6 월에 6G 를 위한 사용시나리오로, 5G 와 차별화되는, ISAC(Integrated Sensing and Communication)이 새롭게 승인됨에 따라, 6G 이동통신시스템은 통신 기능과 결합해, 전파지연 추정, 이동속도 추정, 타겟의 형태/크기/방향 추정, 위치 추정 등의 센싱(sensing) 기능을 지원해야 한다. 이에 발맞추어 본 논문은 이동통신시스템에서 초정밀하고 초절전으로 절대동기를 포함한 센싱을 수행하는 시스템 솔루션의 초기 연구 결과와 연구 방향성을 제공한다.

I. 서론

2030 년경에 도래하는 6G 이동통신 세대에는 무선 로봇을 이용한 팩토리 오토메이션, 스마트시티, 오토드라이빙, 메타버스 확장 현실, 디지털 트윈, 센서 퓨전 등 다수 고정밀(high precision) 서비스가 각광받을 전망이다[1]. 이러한 전망을 뒷받침하는 ITU-R 의 활동으로 2023 년에 고정밀 서비스와 직접적으로 관련이 있는 ISAC(Integrated Sensing and Communication)을 5G 와 차별화되는 새로운 사용시나리오로 승인하였다[2].

6G 고정밀 서비스 중에서 팩토리 오토메이션, 디지털트윈, 오토드라이빙 등은 TRP(Transmission and Reception Point) 관점에서의 초정밀(ultra-high precision) 기능과 무선 디바이스(단말) 관점에서의 초절전(ultra-energy-efficiency) 기능을 요구할 수 있다. 이 요구사항은 현재의 관련 기술과 표준으로 한계가 명확하다.

이에 따라 본 논문에서는 초정밀하고 초절전으로, 통신시스템의 도움을 받아, 절대동기를 포함한 센싱 기능을 수행하는 개념정립 단계의 이동통신 시스템 기술을 제안한다. 아울러 제안된 이동통신 시스템 기술의 개념 검증을 위해 현재까지 정리된 ETRI 의 PoC 플랫폼을 소개하고, 6G 초정밀-초절전 지향 ISAC 의 연구 방향성을 제시한다.

II. 현재의 센싱 기술 및 표준

글로벌 표준시스템 제정을 리딩하고 있는 3GPP 는 센싱을 타겟(또는 UE(User Equipment))의 전파지연, 타겟의 이동속도, 타겟의 크기 및 모양, 타겟의 상대적 움직임 및 타겟의 위치 등의 추정으로 정의하고 있다[3]. 그림. 1 과 같이 센싱을

실현하는 기술은, [4]와 유사하게, 크기는 표준절차와 부메랑(Boomerang) 기술로 분류된다.

A. 표준절차 기술 및 표준

팩토리 오토메이션, 센서 퓨전 등의 서비스를 위한 절대동기(Absolute Time Synchronization, ATS) 기술에서는 그림. 2 와 같이 TRP 와 UE 들간 전파지연 추정이 요구된다. 여기서, ATS 는 이동통신시스템의 TRP 와 UE 들이 같은 시각을 가지게 하는 기술을 의미한다.

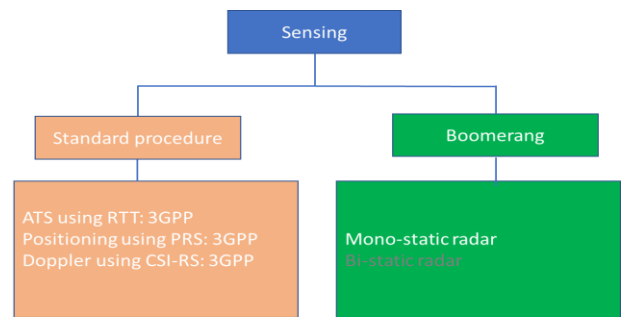


그림.1 센싱 기술 분류도

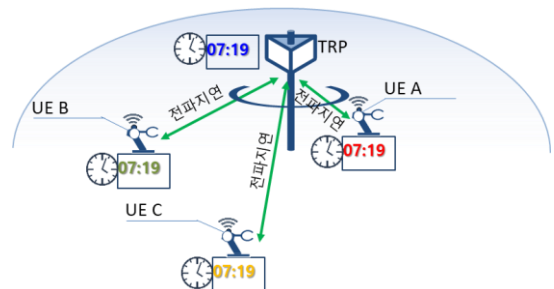


그림.2 전파지연 추정을 요구하는 ATS 개념도

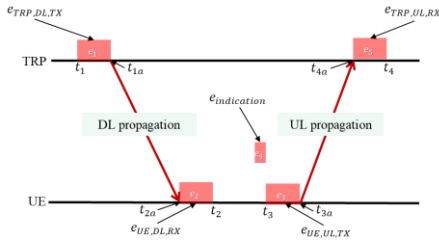


그림. 3 TRP-side RTT 기반 전파지연 추정 절차

$$\text{추정된 전파지연} = [(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)]/2 \quad (1)$$

3GPP에서는 절대동기를 위한 기술로 그림. 3 및 식(1)과 같이 TRP에서 보내고 받은 시간과 UE에서 받고 보낸 시간의 차이로부터 전파지연을 추정하는 TRP-side RTT(Round-Trip Time) 기술을 Rel-17의 표준 절차 기술로 다음과 같이 제정하였다.

- ① TRP는 t_1 에 UE가 수신 타이밍 동기를 획득하도록 하는 PRS(Positioning Reference Signal) 신호를 전송하지만 다운링크(DL) 송신 타이밍 에러 $e_{TRP,DL,TX}$ 로 인해 실제로는 t_{1a} 에 전송됨
- ② 상기 PRS 신호는 t_{2a} 에 UE에게 도달함. 이때 $t_{2a} - t_{1a}$ 이 실제 DL 전파지연임. 하지만 수신 타이밍 에러 $e_{UE,DL,RX}$ 로 인해 UE는 TRP가 보낸 신호를 그림. 3과 같이 t_2 에서 추정함
- ③ UE는 t_3 에 TRP가 수신 타이밍 동기를 획득하도록 하는 SRS(Sounding Reference Signal) 신호를 전송하지만 업링크(UL) 송신 타이밍 에러 $e_{UE,UL,TX}$ 로 인해 실제로는 t_{3a} 에 전송됨. 또한 UE는 계산된 Tx-Rx 시간차이값 ($t_3 - t_2$)를 채널코딩을 걸어 메시지 형태로 TRP에게 전송하며, 이 과정에서 비트수 제한으로 인한 granularity 에러 $e_{indication}$ 가 발생함
- ④ 상기 SRS 신호는 t_{4a} 에 TRP에 도달함. 이때 $t_{4a} - t_{3a}$ 가 실제 UL 전파지연임. 하지만 수신 타이밍 에러 $e_{TRP,UL,RX}$ 로 인해 그림. 3과 같이 t_4 에서 추정함
- ⑤ TRP가 계산한 Rx-Tx 시간차이값 ($t_4 - t_1$)과 UE로부터 메시지 형태로 받은 Tx-Rx 시간차이값 ($t_3 - t_2$)로부터 식(1)과 같이 전파지연을 추정함

이러한 RTT 표준절차 기술에서, 표준 규격적으로 광대역폭을 채용한다면 정교해진 time resolution 덕분에 수신 타이밍 에러를 낮출 수 있고 또한 비트수를 늘려 granularity 에러도 낮출 수 있지만 6G 후보 주파수대역인 upper-mid band 인 7~24GHz에서 광대역폭을 확보하기는 어려울 것이다. 더구나, 장치 고유의 랜덤성에 의해 발생하는 지터 형태의 송신 타이밍 에러는 광대역폭을 채용한다고 하더라도 해결할 수 없을 것이다.

상기의 RTT 표준절차 기술을 센싱을 위해 적용한다면, TRP side에서 위에서 언급한 타이밍 에러들이 초정밀 센싱 달성의 저해 요인이며, UE side에서는 전력소모가 큰 타이밍 동기 추정과 시간차이 정보 전송을 위한 채널코딩이 초절전

달성의 저해 요인이다. 또한, 스마트시티, 오토드라이빙, 디지털트윈 등의 서비스를 위한 3GPP의 위치 추정 기술은 PRS와 RTT를 다중 TRP로 확장하는 개념이고, 이동속도 추정도 CSI(Channel State Information)-RS에 대한 시변채널특성을 측정할 때와 이를 TRP에 보고할 때 상기의 저해 요인이 마찬가지로 발생한다.

B. 부메랑 기술 및 표준

FMCW(Frequency-Modulated Continuous Wave)와 PMCW(Pulse-Modulated Continuous Wave)의 monostatic radar 등이 이 기술의 범주에 포함된다[5]. 이 기술의 장점은 앞에서 정의한 모든 센싱이 가능하다는 것과, 앞에서 언급한 표준절차 기술에서 발생하는 저해 요인이 경미하거나 발생하지 않아 TRP와 UE side 각각에서 초정밀 센싱과 초절전을 달성할 수 있을 것이다.

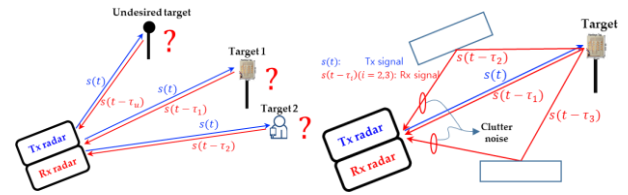


그림. 4 Identification 및 clutter noise 문제 설명도

그러나, 그림. 4와 [4]에 나타낸 바와 같이, 부메랑 기술을 이용한다 하더라도 TRP가 사전에 센싱하려는 타겟을 인지하지 못하므로, 기술적으로 clutter로 작용하는 undesired 타겟을 제외할 수 없어 초정밀 센싱 정확도를 달성하지 못할 것이다. 한편, 현재까지 3GPP는 부메랑 센싱 기술의 범주에 포함되는 규격 기술이 없는 것으로 파악된다.

III. 제안 Falconticks 시스템 기술

II장에서 언급한 종래 센싱 기술들이 가지는 문제를 해결하기 위해, 부메랑 기술이 가지는 UE side에서의 초절전 특성은 살리면서, 표준절차 기술과 부메랑 기술이 가지는 여러가지 저해 요인들은 회피해 TRP side에서 초정밀 센싱을 수행할 수 있는 일종의 communication-assisted sensing 형태의 일명 Falconticks 초정밀·초절전 시스템 기술을 하기와 같이 제안한다.

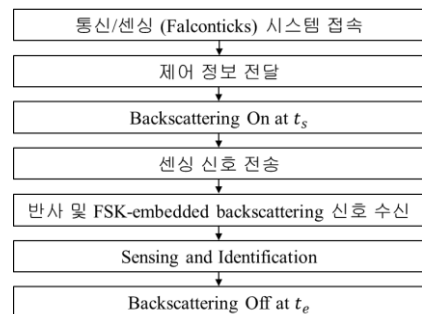


그림. 5 Falconticks 프레임워크 절차

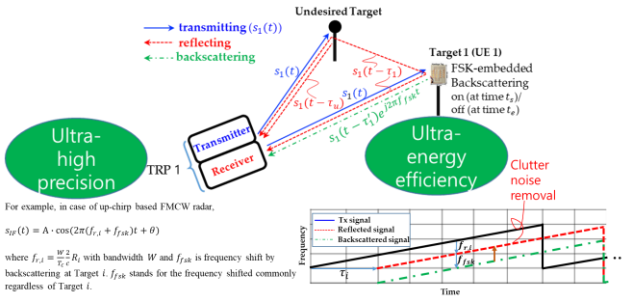


그림. 6 Falconticks 프레임워크 개념도

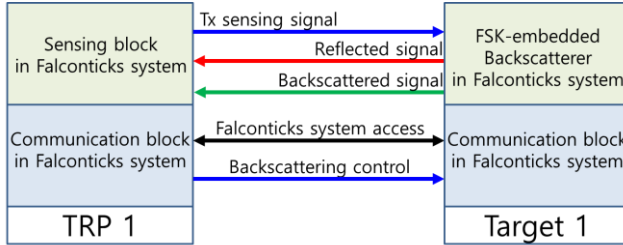


그림. 7 Falconticks의 PoC 플랫폼 구성 형상도

그림. 5 내지 그림. 7 을 바탕으로 제안하는 초정밀·초절전 센싱 절차를 하기와 같이 기술한다.

- ① 센싱 대상 Target 1 은 TRP 1 과 동기화, 랜덤액세스 및 RRC 구성 완료 등의 절차를 통해 Falconticks 시스템에 연결을 수행함. 연결이 완료되면 TRP 1 은 Target 1 을 인지하게 됨. 그림. 7 에 나타낸 바와 같이 이러한 시스템 접속 절차는 ETRI 에서 구축한 PoC 플랫폼 상의 TRP 1 과 Target 1 각각에 구현되는 통신 블록들이 수행함
- ② TRP 1 이 Target 1 에게 backscattering 기능을 각각 on 하고 off 하는 시간정보 t_s 과 t_e 의 제어 정보를 전달함. 이는 그림. 7 의 TRP 1 통신 블록의 송신기가 수행함
- ③ t_s 에서, Target 1 은 자신의 backscattering 기능을 on 함. 이는 Target 1 의 FSK-embedded Backscatterer 에서 수행됨
- ④ TRP 1 센싱 블록의 송신기는 $s_1(t)$ 라고 하는 sensing 신호를 안테나를 통해 전송함. 이는 TRP 1 센싱 블록의 송신기가 수행함
- ⑤ TRP 1 센싱 블록의 수신기는 Undesired target 으로부터 반사되어 돌아오는 $s_1(t - \tau_u)$ 를 수신하고, 또한 Target 1 로부터 반사되어 돌아오는 $s_1(t - \tau_1)$ 을 수신함. 여기서, τ_1 은 TRP 1 에서 $s_1(t)$ 가 송출되는 시점부터 Target 1 으로부터 반사되어 돌아오는 시점까지의 RTD(Round-Trip Delay)를 의미함. 이 때 $s_1(t - \tau_u)$ 과 함께 $s_1(t - \tau_1)$ 는 센싱 정확도를 매우 떨어뜨리는 일종의 Clutter noise 성분을 포함하고 있으므로 이를 제거하는 것이 매우 중요함. 한편, Target 1 센싱 블록은, 본 논문에서 RFID(Radio Frequency Identification) 표준[6]의 backscattering 기술 개념을 이동통신시스템에 도입한 FSK 기반 backscattering 을 수행함. 다시 말해, 유입되는 신호를 f_{fsk} 만큼 주파수를 시프트해 backscattering 하며, f_{fsk} 로 인해 Target 1 identification 과 clutter noise 회피가 모두 가능해짐을 참고함[7]. 이에 따라 TRP 1 센싱 블록의 수신기는 Target 1 로부터 backscattering 되어 돌아오는 $s_1(t - \tau_1)e^{j2\pi f_{fsk} t}$ 를 또한 수신함
- ⑥ TRP 1 센싱 블록의 수신기는 반사와 함께 backscattering 된 수신 신호에 대해 센싱을 수행해 Target 1 에 대한 전파지연 및/또는 이동속도를 추정함. 일례로, 한정된 주파수자원은 최소화하면서

시간자원을 효율적으로 사용해 센싱 정보의 정확도를 높이는 참고문헌 [8]의 추정 기술로 TRP side 에서의 초정밀을 달성할 수 있음

⑦ 마지막으로, t_e 에 Target 1 은 자신의 backscattering 기능을 off 해 UE side 에서의 초절전을 달성할 수 있음

IV. 초정밀·초절전 지향 연구 대상 및 방향성

통신과 센싱이 결합된 시스템 하에서, 효율적으로 통신과 센싱 자원을 다중화하고, 단일 캐리어의 기저대역에서 통신과 센싱을 위한 신호를 시간·주파수적으로 분리·결합한 설계 및 이들을 수용하는 물리계층 프레임 구조 등이 통신시스템의 도움을 받아 초정밀·초절전 센싱을 실현하기 위한 주요 연구 대상이 될 것이다. 또한, 부메랑 기술이 선천적으로 안고 있는 자기간섭을 실용적으로 얼마나 제거할 수 있는가에 따라, 주파수효율을 극대화할 수 있는 센싱과 통신의 통합 신호 설계 유무와 이에 따른 효율적 시간·주파수 자원 다중화 등의 연구 방향성이 결정될 것이다.

V. 결론

본 논문에서는 mono-static 부메랑 센싱 기술의 긍정적인 면은 수용하고 통신의 도움을 받아 부정적인 면은 장점을 승화한 제안 Falconticks 시스템 기술이 6G 초정밀·초절전 센싱 요구를 만족할 수 있음을 기술하였다. 이러한 시스템 기술 하에서 앞으로 초정밀·초절전 센싱을 실현하기 위한 연구 대상과 연구 방향 또한 제시하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2018-0-00218, 초고주파 이동통신 무선백홀 전문연구실)

참고문헌

- [1] 장갑석, 고영조, 김일규, “대용량 초정밀 서비스 실현을 위한 무선 액세스 기술 동향,” 전자통신동향분석, Vol. 39, No. 1, pp. 1-13, 2024.
- [2] ITU-R, “Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond,” WP5D, June, 2023.
- [3] TR 22.837, “Feasibility study on integrated sensing and communication (Release 19),” 3GPP TSG RAN1, Feb., 2024.
- [4] 장갑석, 조원철, 김용선, 김형주, 고영조, 김일규, “6G 초정밀·초절전 센싱 기술에 관한 연구,” JCCI2024, April, 2024.
- [5] R. Feger, et al., “A 77-GHz FMCW MIMO radar based on an SiGe single-chip transceiver,” IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. 57, no. 5, 2009.
- [6] RFID Release 3.0, “RFID air interface protocol for communications at 860 MHz - 930 MHz,” Jan. 2024.
- [7] K. Bea, H. Moon, S. Sohn, S. Kim, “Hawkeye: Hectometer-range subcentimeter localization for large-scale mmWave backscatter,” in Proc. Mobile Systems Applications and Services, 2023.
- [8] 조원철, 장갑석, 김용선, 고영조, “Zadoff-Chu 시퀀스를 이용한 정밀 거리 추정,” 2024년도 한국통신학회 하계 종합학술발표회, June, 2024.