

IRS 를 이용한 가상 LOS 기반 PCL 시스템에서의 표적 탐지 성능 분석

김지현, 전민욱, 김형남*

부산대학교

kjihyeon@pusan.ac.kr, *hnkim@pusan.ac.kr

Performance Analysis of Target Detection in IRS-Assisted Virtual LOS PCL Systems

Ji-Hyeon Kim, Min-Wook Jeon, Hyoung-Nam Kim*
Pusan National University

요 약

수동형 레이더 기반 PCL(passive coherent location) 시스템은 별도의 송신기 없이 상용 통신 신호를 활용하여 표적을 탐지할 수 있는 저비용 감시 기술이지만, 송신기-수신기 간 직접 경로가 차단된 NLOS 환경에서는 기준 채널 확보가 어려워 탐지 성능이 크게 저하되는 한계를 가진다. 본 논문에서는 이러한 문제를 완화하기 위해 IRS(intelligent reflecting surface)를 이용해 기준 채널을 형성하는 가상 LOS 기반 PCL 시나리오를 고려한다. 기준 채널은 Tx-IRS-Rx 경로로, 감시 채널은 Tx-표적-Rx 경로의 표적 반사 신호로 구성하였으며, CAF 를 활용하여 표적 탐지를 수행하였다. 모의실험 결과, 낮은 SINR 환경에서도 RD 맵에서 표적 성분이 관측되었고, 이를 통해 IRS 를 이용해 기준 채널을 확보한 경우에도 CAF 기반 표적 탐지가 유효한 결과를 가짐을 확인하였다.

I. 서 론

최근 상용 통신 또는 방송 신호를 이용해 별도의 송신기 없이 표적을 탐지하는 수동형 레이더(passive coherent location, PCL) 기술이 저비용·저피탐 감시 정찰 솔루션으로 주목받고 있다[1]. PCL 시스템은 송신원이 외부에 존재하여 탐지 대상에게 노출되지 않으며, 기존 주파수 자원을 재사용할 수 있어 군사 감시, 공공 안전, 무인 항공기(UAV) 감시 등 다양한 분야에서 활용 가능성이 높다[2-4]. 일반적으로 PCL 시스템은 기준 채널(reference channel)과 감시 채널(surveillance channel)로 구성되며, 두 채널 간 상호상관을 통해 거리 및 도플러 정보를 추정하는 CAF(cross-ambiguity function)를 활용한다.

그러나 PCL 시스템의 성능은 송신기와 수신기 사이의 LOS(line-of-sight) 경로 확보 여부에 크게 의존한다. 도심 지역이나 실내 환경과 같이 LOS 가 차단된 NLOS(non-line-of-sight) 환경에서는 기준 채널의 직접파가 약화되거나 확보되지 않아, CAF 기반 거리-도플러 추정 성능이 급격히 저하되는 문제가 발생한다.

이러한 한계를 완화하기 위한 대안으로, IRS(intelligent reflecting surface)를 활용해 가상 LOS(virtual LOS)를 형성하는 방식이 제안되고 있다. IRS 는 다수의 반사 소자를 통해 입사 신호의 위상 및 반사 특성을 제어함으로써 원하는 방향으로 에너지를 재지향할 수 있으며, 최근 6G 이동통신에서도 음영 지역 해소와 링크 품질 향상을 위한 핵심 요소로 활발히 연구되고 있다[5-7]. PCL 관점에서는 IRS 를 경유한 Tx-IRS-Rx 경로를 기준 채널로 활용함으로써, 직접파가 차단된 환경에서도

reference 신호를 확보할 수 있어 운용 범위를 확장할 수 있다.

본 논문에서는 NLOS 환경에서 IRS 를 이용해 기준 채널을 확보하는 가상 LOS 기반 PCL 시스템을 구성한다. 모의실험을 통해 IRS 기반 기준 채널이 PCL 처리에 적용 가능성을 확인하고, 가상 LOS 환경에서의 표적 탐지 결과를 제시한다.

II. 시스템 모델

1. PCL 시스템

PCL(passive coherent location) 시스템은 외부 기회 송신원에서 방사되는 신호를 이용하여 별도의 송신기 없이 표적을 탐지한다. 수신기는 기준 채널과 감시 채널을 통해 각각 직접 경로 성분과 표적 반사 성분을 수신하며, 두 채널 간 상관 처리를 통해 표적 정보를 추출한다. 본 논문에서는 시간 지연과 도플러를 동시에 분석하기 위해 CAF(cross-ambiguity function)를 사용하며, 다음과 같이 정의된다.

$$\text{CAF}(\tau, \nu) = \frac{1}{T} \int_T s_{\text{surv}}(t) s_{\text{ref}}^*(t - \tau) e^{-j2\pi \nu t} dt. \quad (1)$$

여기서 τ 와 ν 는 각각 시간 지연과 도플러 주파수, T 는 관측 시간을 의미한다. 또한, $s_{\text{surv}}(t)$ 는 감시 채널의 신호이며, $s_{\text{ref}}(t)$ 는 기준 채널의 신호이다. 직접 경로

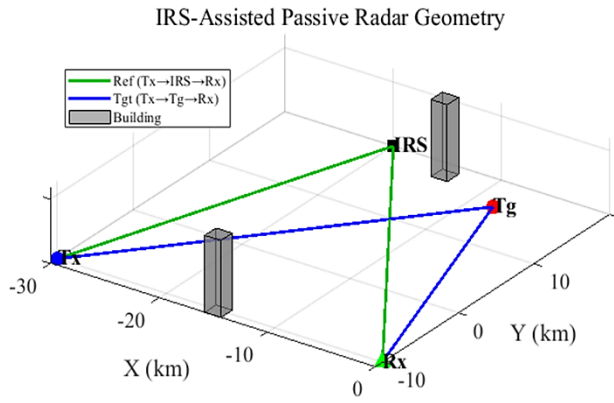


그림 1. IRS-assisted PCL 시나리오.

신호와 표적 반사 신호의 CAF 결과를 통해 표적 신호의 시간 지연 및 도플러 주파수를 추출하고 이를 이용하여 표적의 위치와 속도를 추정할 수 있다.

2. IRS-assisted PCL 시나리오

NLOS 환경에서 IRS 를 이용해 기준 채널을 형성하는 IRS-assisted PCL 시나리오는 그림 1 과 같이 나타낼 수 있다. 이 시스템은 송신기(Tx), 수신기(Rx), IRS, 그리고 표적(Tg)로 구성되며, 송신기와 수신기 사이의 직접 경로는 차단되어 있다고 가정한다. 송신기로부터 방사된 기회 신호(opportunistic signal)는 IRS 를 통해 반사된 후 수신기에 도달하며, 해당 신호가 기준 채널의 신호로 사용된다.

한편, 동일한 송신 신호는 표적에 반사되어 송신기-표적-수신기 경로를 따라 감시 채널로 수신된다. 수신기는 IRS 를 통해 형성된 기준 채널과 표적 반사 성분을 포함하는 감시 채널을 동시에 수신하며, 두 채널 간 상관 처리를 통해 표적 탐지를 수행한다. 이와 같은 구성은 직접 경로가 존재하지 않는 환경에서도 기준 신호를 확보할 수 있어, NLOS 환경에서의 PCL 운용 가능성을 확장할 수 있다.

III. 모의실험

모의실험에서는 NLOS 환경에서 IRS 를 이용해 기준 채널을 확보하는 IRS-assisted PCL 시나리오에서, CAF 기반 표적 탐지 성능을 확인한다. 시나리오는 그림 1 과 같이 Tx-Rx 직접 경로가 차단된 상황을 가정하고, 기준

표 1. 모의실험 파라미터.

Tx / Rx 위치 (km)	$[-30, -10] / [0, -10]$
IRS 위치 (km)	$[-20, 20]$
표적 위치 (km)	$[-8, 16]$
표적 속도	$[50, 50]$ m/s
기준 채널 SNR (dB)	30
감시 채널 SINR (dB)	-30:5:0

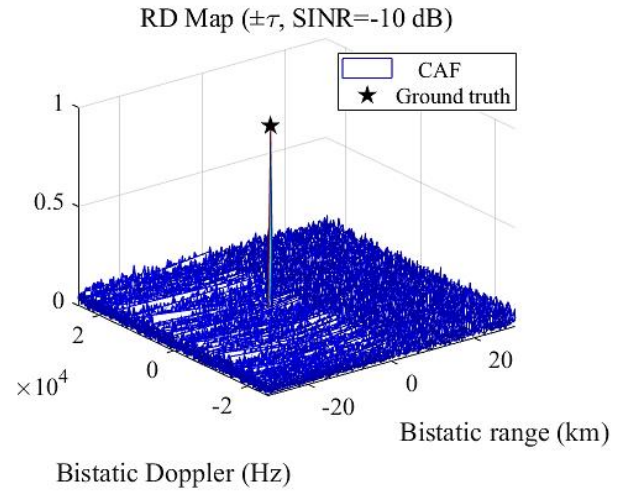


그림 2. IRS-assisted PCL 시나리오에서의 RD 맵.

채널은 Tx-IRS-Rx 경로로, 감시 채널은 Tx-표적-Rx 경로의 표적 반사 신호로 구성하였다. 수신기는 원형 배열(uniform circular array)을 사용하며, 두 채널의 신호를 이용해 CAF 를 계산하여 range-Doppler(RD) 맵을 생성하였다. 기준 신호 성분 억제를 위해 ECA(extensive cancellation algorithm) 기반 전처리를 적용하였다. 모의실험에 사용된 주요 파라미터는 표 1 과 같으며, 송신 신호는 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)을 사용하였다.

그림 2 는 감시 채널에서 표적 반사 신호의 전력과 간섭(감시 채널에 포함된 기준 신호) 및 잡음 전력의 비인 SINR(signal-to-interference-and-noise ratio)을 -10 dB 로 설정한 조건에서 $\pm\tau$ (시간 지연)를 포함한 bi-CAF 로 생성한 RD 맵을 나타낸다. 기준 채널이 Tx-IRS-Rx 우회 경로이므로, 표적 반사 성분과의 상대 지연이 음수로 나타날 수 있어 $\pm\tau$ 를 함께 탐색하였다. 또한 기하 구조로부터 계산한 표적의 ground truth(GT) 지연-도플러 좌표를 마커로 표시하여 CAF 피크의 정합 여부를 확인하였다. 그림 2 에서 GT 위치에서 뚜렷한 피크가 관측되며, 이는 IRS 를 통해 확보한 기준 채널을 이용하였을 때에도 CAF 기반 표적 탐지가 유효함을 보여준다.

그림 3 은 표적 반사 성분의 SINR 을 -30 dB 부터 0 dB 까지 5 dB 간격으로 변화시켰을 때의 CAF peak-to-floor(P2F) 결과를 나타낸다. P2F 는 RD 맵에서의 최대값(peak)과 바닥 성분(floor, median 기반)의 비율

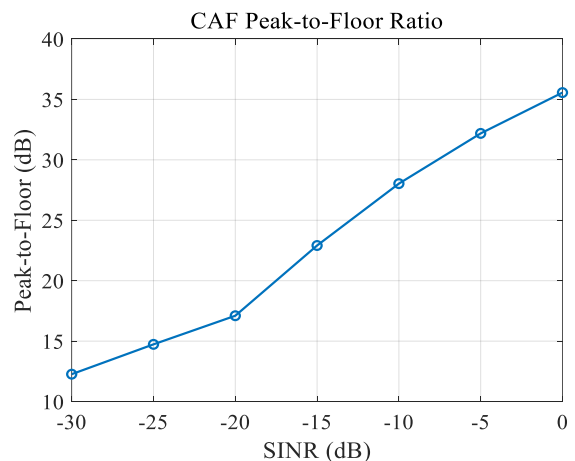


그림 3. SINR 변화에 따른 CAF P2F 결과.

dB 로 정의한 지표로, 값이 클수록 표적 피크가 잡음 및 간섭 성분 대비 더 뚜렷함을 의미한다. 그림에서 확인할 수 있듯이 SINR이 증가함에 따라 P2F가 증가하며, 낮은 SINR 영역에서도 일정 수준의 탐지 성능이 확보됨을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 송신기-수신기 간 직접 경로가 차단된 NLOS 환경에서 IRS 를 이용해 기준 채널을 확보하는 가상 LOS 기반 PCL 시나리오를 구성하고, CAF 를 활용한 표적 탐지 가능성을 모의실험으로 검증하였다. Tx-IRS-Rx 우회 경로를 기준 채널로 사용하는 조건에서 RD 맵을 생성한 결과, SINR 이 -10 dB 조건에서도 표적의 ground truth 지연-도플러 위치에서 뚜렷한 피크가 관측되었다. 또한 SINR 을 -30 dB 부터 0 dB 까지 변화시키며 peak-to-floor 지표를 분석하였을 때, SINR 증가에 따라 탐지 성능이 단조적으로 향상됨을 확인하였다. 이러한 결과는 IRS 를 활용한 기준 채널 구성이 NLOS 환경에서 PCL 운용 가능성을 확장할 수 있음을 보여주며, 향후에는 다양한 IRS 설정 및 NLOS 환경 조건을 고려하여 탐지 성능을 추가로 분석할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025 년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-00557790).

참 고 문 헌

- [1] J. Baek, et al., "Target Tracking Initiation for Multi-Static Multi-Frequency PCL System," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 10, pp. 10558-10568, 2020.
- [2] S. K. Joshi, S. V. Baumgartner, A. B. C. da Silva and G. Krieger, "Direction-of-Arrival Angle and Position Estimation for Extended Targets Using Multichannel Airborne Radar Data," in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 19, pp. 1-5, 2022.
- [3] L. C. Tran, A. T. Le, X. Huang, E. Dutkiewicz, D. Ngo and A. Tapparugssanagorn, "Complexity Reduction for Hybrid TOA/AOA Localization in UAV-Assisted WSNs," in *IEEE Sensors Letters*, vol. 7, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2023.
- [4] 김영진, 이도현, "FDOA 정보 기반 멀티스테틱 PCL 시스템 위치추정 성능 분석," *전자공학회논문지*, vol. 29, no. 4, pp. 521-531, 2021 년.

- [5] Q. Wu, S. Zhang, B. Zheng, C. You and R. Zhang, "Intelligent Reflecting Surface-Aided Wireless Communications: A Tutorial," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 5, pp. 3313-3351, May 2021.
- [6] M. Di Renzo et al., "Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces: How It Works, State of Research, and The Road Ahead," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 11, pp. 2450-2525, Nov. 2020.
- [7] E. Basar and H. V. Poor, "Present and Future of Reconfigurable Intelligent Surface-Empowered Communications," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 38, no. 6, pp. 146-152, Nov. 2021.