MIMO-PMCW 시스템에서 RPCA 기반 코드 간 간섭 완화를 통한 타깃 탐지 성능 향상

이용희, 이성욱

중앙대학교

yhl0114@cau.ac.kr, seongwooklee@cau.ac.kr

RPCA-based Inter-Transmitter Code Interference Mitigation for Enhanced Target Detection in MIMO-PMCW Systems

Yonghee Lee, Seongwook Lee

Chung-Ang Univ.

요 약

본 논문은 Multiple-input multiple-output (MIMO) phase-modulated continuous wave (PMCW) 시스템에서 코드 간 간섭으로 인해 발생하는 거리-속도 맵에서의 타깃 탐지 성능 저하 문제를 해결하기 위해 Robust principal component analysis (RPCA) 기반 간섭 완화 방법을 제안한다. 제안된 기법은 RPCA를 거리-속도 맵에 적용해 Low-rank 구조를 갖는 코드 간 간섭 성분과 희소한 분포의 타깃 성분을 분리함으로써 간섭을 완화한다. 시뮬레이션 결과, 단일 및 다중 타깃 시나리오에서 Signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR)이 각각 25.95 dB와 21.11 dB 향상되고 간섭 영향에 의해 기존에 검출되지 않았던 타깃도 안정적으로 검출됨에 따라, 제안 기법을 통해 간섭 완화 효과와 함께 타깃 탐지 성능이 유의미하게 향상됨을 확인하였다.

Ⅰ. 서 론

Multiple-input multiple-output (MIMO) 기반 Phase-modulated continuous wave (PMCW) 시스템은 높은 거리 해상도를 제공하는 동시에 통신 기능 통합에 유리하다는 점에서 차세대 통합 센싱 및 통신 시스템으로 주목받고 있다 [1]. 그러나 MIMO-PMCW 시스템에서는 서로 다른 송신 안테나에서 사용되는 Pseudo-noise (PN) 코드 간의 비직교성으로 인해 코드 간 간섭이 발생할 수 있다. 이러한 간섭 성분은 거리 - 속도 맵 전반에 걸쳐 분포하며, 특히 속도 축을 따라 강한 사이드로브 형태로 나타난다. 이로 인해 신호 세기가 약한 타깃 성분이 인접한 간섭 성분에 의해 검출되지 못해 타깃 탐지 성능 저하로 이어질 수 있다.

거리-속도 맵에서 타깃에 대한 성분은 특정 영역에 국한된 희소한 분포로 나타나는 반면, 간섭 성분은 유사한 패턴이 반복되는 Low-rank 구조로 나타난다. 한편, Robust principal component analysis (RPCA)는 관측 행렬을 Low-rank 성분과 희소 성분으로 분해함으로써 배경과 희소한 신호를 분리할 수 있는 기법으로 알려져 있다 [2]. 본 논문에서는 거리 - 속도 맵에서 나타나는 코드 간 간섭 성분과 타깃 성분의 구조적 차이에 주목하여, RPCA 기반의 코드 간 간섭 완화 기법을 제안한다.

Ⅱ. 본론

가. MIMO-PMCW 시스템

PMCW 시스템은 그림 1과 같이, 칩이라 불리는 -1과 1의 값을 갖는 이진 펄스로 구성된 PN 코드를 기반으로 반송파의 위상을 변조한 연속파 신호를 각 송신 안테나에서 시퀀스 주기 T_s 마다 반복적으로 송신한다. 송신된 신호는 타깃에 반사되어 수신되며, 이 과정에서 타깃과의 거리, 상대 속도, 각도 정보는 각각 시간 지연, 도플러 주파수, 공간 위상 성분으로 반영된다. MIMO 안테나 배열을 통해 수신된 신호는 하향 변환 및 샘플링 과정을 거치고 각 송신 안테나와 수신 안테나의 조합으로부터 가상 안테나 배열이 형성되며,

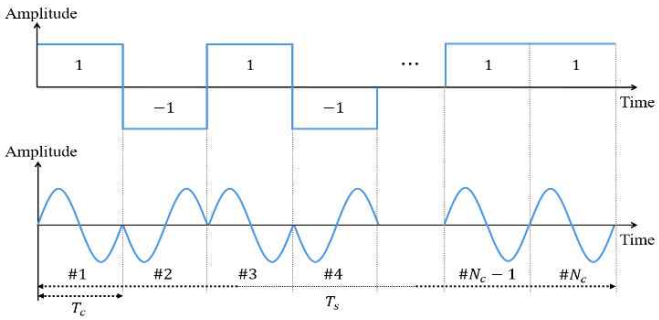

그림 1. PMCW 시스템의 송신 파형.

$$y[n,p,l] = \sum_{i=1}^{N_T} c\left[n - \left\lfloor \frac{2R_i}{cT_c} \right\rfloor\right] \times \exp\left[j2\pi\left(\frac{2f_c v_i T_s p}{c} + \frac{f_c d_l \sin\theta_i}{c}\right)\right] \quad (1)$$

과 같이 표현된다. 여기서 n, p, l, i는 각각 칩 인덱스, 시퀀스 인덱스, 가상 안테나 배열 인덱스, 타깃 인덱스를 나타낸다. 또한 $c[n]$는 PN 코드의 n번째 이진 위상 변조 칩을, f_c는 반송파 주파수를, N_T 는 타깃의 개수를, T_c는 칩 주기를 나타낸다. 수신 신호는 모든 가상 안테나 배열에 대하여 거리 추정을 위해 칩 인덱스를 기준으로 송신 코드와의 상관 처리를 거치고 상대 속도 추정을 위해 시퀀스 인덱스를 기준으로 고속 푸리에 변환을 적용함으로써, 복소수 값의 거리-속도 맵을 얻을 수 있다.

이상적인 경우 서로 다른 송신 코드 간 간섭은 상관 처리 과정에서 제거된다. 그러나 코드 간 비직교성, 잡음 등의 영향으로 인해 간섭 성분이 거리-속도 맵 전반에 걸쳐 잔존하게 되며, 이는 속도 축으로 강한 사이드로브 형태로 나타나 신호 세기가 약한 타깃의 검출을 방해하며 타깃 탐지 성능을 저하시킨다.

나. RPCA 기반 코드 간 간섭 완화 기법

거리-속도 맵에서 나타나는 코드 간 간섭 성분은 속도 축 전반에 걸쳐 상관성이 높은 형태로 분포하며, 이로 인해 Low-rank 구조를 형성한다. 반면, 타깃에 의해 반사된 신호는 특정 거리와 속도 영역에 국한되어 나타나므로 희소한 분포를 갖는다. 이러한 특성에 따라, 본 논문에서는 거리-속도 맵을 Low-rank 성분과 희소 성분으로 분해하기 위해 RPCA 기법을 적용하여 타깃 신호와 코드 간 간섭을 분리하는 방법을 제안한다.

각 가상 안테나 배열에 대해 얻은 복소수 거리-속도 맵 행렬 D_l는

$$D_l = L_l + S_l \tag{2}$$

과 같이 표현될 수 있다. 여기서 L_l은 코드 간 간섭 및 잡음 성분에 해당하는 Low-rank 행렬, S_l는 실제 타깃의 반사 신호에 해당하는 희소 행렬을 나타낸다. 이렇게 희소 행렬과 Low-rank 행렬로 분리하기 위해 RPCA를 적용하며, 두 성분은

$$\min_{L_l, S_l} \| L_l \|_* + \lambda \| S_l \|_1 \quad \text{subject to} \quad D_l = L_l + S_l \tag{3}$$

과 같은 최적화 문제를 통해 추정된다. 여기서 $\| \cdot \|_*$은 핵 노름, $\| \cdot \|_1$은 원소별 l_1 노름을 나타내며, λ는 Low-rank 성분과 희소 성분 간의 균형을 조절하는 파라미터이다. RPCA를 통해 분리된 희소 성분 S_l은 간섭이 완화된 타깃 반사 성분만을 포함하므로, 이를 기반으로 이후 간섭 완화를 통한 타깃 탐지 성능 분석을 수행한다.

다. 시뮬레이션 결과

제안한 RPCA 기반 간섭 완화 기법의 탐지 성능을 검증하기 위해, 단일 타깃 및 다중 타깃 시나리오에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 성능 비교를 위해 RPCA 적용 전후의 거리-속도 맵에 Constant false alarm rate (CFAR) 알고리즘을 적용해 타깃을 검출하고, 검출된 타깃 영역을 신호 성분으로 정의하고 이외의 영역을 간섭 및 잡음 성분으로 간주하여 Signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR)를 계산하여 분석하였다.

그림 2는 33 m의 거리에서 상대 속도 $-20\,\mathrm{m/s}$로 이동하는 단일 타깃 시나리오에서 거리-속도 맵과 CFAR를 적용해 타깃을 검출한 결과를 나타낸다. RPCA를 적용하기 전 결과에서는 코드 간 간섭의 영향으로 인해 거리-속도 맵에서 속도 축을 따라 전반적으로 강한 사이드로브 형태의 간섭 성분이 나타났지만, 단일 타깃은 여전히 검출되었다. 반면, RPCA를 적용하여 희소 성분만으로 재생성된 거리-속도 맵에서는 간섭 영향이 효과적으로 완화되었고 타깃을 안정적으로 검출하였다.

다중 타깃 시나리오는 타깃과의 거리와 상대 속도를 각각 $(15\,\mathrm{m}, 15\,\mathrm{m/s})$, $(33\,\mathrm{m}, -20\,\mathrm{m/s})$, $(55\,\mathrm{m}, 10\,\mathrm{m/s})$로 설정하였고, 시뮬레이션 결과를 그림 3에 나타내었다. 단일 타깃 시나리오와 마찬가지로, RPCA 적용 전에는 거리-속도 맵 전반에 간섭 성분이 속도 축을 따라 분포하였다. 이러한 간섭 성분으로 인해, 상대적으로 먼 거리에 있는 신호

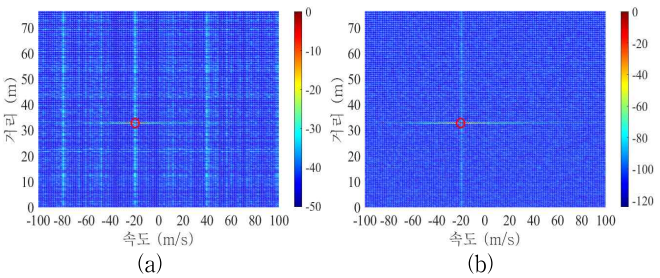

그림 2. 단일 타깃 시나리오에서의 거리-속도 맵과 CFAR를 적용한 타깃 검출 결과: (a) RPCA 적용 전 (b) RPCA 적용 후.

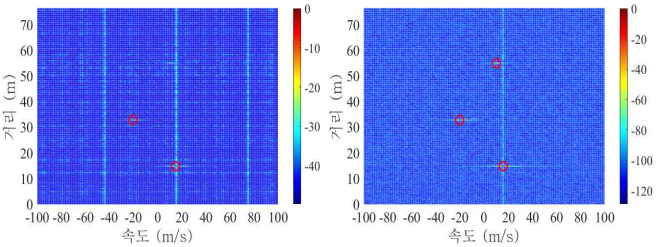

그림 3. 다중 타깃 시나리오에서의 거리-속도 맵과 CFAR를 적용한 타깃 검출 결과: (a) RPCA 적용 전 (b) RPCA 적용 후.

표 1. RPCA 적용 전후의 거리-속도 맵 기반 SINR 비교

시나리오 유형	RPCA 적용 전 SINR	RPCA 적용 후 SINR
단일 타깃 시나리오	17.43 dB	43.41 dB
다중 타깃 시나리오	19.37 dB	40.39 dB

세기가 약한 타깃이 검출되지 않는 문제가 발생하였다. 반면, 거리-속도 맵에 RPCA를 적용해 타깃에 대한 희소 성분을 분리한 경우 간섭 영향이 완화되어 모든 타깃이 명확하게 검출되었다.

마지막으로, 거리-속도 맵에서 검출된 타깃을 신호 성분으로 정의하여 RPCA 적용 전후의 SINR을 계산하였고, 그 결과를 표 1에 정리하였다. 단일 타깃 시나리오에서는 RPCA 적용 전 17.43 dB였던 SINR이 적용 후 43.41 dB로 25.95 dB가 향상되었고, 다중 타깃 시나리오에서는 기존의 19.37 dB에서 40.39 dB로 21.11 dB가 개선되었다. 이를 통해 제안한 RPCA 기반 간섭 완화 기법이 단일 및 다중 타깃 환경 모두에서 효과적으로 간섭을 억제하고 타깃 탐지 성능을 향상시킴을 확인하였다.

Ⅲ. 결론

본 논문에서는 MIMO-PMCW 시스템에서 발생하는 코드 간 간섭 문제 완화를 위해 거리-속도 맵에 RPCA를 적용하는 기법을 제안하였다. 제안된 기법을 통해 거리-속도 맵에서 Low-rank 구조를 갖는 간섭 성분과 희소한 분포로 나타나는 타깃 성분을 구조적 차이를 활용해 분리하였다. 시뮬레이션 결과, 단일 타깃 시나리오에서는 SINR을 25.95 dB 개선하였고, 다중 타깃 시나리오에서는 21.11 dB 개선함과 동시에 기존에 검출되지 않았던 타깃이 검출됨을 확인하였다. 이러한 결과를 통해 제안 기법이 코드 간 간섭을 완화하고 안정적인 타깃 탐지를 수행할 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(RS-2024-00347032, 차세대 자율주행 기술을 위한 PMCW 기반 MIMO 디지털 레이다 SoC 개발)과 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0020967, 스마트센서 전문인력양성사업).

참 고 문 헌

[1] L. Giroto de Oliveira, B. Nuss, M. B. Alabd, A. Diewald, M. Pauli, and T. zwick, “Joint radar-communication systems: modulation schemes and system design,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 70, no. 3, pp. 1521-1551, March 2022.

[2] E. J. Candès, X. Li, Y. Ma, and J. Wright, “Robust principal component analysis?” *Journal of the ACM*, vol. 58, no. 3, pp. 1-37, May 2011.