

사이드링크 PRS 기반의 통합 감지 및 통신기술 적용을 통한 목표 탐지 연구

박준희, 엄수빈, 김주혁, 오상우, 이혁
한국자동차연구원

{junhpark, sbeom, jhkim5, swoh, hylee}@katech.re.kr

A Study on the Sidelink PRS-based Integrated Sensing and Communication for Target Detection

Junhee Park, Subin Eom, Juhyeok Kim, Sangwoo Oh, Hyuk Lee
Korea Automotive Technology Institute (KATECH)

요 약

본 논문은 NR-V2X의 사이드링크 PRS를 최근 주목받고 있는 통합 감지 및 통신 기술에 활용하기 위한 연구를 수행한다. 사이드링크 PRS를 송신하는 V2X 단말을 가정하고, 목표물로부터 반사되어 돌아오는 사이드링크 PRS 에코 신호를 수신하여 목표 탐지가 가능한지를 시뮬레이션 기반으로 검증하며, 이를 통해 사이드링크 PRS가 ISAC 시스템에서 센싱 신호로 활용될 수 있는 적합성을 평가하고자 한다. 시뮬레이션 결과를 통해 사이드링크 PRS 또한 ISAC 시스템에서 통신과 센싱 기능을 효과적으로 통합할 수 있는 잠재력을 지니고 있음을 확인한다.

I. 서론

최근 논의되는 차세대 이동통신 시스템에서는 고속 통신과 고정밀 센싱 기능을 동시에 제공하는 통합 감지 및 통신(Integrated Sensing and Communication, ISAC) 기술이 핵심 요소로 부각되고 있다. 특히 미래 모빌리티, 산업 및 물류 자동화, 디지털 트윈 연계 확장현실 및 디스플레이 표출 서비스, 공공 안전 모니터링 등 첨단 서비스 수요를 만족시키기 위해 ISAC의 상용화가 요구되고 있으며, 이를 위해 기존 통신 인프라를 최소한의 변경으로 센싱 기능을 확장하는 연구가 활발히 진행되고 있다.[1] ISAC 기술을 효과적으로 구현하기 위해서는 통신 신호를 센싱 목적으로 재활용할 수 있어야 한다. 이러한 관점에서 3GPP Release 15 표준부터 정의된 하향링크 측위 참조 신호(Positioning Reference Signal, PRS)는 우수한 자기 상관 특성과 유연한 자원 매핑 구조를 바탕으로 센싱 신호로서의 활용 가능성이 주목받기 시작하였다.[2]

하향링크 PRS는 본래 이동통신망 내에서 단말 측위를 지원하기 위해 설계되었으며, 수신 단말이 최종적인 위치를 계산하는 구조를 가지기 때문에 기지국에서는 단말의 위치 정보를 실시간으로 획득하기 어렵다는 한계가 있다. 그러나 PRS를 ISAC에 활용할 경우, 송신한 PRS의 반사 에코를 수신하여 목표물을 직접 탐지할 수 있으므로, 이러한 특성을 기반으로 PRS를 이용한 ISAC 시스템 연구가 활발히 진행되고 있다.[3] 그러나 기존 PRS 기반 센싱 연구들은 주로 Uu 링크를 통한 셀룰러 기지국(Base Station, BS)의 하향링크 송신을 가정하고 있으며, PC5 링크를 사용하는 노변 기지국(Roadside Unit, RSU)이나 차량 탑재 단말기(On-Board Unit, OBU) 등 V2X 단말 환경에서의 통합 감지 성능에 대한 분석은 미비한 실정이다. 최근 3GPP

release 18규격에서는 하향링크 PRS와 별개로 PC5 링크에서 NR-V2X 통신을 위한 사이드링크(Sidelink) PRS의 세부 설정을 별도로 정의하기 시작하였으며, 이에 따른 가용 주파수 대역 및 자원 매핑 구조에도 차이가 존재하여 기존의 셀룰러 기반 하향링크 PRS를 활용한 ISAC 연구 결과를 사이드링크 PRS에 그대로 적용하는 데에는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 3GPP 표준에 따라 정의된 사이드링크 PRS를 송신하는 V2X 단말을 가정하고, 해당 단말이 주변 목표물로부터 반사되어 돌아오는 PRS 에코 신호를 수신하여 목표 탐지가 가능한지를 시뮬레이션 기반으로 검증하였다. 이를 통해 사이드링크 PRS의 ISAC 기술 적용 가능성을 평가하고, 실제 차량 통신 환경에서 통신-센싱 통합 서비스를 실현하기 위한 기반 기술로서의 적합성을 분석하고자 한다.

II. 본론

본 논문에서는 V2X 단말이 3GPP 규격에서 정의된 PRS를 전송하는 상황을 가정한다. V2X 단말은 시간 도메인에 한 슬롯 당 14개의 OFDM 심볼을 이어서 전송하며, 하나의 OFDM 심볼은 N_{RB} 개의 RB를 차지한다고 가정했을 때 Δf 간격의 총 $N_{SC} = N_{RB} * 12$ 개만큼의 서브캐리어에 사이드링크 PRS 시퀀스를 할당하게 된다. 이 때 한 심볼을 구성하는 N_{SC} 개의 서브캐리어에 대해, PRS는 K_{comb} 간격마다 한 번씩 할당되며, K_{comb} 값 및 주파수 오프셋 설정값에 따라 이어지는 다음 번 심볼에는 이전 심볼과 다른 서브캐리어 위치에 사이드링크 PRS가 할당되고 이 패턴은 K_{comb} 심볼마다 반복된다. 이 때 3GPP 표준은 최대 12개의 comb 패턴을 허용하는 하향링크 PRS와 달리, 사이드링크 PRS는 최대 6개 까지만을 허용하며,

하나의 슬롯에 PRS를 할당할 수 있는 최대 심볼 수 또한 차이가 있다.[4] 한 슬롯 내에서 최대 할당될 수 있는 OFDM 심볼의 개수는 L_{SL-PRS} 이다.

해당 V2X 단말은 N_{slot} 개의 슬롯에서 PRS를 전송 후 목표 물체에서 전달되는 에코 신호를 수신하며, 이 때 목표 물체 $i=1, \dots, N_{target}$ 및 클러터(clutter)에서 반사된 후, m 번째 OFDM 심볼의 n 번째 서브캐리어에서 수신하는 신호 $y_{(n,m)}$ 는 송신 사이드링크 신호 $s_{(n,m)}$ 에 유효 채널에 대해 아래와 같이 정의되며,

$$y_{(n,m)} = \left(\sum_i h_{(n,m)}^i + h_{(n,m)}^{clutter} \right) s_{(n,m)} + z_{(n,m)}, \quad (1)$$

i 번째 목표 물체에서 수신된 신호의 유효 채널 $h_{(n,m)}^i$ 은 다음과 같다.

$$h_{(n,m)}^i = \alpha^i \exp(j2\pi(-(f_c + n\Delta f)\tau^i + mf_D^i/\Delta f)). \quad (2)$$

여기서 $z_{(n,m)}$ 는 잡음 신호, f_c 는 캐리어 주파수를 의미하며,

α^i 는 V2X 단말과 목표 물체 사이의 거리, V2X 단말 안테나 이득 및 목표 물체의 레이더 반사 단면적(Radar Cross Section, RCS)이 반영된 신호 감쇄 계수이다. 또한 τ^i , f_D^i 는 각각 V2X 단말과 목표 물체의 거리에 따른 채널 지연, 상대 속도에 따른 도플러 천이이다.

수신된 에코 신호 $y_{(n,m)}$ 는 사전에 시간-주파수 자원에 할당된 사이드링크 PRS sequence를 활용하여 채널을 추정하는 데 사용할 수 있으며, 주파수 도메인에서 K_{comb} 개 서브캐리어마다 할당되는 PRS의 특성상 PRS가 할당되지 않은 영역에서의 추정 채널값은 0으로 표현할 수 있다. 추정된 채널은 $(N_{SC} \times N_{symbol})$ 의 사이즈를 갖는다

추정된 채널의 서브캐리어 도메인과 시간 도메인에서 각각 IDFT와 DFT를 수행한 후 거리-도플러 맵을 획득할 수 있으며, 해당 맵의 서브캐리어 도메인에서는 목표 물체의 거리를, 시간 도메인에서는 V2X 단말과 목표 물체 사이의 상대 속도를 획득할 수 있다.

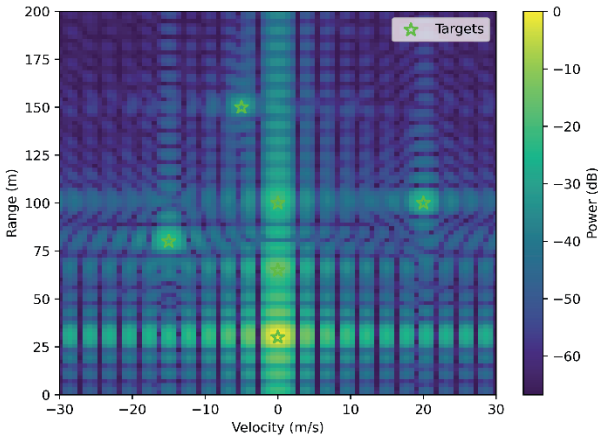


그림 1. 사이드링크 PRS 기반 거리-도플러 맵

사이드링크 PRS를 통한 통합 감지 및 통신 시스템에서의 목표 탐지가 가능한 지 확인하기 위해 다음의 환경 하에서 시뮬레이션을 수행하였다. 5.9GHz 중심 주파수에서 30kHz의 서브캐리어 간격, 20MHz의 NR 사이드링크 대역에서 하나의 슬롯 당 4개의 PRS가 할당되었으며, $N_{RB}=51$, $N_{slot}=20$, $K_{comb}=4$ 인 상황을 가정한 후, 사이드링크 PRS를 전송하는 V2X 단말로부터 임의의 거리 및 상대속도를 갖는 6개의 목표 물체에 대한 거리-도플러 맵을 도시하였다. 이 때, PRS 생성 및 시간-주파수 자원 할당은 3GPP 38.211 규격에 명시된 생성 및 할당 규칙을 따랐다. 거리-도플러 맵 생성 시에는

해상도를 높이기 위해 OFDM 그리드를 4배로 확장하여 빈 자리에는 zero-padding한 후 DFT 연산을 수행하였고, 최종적으로 계산된 거리-도플러 맵을 그림 1로 도시하였다.

3GPP NR 사이드링크 규격을 만족하는 사이드링크 PRS 설정 및 V2X 주파수 대역에서, 사이드링크 PRS의 에코 신호를 수신한 V2X 단말에서 계산된 거리-도플러 맵 상 목표 물체 좌표와 동일한 위치에 높은 전력값이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 3GPP Release 18에서 새롭게 정의된 NR-V2X 사이드링크 PRS를 기반으로, V2X 단말이 전송한 PRS 신호의 반사 에코를 수신하여 목표 물체를 탐지할 수 있는지를 확인하였다. 다수의 목표 물체를 고려한 거리-도플러 맵 분석 결과, 수신된 에코 신호로부터 생성된 맵 상에서 실제 목표 물체와 일치하는 위치에서 높은 전력의 응답이 관찰되어, 사이드링크 PRS가 V2X 환경에서도 통신과 센싱을 동시에 수행할 수 있는 ISAC 기술의 유효한 구성 요소가 될 수 있음을 확인하였다. 향후 해당 기술은 미래 자동차의 차량용 정보 디스플레이에서 정보 표출을 위한 보조 정보를 획득하는 등, 다양한 미래 커넥티비티 연구 분야로 확장 가능할 것으로 보인다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 00448606, 소재부품기술개발사업)

참고 문헌

- [1] Y. Cui, F. Liu, X. Jing and J. Mu, "Integrating Sensing and Communications for Ubiquitous IoT: Applications, Trends, and Challenges," in *IEEE Network*, vol. 35, no. 5, pp. 158-167.
- [2] M. Golzadeh *et al.*, "Joint Sensing and UE Positioning in 5G-6G: PRS Range Estimation with Suppressed Ambiguity," *2024 IEEE Radar Conference (RadarConf24)*, Denver, CO, USA, 2024, pp. 1-6.
- [3] E. Özbay, P. K. Bishoyi and M. Petrova, "Empowering 5G PRS-Based ISAC with Compressed Sensing," *25th IEEE Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, Lucca, Italy, 2024.
- [4] 3GPP TS 38.211 v18.6.0, "NR; Physical Channels and Modulation (Release 18)".