

DDM 레이다 시스템에서의 도플러 피크 집중 기법

유경진·강기문·한윤기·류혁*

주식회사 에이치엘클레무브 센서이노베이션랩

Doppler-Peak Concentration via Folding in DDM-Based MIMO FMCW

Kyungjin You · Kimoon Kang · Yunki Han · Hyuk Ryu*

¹⁾Sensor Innovation Lab, HL Klemove Corp., 21 Geumto-ro 80beon-gil, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi 13453, Korea
(Received 17 October 2025 / Revised 24 October 2025 / Accepted 27 October 2025)

Abstract : This paper proposes a new folding technique to mitigate Doppler dispersion in Doppler Division Multiplexing (DDM) MIMO FMCW radar and to enhance detection performance for low-RCS targets. In conventional DDM, transmit phase increments cause a single target's return to split into multiple peaks along the Doppler axis. If some peaks fall below the noise floor, transmit-channel decoding becomes ambiguous. The proposed method applies circular matched filtering to realign the dispersed energy onto a single Doppler index, resulting in concentrated energy and improved SNR. Because the folding step concentrates energy directly at a reference Doppler location, peak-combination searches and heuristic post-hoc corrections can be omitted. This simplifies the post-processing chain and substantially reduces overall computational cost. We further implement the method with FFT-based circular convolution using precomputed filter coefficients to enable real-time operation. Simulations show that the proposed method lowers the minimum SNR required for equivalent detection performance by approximately 3 dB. At SNR = 1.5 dB, the detection success rate improves from 57.7 % to 93.2 % (+ 35.5 percentage points). The results indicate a structural alternative that improves weak-target detection in low-SNR conditions while enhancing real-time feasibility. This proposed model has potential impact on high-resolution, high-reliability systems such as automotive 4D imaging radar.

Key words : Radar(레이다), MIMO(다중입력다중출력), DDM(도플러 분할 다중화), DDMA(도플러 분할 다중 안테나), Peak detection(피크 검출), Circular matched filtering(순환 정합 필터링), Weak target enhancement(미약 표적 향상)

1. 서론

Doppler Division Multiplexing(DDM) Multi-Input Multi-Output(MIMO)는 Frequency Modulated Continuous Waveform(FMCW) 레이다 시스템에서 각 송신 안테나에 서로 다른 위상 증분을 부여하여 동시 송신 간섭을 제거하고 도플러 공간의 확장을 통해 가상 어레이를 형성하는 기술이다. 이 MIMO 구조는 하드웨어 효율성과 가상 채널 수 증가 측면에서 분명한 장점을 가진다. 가장 일반적인 방식인 Uniform-phase DDM MIMO에서는 각 송신 채널에 특정 도플러 범위가 동등하게 할당되어 이를 기반으로 송신 채널별로 도플러 피크(peak)를 디코딩(Decoding; 구분)한다. 그러나 타깃의 시선 속도가 할당된 도플러 범위를

초과하는 경우, 서로 다른 송신 채널의 스펙트럼이 도플러 공간에서 겹치면서 모호성(Ambiguity)이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 송신 채널별 위상 증분을 정교하게 조정하여 서로 구분되도록 하는 다양한 방식이 제안되었다.¹⁻⁵⁾ Beamspace DDM^{1,2)}과 Empty Subband based DDM³⁾은 최소한 두 송신 채널의 도플러 공간 상 할당 크기가 서로 동일하지 않도록 설계되는 반면, DO-DDM,⁴⁾ Co-prime Coded DDM (CPC-DDM)⁵⁾은 모든 송신 채널 간 할당 크기가 서로 다르게 설정하는 특징이 있다. 특히 CPC-DDM은 각 송신 채널의 피크 간격을 서로소(Co-prime) 기반으로 설정함으로써, 모든 채널이 고유한 도플러 코드 위치를 갖도록 하여 도플러 Overlap이 발생

*Corresponding author, E-mail: h.ryu@hlcompany.com

¹⁾This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

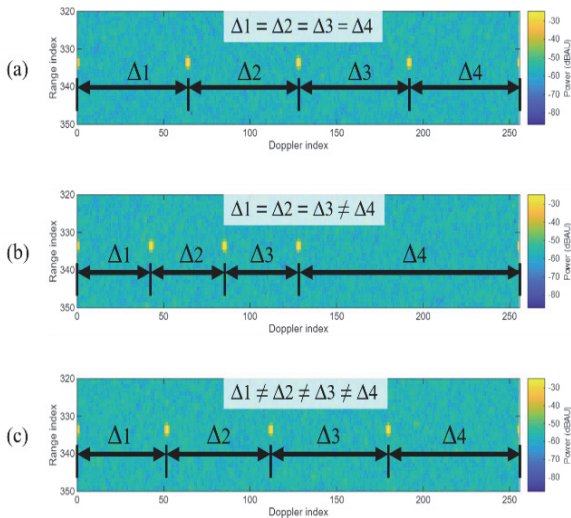


Fig. 1 Differences in multiple peak spacing of a single target in the Range-Doppler spectrum for the 4-TX DDM MIMO configurations: (a) Uniform-phase DDM MIMO, (b) Beam space DDM MIMO and Empty Sub-band-based DDM MIMO, (c) DO-DDM MIMO and Co-prime Coded DDM MIMO. Range-Doppler

하더라도 송신 채널 신호를 명확하게 분리할 수 있도록 한다.⁵⁾

전송된 DDM MIMO를 사용하는 시스템에서는, 하나의 타깃 반사파가 도플러 공간 상에 여러 개의 피크로 분산되어 등장하며, 이때 각 피크 간격은 각 송신 채널에 할당된 도플러 범위로 이해할 수 있다(Fig. 1 참조). 이렇게 피크가 여러 개로 나누어져 나타난다는 것은, 송신 채널 수 N 배 증가가 개별 피크의 Signal-to-Noise Ratio(SNR)의 N 배 증가로 이어지지는 않는다는 것을 의미한다.

따라서 저(低) RCS(Radar Cross Section) 타깃에 의해 형성되는 도플러 공간의 피크들 중 일부는 잡음에 의해 약화되어 검출되지 않을 수 있다. 전송된 모든 DDM MIMO 시스템에서는 위상 증분 격차를 도플러 공간 상 간격으로 해석하여 송신 채널 디코딩에 이용하는 것을 공통점으로 갖는다. 따라서 피크 중 일부가 미검출된 상황은 송신 채널 분리는 물론 타깃 감지 자체에도 악영향을 미친다.

본 연구에서는 분산된 도플러 에너지를 재조합하여 SNR을 향상시키고 송신 채널 모호성을 제거한 뒤 피크 검출을 수행할 수 있는 새로운 Folding 기법을 제안한다. 제안된 기법은 순환 정합 필터링(Circular matched filtering)을 기반으로 하며, 기존 방식으로는 검출이 어려운 약한 신호까지 탐지하고 동시에 송신 채널 디코딩을 수행할 수 있도록 설계되었다.

본 연구의 핵심 기여는 다음과 같다. 1) 저 SNR 환경에서의 검출 향상: 순환 정합 필터링을 통해 DDM으로 분산된 도플러 에너지를 단일 빈으로 재집중함으로써, 배경 추정 및 분산을 낮추고 미약 표적의 유효 SNR을 체계적으로 증대시킨다. 2) 피크 조합 탐색 생략에 따른 연산 복잡도 저감: 종래 DDM 기반 검출은 다중 피크의 조합/매칭 및 휴리스틱 보정(중복·누락 처리)에 의존하나, 제안 기법은 전처리 단계에서 신호를 정렬·집중시켜 후속 탐지·병합 단계의 경우의 수를 제거한다. 3) 실시간 향상: Folding은 FFT-원소별 곱-IFFT의 경량 경로로 구현되어, 임베디드 레이다에서 하드웨어 가속기(FFT/IP)와 병렬 구성 가능하며, 코어가 수행하는 비가속 연산을 $O(N)$ 수준으로 제한한다. 결과적으로 본 방법은 기존 DDM 방식 대비 동일 하드웨어·표준 처리(FFT/CFAR) 하에서 약한 표적에 대한 탐지 견고성과 처리 파이프라인 단순성을 동시에 제공한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 제안된 Folding 기반 도플러 집중 기법의 수학적 모델링 및 FFT 기반 구현 절차를 기술한다. 제3장에서는 시뮬레이션을 통해 저 SNR 조건에서의 검출 성능 개선 효과를 정량적으로 분석하고, 연산 복잡도와 실시간 처리 가능성을 평가하며, 기법의 한계점과 분석 방법상의 제약을 함께 논의한다. 마지막으로 제4장에서는 연구 결과를 요약하고, 본 기법의 구조적 이점 및 실제 시스템 적용 가능성과 함께 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 방법

제안되는 기법은 분산된 신호를 역방향 순환 시프트 방식을 통해 재정렬하는 것을 특징으로 한다. 이를 통해 도플러 공간에 흩어진 반사 에너지를 하나의 도플러 인덱스에 집중시킬 수 있다. 이 연산은 시프트에 따른 에일리어싱(Aliasing) 문제를 회피하기 위해 순환 구조의 특성을 활용하며, 주파수 영역에서 Fast Fourier Transform(FFT)을 이용하여 매우 효율적으로 구현된다. 결과적으로 신호 성분은 정렬·합산되고, 잡음 성분은 평균화되어 억제된다.

2.1 필터 시퀀스 정의 및 Folding 원리

도플러 공간에서 서로 다른 위치에 분산되어 나타나는 타깃 신호를 하나의 도플러 빈(Bin; 구간)으로 집중하기 위해서는 각 DDM 송신 신호 특성에 대응하는 필터 시퀀스 $h[n]$ 의 정의가 필요하다.

본 연구에서는 DDM 송신 구조에서 발생하는 도플러 피크의 위치를 기준으로, 해당 위치에서 1, 그 외에서는 0이 되도록 설정한 이진 형태의 필터 시퀀스를 사용하였

다. 이 필터 시퀀스는 DDM에 의해 분산된 에너지를 하나의 참조 위치로 정렬할 수 있는 특성을 가지며, Folding 처리의 핵심 역할을 수행한다.

도플러 공간 상에 분산된 타깃 신호를 집중시키기 위해, 우선 시간축에서의 순환 상관(Circular correlation)을 정의한다. Range-Doppler 응답 행렬(여기서 r 은 거리 인덱스, n 은 도플러 인덱스이며, 수신 채널별 비동상 적분(Non-Coherent Integration; NCI) 결과라고 가정함) $x[r, n]$ 과 필터 시퀀스 $h[n]$ 에 대해 Folding 처리 결과는 다음과 같이 표현된다.

$$Z[r, k] = x[r, n] \odot h^*[n] = \sum_{n=0}^{N_d-1} x[r, n] h^*[(n+k) \bmod N_d] \quad (1)$$

여기서 k 는 shift 인덱스로서, $0 \leq k < N_d$ 범위를 가진다. 순환 상관의 특성상 $Z[k] = Z[k + m N_d]$ (m 은 정수)이 성립하므로, 출력은 N_d 포인트의 주기를 갖는다. N_d 는 도플러 FFT의 포인트 개수이며 $*[\cdot]$ 는 켈레 복소수 연산을 나타낸다. 거리 인덱스 r 은 연산과 독립적이므로 앞으로는 표기를 생략하기로 한다.

본 순환 상관은 주파수 영역에서 식 (2)와 같이 변환할 수 있다:

$$Z[n] = \mathcal{F}_d^{-1} \{ \mathcal{F}_d \{ X[n] \} \cdot \mathcal{F}_d \{ h^*[n] \} \} \quad (2)$$

여기서 $\mathcal{F}_d \{ \cdot \}$ 과 $\mathcal{F}_d^{-1} \{ \cdot \}$ 는 도플러 축에 대한 이산 푸리에 변환과, 역 푸리에 변환을 각각 의미한다. 이 방법은 순환 상관을 FFT와 주파수 영역에서의 곱셈으로 계산하므로 연산 효율성이 높다. 이 연산으로 타깃 신호를 필터 시퀀스와 상관(Correlation)되면 에너지가 하나의 도플러 빈으로 다시 정렬된다.

이 접근법은 영상 복원에서 알려진 point spread function (PSF) 기반 디컨벌루션 원리와 유사하며, 본 연구에서는 이를 1차원인 도플러 공간에서 Folding 처리에 적용한 것이다.

2.2 실시간 연산 최적화

그러나 전술된 방식을 그대로 실시간 시스템에 적용하면 필터 시퀀스에 대한 켈레 연산과 FFT 계산이 매 처리마다 반복된다. 그러나 2.1에서 설명되었듯이 필터 시퀀스는 이진 형식으로 정의되기 때문에 켈레 연산은 생략해도 무방하다. 그리고 필터 시퀀스를 시간축에서 반전하고 켈레 처리한 정합 필터 계수를 사전에 정의하고, 그 푸리에 변환을 한 번만 계산해두기로 한다. 이를 식 (3)과 같이 정의한다.

$$G[k] = \mathcal{F}_d \{ h[(-n) \bmod N_d] \} \quad (3)$$

프로그래밍 언어에서는 배열 인덱스가 0 이상인 정수로 제한되며, 음수 인덱스를 지원하지 않으므로 시간 반전 시 다음과 같은 보정이 필요하다:

- 1) 이산 신호를 뒤집어 시간 반전을 수행한다.
- 2) 한 샘플을 우측으로 순환 이동하여 인덱스가 $(-n) \bmod N_d$ 에 해당하도록 맞춰 준다.

$$G[k] = \mathcal{F}_d \{ h[(-n) \bmod N_d] \} = \text{fft}(\text{circshift}(\text{flip}(h), 1))$$

예를 들어 MatLab에서의 문법으로 표현하자면 위와 같다. 이 과정을 반영하지 않으면 상관 결과가 한 샘플만큼 밀리거나, 위상이 맞지 않아 Folding 처리 결과에 오차가 발생할 수 있다. 이 과정을 통해 이론적인 순환 상관과 구현이 완벽히 일치하도록 보장하였다. 결과적으로, 실시간 연산에서는 식 (4)와 같이 단순화된 형태로 Folding 처리를 수행한다:

$$Z[r, n] = \mathcal{F}_d^{-1} [\mathcal{F}_d \{ X[r, n] \} \cdot G[k]] \quad (4)$$

즉, 실시간 처리 경로에서는 입력 신호의 FFT, 사전 계산된 필터 응답과의 원소곱, 그리고 Inverse Fast Fourier Transform(IFFT)만 수행하면 된다. 이를 통해 연산량이 크게 감소하면서도 결과는 순환 상관 기반 처리와 동일함을 보장한다.

3. 성능 평가

본 장에서는 제안된 Folding 처리 기법의 성능을 정량적으로 검증한다. 앞서 제2장에서 제시한 순환 정합 필터(Circular matched filtering) 기반 Folding 알고리즘이 실제로 도플러 공간 상의 분산된 타깃 신호를 하나의 빈으로 집중되어 SNR을 향상시키는지 확인하기 위해, MatLab 기반 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 Folding 처리 이후의 검출 성능 향상 여부를 단일 타깃 및 다중 타깃(3개) 두 가지 시나리오로 구분하여 분석하였다.

3.1 시뮬레이션 환경 및 구성

시뮬레이션에서는 각 8개의 송신·수신 채널을 갖는 DDM 기반 MIMO FMCW 레이다 환경을 가정하였다. 도플러 FFT 포인트 수는 $N_d = 1024$ 로 설정하였으며, 이는 0.1 m/s 가량의 속도 분해능 확보를 위한 수치이다. 각 송신 채널의 처프(Chirp) 별 위상 증분은 Tx1 부터 Tx8까지 $[0, 9, 20, 33, 48, 65, 84, 105]/128 \cdot 2\pi$ rad.로 두었다. 이것은 CPC-DDM⁴⁾의 방식을 차용한 것이다. 이에 따라,

타깃 반사 신호는 도플러 공간 상에 각 72, 88, 104, 120, 136, 152, 168, 184의 간격을 갖는 피크들로 나타나게 된다.

세 개의 타깃을 도플러 축 상 서로 다른 Bin(10, 40, 90 번 Bin)에 단일 산란원으로 가정하되 에고 모션은 무시하여 배치하였다. 이에 따라 각 타깃 신호는 총 24개의 피크로 나타나게 된다. 낮은 SNR 상황에서는 이 중 일부는 피크로 검출되지 않을 것으로 예상할 수 있다. 그러나 Folding 처리 후에는 각 타깃이 정의된 세 개의 기준 Bin(10, 40, 90번 Bin)으로 다시 각각 집중되어 유의한 피크로 검출될 것으로 기대할 수 있다.

잡음은 백색 가우시안 가산 잡음 모델을 따르게 하였으며, 단일 수신 채널 도플러 공간 상에서의 SNR은 0 dB에서 7 dB까지의 범위를 0.5 dB 간격으로 변화시켰다. 안정적인 피크 검출에는 통상 10 dB가 기준치로 사용되는데, 이보다 악조건에 해당하는 낮은 SNR 범위에서 검출 확률 곡선의 연속적 변화 특성 확보를 위해 설정한 것이다. 도플러 FFT에는 Rectangular 윈도우를 적용하였고, 수신 채널 간 결합은 Non-Coherent Integration(NCI)을 사용하였다.

Folding 처리 전후의 검출 성능 비교를 위해, CFAR (Constant False Alarm Rate) 기반 피크 검출기를 공통적으로 적용하였다. 보다 구체적으로는, Ordered-Statistic CFAR(OS-CFAR) 기법을 적용하였다. 훈련 셀(Training cells) 15개 중에서 11번째로 높은 값을 선택하여 배경 잡음을 추정하고, 이에 6 dB에 해당하는 스케일 계수를 곱하여 검출 임계값을 설정하였다.

검출 후보는 OS-CFAR을 통과한 값 중, 동일 도플러

라인 상에서 국지 최대값(Local maximum)인 경우에 한해 최종 피크로 판단하였다. 이를 통해 단일 강한 신호의 확산이나 잡음 스파이크로 인한 중복 검출 및 오검출을 효과적으로 억제하였다.

이러한 조건은 Folding 처리 전후의 성능 비교 시 공통으로 적용되어, 기법 자체의 정량적 효과를 공정하게 분석할 수 있도록 하였다. 이와 같은 설정으로 별도의 5,000,000 샘플의 복소 가우시안 잡음의 전력을 대상으로 검정을 수행한 결과, 오경보 확률 $P_{fa} = 0.0120$ 임을 확인하였다.

이상의 조건을 고정한 상태에서, SNR 조건별로 Monte-Carlo 반복 횟수는 1,000회씩 반복하여 통계적 신뢰성을 확보하였다. 이상의 시뮬레이션 환경을 요약하여 Table 1에 나타내었다.

3.2 결과

Folding 처리를 적용하기 전에는 다중 타깃으로 분산된 신호 중 일부가 잡음에 의해 왜곡되어 검출되지 못하거나, 반대로 일부 잡음이 피크로 잘못 검출되는 사례가 발생하였다. Fig. 2는 시뮬레이션 결과 중 SNR = 1.5 dB 조건에서 Folding 처리 전후의 피크 검출 결과를 비교한 것이다. 8개 수신 채널을 사용하는 MIMO 구조(NCI 효과)에 따라 실제 SNR은 1.5 dB보다 다소 향상되어 나타남에 유의해야 한다. 그림에서 서로 다른 세 개의 기준 타깃(Ground Truth, GT)은 색상이 다른 사각형 마커로 표시되었으며, 적색 원 마커는 검출 알고리즘에 의해 식별된 피크를 나타낸다. 이상적인 경우, 사각형 마커와 원 마커는 동일한 위치에 나타나야 한다. 그러나 Fig. 2(a)에서 보듯 일부 타깃은 검출되지 않았고, 잡음이 오검출된 사례도 확인된다. 반면 Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯 Folding 처리를 적용한 경우 각 타깃 신호가 고유한 도플러 빈(Bin)에 집중되어 혼동 없이 분리되었다.

1,000회의 Monte-Carlo 반복으로 얻어진 Confusion Matrix 분석 결과, Folding 처리 전후의 성능 차이가 수치적으로 확인되었다. 예를 들어 SNR = 1.5 dB 조건에서, 약한 타깃(최소 반사 단면 기준) 검출 성공률(True Positive Rate, TPR)은 처리 전 평균 57.69 %에서 처리 후 평균 93.17 %로 35.48 %p 향상되었다. 또한 위양성률(False Positive Rate, FPR)은 처리 전 0.35 %에서 처리 후 0.00 %으로 완전히 제거되었다. 또한 SNR = 2.5 dB 조건에서 Folding 처리 후의 TPR은 평균 99.80 %에 도달하여 매우 높은 검출 성공율을 기록하였다.

이러한 결과를 종합하면, Folding 처리 전후의 검출 성능이 유사하게 수렴하는 SNR을 5 ~ 6 dB 수준으로 볼 수 있으며, 이는 제안된 Folding 기법이 기존 방식에 비해 약

Table 1 Simulation parameters

Item	Value / Setting
Number of Tx, Rx channels	8, 8 channels
Doppler FFT points (N_d)	1024 points
Chirp duration	20.48 μ s
Chirp sweep bandwidth	150 MHz
PRI (Pulse Repetition Interval)	24.00 μ s
Doppler resolution	~ 0.1 m/s
Phase increment (Tx1-Tx8)	[0,9,20,33,48,65,84,105]/ 128 π rad
Window type (Doppler)	Rectangular
SNR definition point	Single Rx channel Doppler spectrum
CFAR (Training/Guard/Rank/Scale)	15 / 4 / 11 / 6 dB
Monte-Carlo iterations	1000 / per SNR
False alarm probability	0.0120

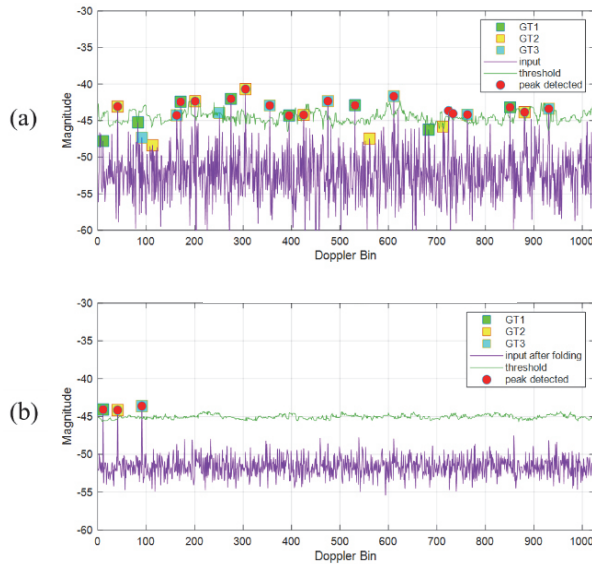


Fig. 2 Comparison of peak detection results for an 8-TX 8-RX DDM MIMO system with three targets having different velocities: (a) Input doppler spectrum and peak detection results before applying the proposed method, (b) Input doppler spectrum and peak detection results after applying the proposed folding method. Square markers represent the ground-truth positions of each target, while red circular markers indicate the peak positions identified by the detector

3 dB의 성능 이득을 제공함을 시사한다. 특히 저 SNR 환경에서 Folding 처리의 성능 향상 효과가 두드러지게 나타난다.

3.3 연산량의 정량적 분석

본 절에서는 제안된 Folding 처리 방법의 연산 복잡도를 정량적으로 분석한다. 제안 기법에서 한 프레임(단일 Range Bin 라인)에 대한 Folding 결과는 식 (5)와 같다.

$$Z[n] = \mathcal{F}_d^{-1} [\mathcal{F}_d \{ X[n] \} \cdot G[k]] \quad (5)$$

식 (1)에서 전술된 대로, FFT 결과의 길이는 N_d 이므로 N_d point FFT의 연산량을 고려한다. FFT 또는 IFFT의 연산 복잡도는 Cooley-Tukey 알고리즘 기준으로 약 $5 N_d \log N_d$ FLOPs 수준⁹⁾에 해당한다. 또한 복소수 곱셈의 경우 실수 곱셈 4회와 실수 덧셈 2회로 구성되므로, N_d 개에 대해 $6 N_d$ FLOPs 가 요구된다. $G[k]$ 는 불변이므로 반복계산되지 않는다. 따라서 제안 기법에서 프레임(단일 range bin 라인) 당 총 FLOPs는 식 (6)과 같이 근사할 수 있다.

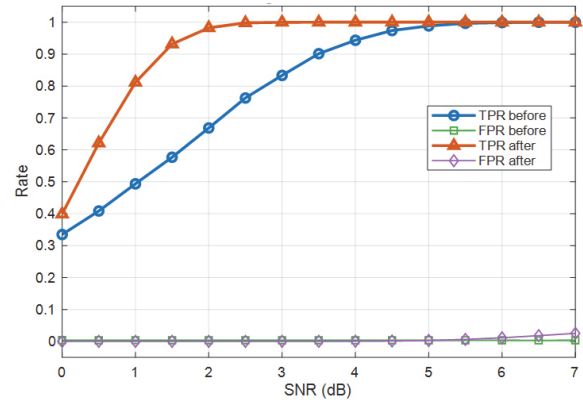


Fig. 3 Performance comparison before and after applying the folding process: True Positive Rate(TPR) and False Positive Rate(FPR) as functions of SNR. A significant improvement in TPR under low SNR conditions can be observed after applying the folding method

$$\underbrace{5N_d \log_2 N_d}_{\text{FFT}} + \underbrace{6N_d}_{\text{element-wise product}} + \underbrace{5N_d \log_2 N_d}_{\text{IFFT}} \approx 10N_d \log_2 N_d + 6N_d \quad (6)$$

빅오(Big-O) 표기법으로는 상수 계수를 생략하므로 $O(N_d \cdot \log N_d)$ 로 표기할 수 있고, 결국 이는 FFT의 연산 복잡도 수준과 동일하다.

한편, 현대 임베디드 레이다 SoC/DSP는 FFT와 같은 핵심 전처리 연산을 전용 하드웨어 가속기로 제공한다. 이들 연산은 스트리밍 버터플라이 구조와 예측 가능한 메모리 접근 패턴 덕분에 고정 지연·저전력으로 처리되며, 마이크로컨트롤러 코어와 병렬 실행도 가능하므로 실무에서 연산 병목으로 간주되지 않는다. 반면, 가속기 범위를 벗어난 비정형 연산과 메모리 관리, 파이프라인 스케줄링은 코어가 담당하므로, 비가속 구간의 복잡도를 낮추는 것이 시스템 실시간성 유지에 결정적이다. 이에 본 연구는 FFT/IFFT가 가속된다는 가정 하에, 코어가 담당하는 경로를 주파수 영역 원소별 복소 곱(및 경량 후처리)으로 축약하여 프레임 당 가시 복잡도를 $6N_d$ FLOPs로 제한되도록 하여 고정 지연을 확보한다. 이로써 전처리 단계에서의 제안 기법의 실시간 적용 가능성을 확인하였다.

3.4 한계점

제안된 기법은 송신 채널 간 위상 증분을 이용하여 도플러 공간 상에 분산된 신호 에너지를 정의된 기준 위치로 재집중함으로써, 약한 타겟 검출 성능을 향상시키는 데 효과적이다. 그러나 다음과 같은 제한 사항이 존재한다.

3.4.1 신호 중첩 현상에 따른 해석 혼동 가능성

Folding 처리 과정은 본질적으로 도플러 공간 상의 신호 성분을 주기적으로 접어 하나의 기준 축으로 집중하는 방식이므로, 입력 신호 자체에 주기성이 내포되어 있는 경우, 서로 다른 신호 성분이 동일한 도플러 빈(Bin)에서 의도치 않게 중첩되는 현상(Aliasing-like overlap)이 발생할 수 있다. 이러한 중첩은 결과 해석 과정에서 혼동을 야기할 수 있으며, 특히 주기적 구조를 갖는 타깃이나 간섭이 포함된 환경에서는 혼합 피크로 인한 검출 오류 가능성이 존재한다. 따라서 송신 채널별 위상 증분은 이러한 중첩을 방지할 수 있도록 신중히 설계되어야 하며, 3.1에서 언급한 바와 같이 위상 증분 격차가 서로소 관계가 되도록 설정하는 것이 바람직하다.

3.4.2 위상 정확도 및 동기화 민감성

본 기법은 송신 채널별 위상 증분 및 신호의 시간적 정렬(Synchronization)에 민감하게 작용한다. 실제 레이더 시스템에서는 RF 소자의 송수신부의 위상 드리프트나 동기화 불일치가 발생할 수 있으며, 이로 인해 Folding 처리의 집중도가 저하되거나 오류를 유발할 가능성이 있다.

3.4.3 극저 SNR 환경에서의 성능 제한

Folding 처리를 통해 도플러 에너지의 국지 집중이 가능하더라도, 입력 신호의 SNR 자체가 매우 낮은 경우(예: -10 dB 이하)에는 타깃 에너지가 여전히 잡음에 묻혀 검출되지 못할 수 있다. 따라서 제안 기법은 일정 수준 이상의 SNR 확보를 전제로 한다. 그럼에도 불구하고, 기존 방법보다는 항상 강건할 것으로 예상된다.

3.4.4 성능 분석의 검출기 종속성

본 논문에서의 정량적 검증은 OS-CFAR 기반의 피크 검출기와 국지 최대값 조건을 결합한 탐지 절차를 기준으로 수행되었다. 이와 같은 설정은 실용적인 조건을 반영하기 위해 설계되었으나, 궁극적으로는 선택된 검출기의 특성에 분석 결과가 영향을 받을 수 있음을 의미한다. 예를 들어, 다른 종류의 CFAR(예: CA-CFAR, GO-CFAR) 또는 딥러닝 기반 검출기가 사용될 경우, 검출 민감도와 오검출률의 추정이 달라질 수 있으며, 이는 Folding 처리의 성능 평가에 간접적인 영향을 줄 수 있다.

따라서 본 연구의 정량적 결과는 설정된 실험 조건과 검출기 기준 내에서 유효함을 전제로 해석되어야 하며, 다양한 탐지 기법과의 교차 검증은 향후 연구 과제로 남겨둘 수 있다.

이상의 한계점에도 불구하고, 제안한 Folding 기반 기

법은 실시간성, 구조적 단순성, 그리고 저 SNR 조건에서의 강건성 측면에서 충분한 실용적 가치를 갖는다.

4. 결론

본 논문에서는 다중 송신 채널을 갖는 DDM 기반 MIMO FMCW 레이더 환경에서, 타깃 반사 신호가 도플러 공간 상에 분산되어 나타나는 구조적 한계를 극복하기 위해 Folding 기반 도플러 집중 기법을 제안하였다. 이 방식의 목적은 송신 채널 간 위상 증분에 따라 발생하는 주기적인 도플러 분산 특성을 활용하여, 각 타깃의 신호 에너지를 정의된 기준 도플러 위치로 직접적으로 집중함으로써 약한 타깃의 검출 가능성을 향상하는 것이다.

특히, 제안된 방식은 기존의 다중 피크 조합 기반 검출 절차에서 요구되던 복잡한 후보 조합 탐색과 휴리스틱 조건 설정(예: 오검출/누락 보정 등)을 사전에 제거할 수 있다. 이는 단순히 검출률을 개선하는 것에 그치지 않고, 후속 처리의 전체적인 연산량을 획기적으로 줄이는 구조적 이점을 제공한다. 기존 방식^{6,8)}에서는 각 수신 채널 별로 검출된 피크들을 병합하거나, 누락/중복을 고려하여 다양한 경우의 수를 탐색하는 후처리 알고리즘이 필수적이었다. 그러나 제안 기법은 전처리 단계에서 도플러 공간 상의 신호를 사전에 정렬된 구조로 집중함으로써, 해석 가능하고 신뢰성 높은 결과를 간결한 처리 흐름으로 달성하고, 후속 연산량이 감소될 수 있다.

실험 결과, SNR이 1.5 dB와 같이 낮은 조건에서도 검출 성공률이 기존 대비 약 35 %p 향상되었고, 오검출률(FPR)은 동일 수준 이하로 유지되었다. 또한 연산 복잡도 분석 결과, 전체 연산량은 $O(N_d \cdot \log N_d)$ 수준으로 기존 FFT 기반 전처리 연산과 유사하였으며, 주요 연산은 하드웨어 가속기(DSP 또는 전용 IP)에 의해 실시간으로 처리될 수 있는 수준임을 확인하였다.

다만, 제안 기법은 Folding 처리에 따른 신호 중첩 가능성, 위상 정렬 민감도, 극저 SNR 조건에서의 검출 한계 등의 제한점을 가진다. 또한 성능 평가는 OS-CFAR 기반의 탐지 구조에 국한되어 있어, 다양한 검출 기법 적용 시 결과의 일반화에는 제한이 있을 수 있다.

종합하면, 본 논문에서 제안한 Folding 기반 기법은 도플러 공간에서의 에너지 집중을 통해 약한 타깃의 검출 성능을 효과적으로 향상시키며, 동시에 기존 방식의 탐지-후처리 흐름을 단순화함으로써 시스템 전반의 계산 복잡도를 실질적으로 감소시키는 구조적 이점을 제공한다. 향후 연구에서는 실제 장비 환경에서의 측정을 통한 부가적인 오차항 분석, 거리 및 방위 축 간섭 처리, 위상 동기화 오차 보정, 다양한 탐지 기법과의 결합을 통한 일반화 가능성 확대 등의 과제가 남아 있다.

Acknowledgment

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00443542).

References

- 1) F. Xu, S. A. Vorobyov and F. Yang, "Transmit Beamspace DDMA Based Automotive MIMO Radar," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.71, No.2, pp.1669–1684, 2022.
- 2) N. Touati, C. Sturm, M. Imran, A. Vanaev, M. Kohler, K. Krupinski, W. Malik and U. Lübbert, "High Angle Resolution Automotive Radar Based on Simultaneous 12Tx Doppler-Multiplex MIMO," 2020 17th European Radar Conference (EuRAD), Utrecht, Netherlands, pp.386–389, 2021.
- 3) J. Gupta, "Design Guide: High-End Corner Radar Reference Design," Texas Instruments, Design and Documentation Support, 2021.
- 4) Y. Sun, M. Bauduin and A. Bourdoux, "Enhancing Unambiguous Velocity in Doppler-Division Multiplexing MIMO Radar," *Proceedings of the 2021 18th European Radar Conference (EuRAD)*, London, United Kingdom, pp.493–496, 2022.
- 5) NXP USA Inc., "Co-prime Coded (CPC) Doppler Division Multiplexing (DDM) MIMO Radar Method and System," U.S. Patent No.11,614,531 B2, 2023.
- 6) J. -H. Park, Y. -J. Yoon, J. Jung and S. -C. Kim, "Novel Multiplexing Scheme for Resolving the Velocity Ambiguity Problem in MIMO FMCW Radar Using MPSK Code," *IEEE Access*, Vol.10, pp.75234–75244, 2022.
- 7) H. Park, C. -B. Ko, J. -H. Park, C. Park, R. Park, H. -S. Lim, J. -E. Lee and S. Lee, "Solving Doppler Ambiguity Using Folded Array in Uniform Phase DDM Method," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.74, pp.1–13, 2025.
- 8) M. Jeannin, O. Lang, F. B. Khalid, D. Nugraha, S. Achatz, A. Eryildirim, M. Huemer and A. Roger, "Modeling and Removing Doppler Division Multiplexing Spurs in Automotive MIMO Radar," *IEEE Sensors Journal*, Vol.23, No.2, pp.1389–1396, 2023.
- 9) J. W. Cooley and J. W. Tukey, "An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series," *Mathematics of Computation*, Vol.19, No.90, pp.297–301, 1965.
- 10) S. G. Johnson and M. Frigo, "A Modified Split-Radix FFT with Fewer Arithmetic Operations," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol.55, No.1, pp.111–119, 2007.