

OTFS 기반 수동형 레이더 시스템의 도플러 추정 성능 분석

김지현, 신다민, 김형남*
부산대학교

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

Performance Analysis of Doppler estimation in OTFS-based PCL system

Ji-Hyeon Kim, Da-Min Shin, Hyoung-Nam Kim*
Pusan National University

요 약

표적의 위치 추정을 위한 PCL(passive coherent location) 시스템은 별도의 송신기 없이 주변의 상용 통신 신호를 활용하여 표적을 탐지하는 저비용·고효율 감시 기술로 주목받고 있다. 하지만 PCL 시스템에서 널리 사용되는 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 신호는 높은 도플러 환경에서 부반송파 간 직교성이 손상되어 도플러 추정 성능이 급격히 저하되는 한계를 가진다. 본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 OTFS(orthogonal time frequency space) 변조 방식을 PCL 시스템에 적용하고, 기존 OFDM 방식과의 도플러 추정 성능을 비교·분석한다. OTFS는 지연-도플러 도메인 기반의 전송 방식으로 도플러 확산에 강인한 특성을 가지며, 이를 통해 고속 이동 표적에 대해 강건한 도플러 추정 성능을 제공할 수 있다. 시뮬레이션 결과, OTFS 기반 시스템은 전 도플러 범위에 걸쳐 낮은 추정 오차를 유지하였고, 특히 높은 도플러 환경에서도 우수한 성능을 보이며 OFDM 기반 방식 대비 우수한 추정 성능을 확인하였다.

I. 서 론

최근 별도의 송신 장비 없이 주변의 상용 통신 및 방송 신호를 활용해 표적을 탐지하는 수동형 레이더 시스템(passive coherent location, PCL) 기술이 저비용·고효율 감시 정찰 솔루션으로 주목받고 있다[1]. PCL 시스템은 송신기가 외부에 존재해 탐지 대상에게 노출되지 않으며, 기존 주파수 자원을 재활용할 수 있어 군사 정찰, 공공 안전, 도심 항공 모빌리티 감시 등 다양한 분야에서 활용 가능성이 높다[2-4]. 이와 같은 PCL 시스템은 통신 신호 송신기로부터 직선상으로 수신되는 직접 경로 신호와 표적에 반사된 표적 반사 신호 간의 상호상관을 통해 거리 및 도플러 정보를 추정하는 CAF(cross-ambiguity function)를 활용한다.

PCL 시스템에서 사용되는 신호는 높은 스펙트럼 효율과 구현의 용이성으로 인해, FM 라디오, DAB(digital audio broadcasting), 4G/5G 이동통신 등에서 활용되는 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 기반의 상용 통신 신호 등이 있다[5]. 이들 신호는 넓은 주파수 대역을 점유하고 연속적으로 송신되며, 공공 영역에서 쉽게 수신할 수 있어 PCL 시스템 구현에 활용될 수 있다. 그러나 OFDM은 시간-주파수(time-frequency) 도메인을 기반으로 하며, 도플러 확산에 매우 취약한 구조적 한계를 가진다[6]. 고속으로 이동하는 표적을 탐지할 경우, 부반송파 간 직교성이 손상되고, 이는 CAF의 피크 왜곡과 분산이 발생해 거리 및 도플러 추정 성능 저하로 이어진다.

OTFS(orthogonal time frequency space) 변조 방식은 시간-주파수 도메인이 아닌 지연-도플러(delay-Doppler) 도메인 상에서 신호를 구성함으로써, 다중 경로 및 도플러 효과에 강인한 특징을 가진다[7]. 특히 CAF 기반 표적 탐지 과정에서 도플러 추정 성능 향상을

기대할 수 있어 고속 표적을 안정적으로 추적하는 PCL 시스템에 높은 적용 가능성을 지닌다.

본 논문에서는 OFDM 기반 PCL 시스템의 도플러 추정 한계를 보완하기 위해 OTFS 신호를 적용한다. 모의실험 결과를 통해 기존의 OFDM 기반 방식과 OTFS 기반 방식의 도플러 주파수 추정 성능을 비교·분석한다.

II. 시스템 모델

1. PCL 시스템

PCL 시스템은 독립된 송신기가 존재하지 않고, 외부의 기회 송신원에서 방사되는 신호를 이용하여 표적을 탐지한다. 시스템은 일반적으로 직접 경로 신호를 수신하는 기준 채널(reference signal)과 표적으로부터 반사된 신호를 수신하는 감시 채널(surveillance channel)로 구성된다. 두 신호 간의 상호상관을 통해 표적의 거리와 도플러 주파수를 추정할 수 있으며, 이때 사용되는 것이 식 (1)과 같은 CAF(cross-ambiguity function)이다.

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

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

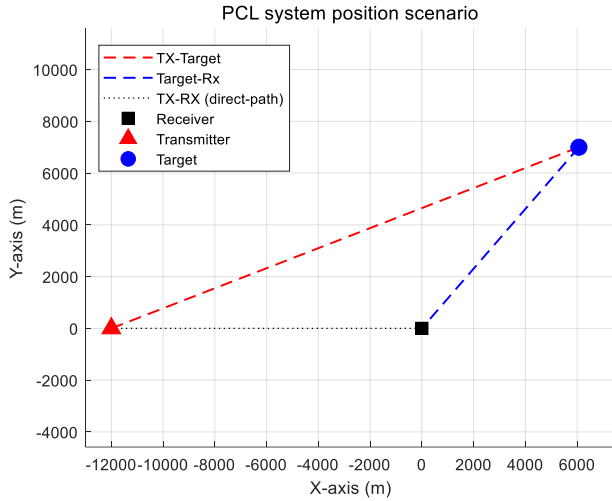


그림 1. 송신기, 수신기 및 표적의 위치.

2. OFDM 송신 신호 모델

OFDM은 고속의 데이터 스트림을 다수의 직교하는 협대역 부반송파(subcarrier)로 나누어 전송하는 방식이다[5, 6]. 시간-주파수 도메인의 각 격자점에 심볼을 할당한 후, IFFT(inverse fast Fourier transform)을 통해 시간 영역 신호를 생성한다. OFDM은 구현이 간단하고 주파수 효율이 높지만, 다중 경로 지연이나 도플러 확산이 존재하는 환경에서는 부반송파 간 직교성을 파괴하여 성능이 저하되는 단점이 있다.

3. OTFS 송신 신호 모델

OTFS는 기존의 시간-주파수 도메인이 아닌, 채널의 물리적 특성을 직접적으로 나타내는 지연-도플러 도메인에서 정보를 전송한다[7]. 전송할 심볼을 지연-도플러 도메인의 격자점에 배치한 후, ISFFT(inverse symplectic finite Fourier transform, ISFFT)을 통해 시간-주파수 도메인 신호로 변환한다. 이후, OFDM과 유사한 방식으로 시간 영역 신호로 변환하여 전송한다. 이러한 구조 덕분에 OTFS는 시간-주파수 도메인에서 발생하는 채널 왜곡을 지연-도플러 도메인 전체에 분산시켜, 높은 도플러 환경에서도 안정적인 통신 및 탐지 성능을 제공한다.

III. 모의실험

모의실험에서는 OFDM 및 OTFS 신호를 이용한 PCL 시스템에서 표적의 도플러 주파수 추정 성능을 비교 및 분석한다. 송, 수신기 및 표적의 위치는 그림 1과 같다. 송신 신호는 각각 OFDM과 OTFS를 동일한 조건에서 생성하였으며, 표적은 송수신기 사이의 bistatic 거리 11.69km와 도플러를 갖는 반사신호를 생성하였다. 표적의 도플러 주파수는 100 Hz부터 2000 Hz까지 100 Hz 간격으로 변화시켜 성능을 비교하였다. 표적의 실제 도플러 주파수와 CAF 기반으로 추정된 도플러 주파수 사이의 오차를 정량적으로 분석하기 위해, 각 도플러 환경에서 100회 앙상블 평균을 수행하여 RMSE(root mean square error)를 계산하였다.

그림 2는 표적의 도플러 주파수 변화에 따른 OFDM 및 OTFS 기반 PCL 시스템의 도플러 추정 RMSE를 보여준다. OFDM 기반 시스템의 경우 도플러 주파수가 증가함에 따라 추정 오차가 점진적으로 증가하여 1600 Hz 이상에서는 RMSE가 5 Hz를 초과하며 성능이

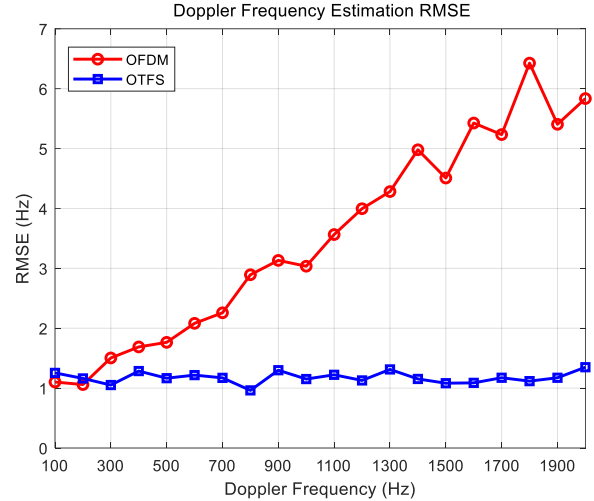


그림 2. OFDM과 OTFS 기반 PCL 시스템의 도플러 추정 RMSE 비교.

열화되었다. 이는 고속 이동 표적에 의해 발생하는 ISI(inter-symbol interference) 및 ICI(inter-carrier interference)가 OFDM 시스템의 직교성을 파괴하여 도플러 추정 성능을 크게 저하시키기 때문이다. 반면, OTFS 기반 시스템은 전 도플러 주파수 영역에 걸쳐 1.5 Hz 이하의 낮은 RMSE를 안정적으로 유지하였으며, 특히 2000 Hz에 이르는 높은 도플러 환경에서도 도플러 추정 성능이 우수함을 확인할 수 있다. 이는 OTFS 변조 방식이 지연-도플러 도메인에서 에너지를 집중시켜, 도플러 확산 환경에서도 강인한 성능을 보이기 때문이다. 이러한 결과는 OTFS 기반 PCL 시스템이 고속 이동 표적 감지 환경에서 기존 OFDM의 한계를 극복하고 신뢰도 높은 도플러 추정 성능을 제공할 수 있음을 보여준다.

IV. 결론

본 논문에서는 고속 이동 표적 탐지 환경에서 기존 OFDM 기반 PCL 시스템의 도플러 추정 한계를 극복하기 위해 OTFS 변조 방식을 PCL 시스템에 도입하고, 그 성능을 OFDM 방식과 비교 분석하였다. 모의실험을 통해, OTFS는 도플러 주파수가 2000 Hz에 이르는 높은 도플러 주파수 환경에서도 RMSE 1.5 Hz 이하의 안정적인 추정 정확도를 유지함을 확인하였다. 반면, OFDM은 ICI 및 ISI로 인해 CAF 피크가 왜곡되어 도플러 추정 오차가 증가하였다. 이러한 결과는 OTFS가 고속 이동 표적 탐지 환경에서 요구되는 강인하고 신뢰도 높은 도플러 추정 성능을 제공할 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년 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. Taparugssanagorn, "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] 김호재, 박근호, 김동규, 김형남, "다중 수신기 배치에 따른 수동형 바이스테틱 레이더 시스템의 표적 위치 추정 성능 분석," *한국통신학회논문지*, vol. 43, no. 5, pp. 833-842, 2018 년 5 월.
- [6] J. Yang, "Doppler spread estimation and data detection by discrete fourier transform and least-square algorithm in time domain for mobile OFDM systems," *2014 Int. Conf. Wireless Commun. and Sensor Netw.*, pp. 366-370, Wuaan, China, Dec. 2014.
- [7] 박병학, 유홍균, "높은 도플러와 시간 지연을 효과적으로 보상하기 위한 OTFS 시스템과 OFDM 의 성능 비교 및 평가," *한국통신학회논문지*, vol. 45, no. 1, pp. 13-19, 2020 년 1 월.