

우주 감시 레이더의 단일 펄스 기반 LFM 파형 거리-도플러 결합 보상 방법

박성영*¹, 임상호*², 양은정*³, 신혁수*⁴, 정태희*⁵, 조병래*⁶

Single-Pulse LFM Signal Range-Doppler Coupling Compensation for Space Surveillance Radar

SungYeong Park*¹, Sangho Lim*², Eunjung Yang*³, Hyuksoo Shin*⁴, Taehee Jeong*⁵, and
Byunglae Cho*⁶

이 연구는 2025년 정부의 재원으로 수행된 연구 결과임 (23-CM-RS-12)

요 약

본 논문은 LFM(Linear Frequency Modulation) 기반 우주감시 레이더에서 도플러 효과로 인해 정합필터 출력에 발생하는 속도 의존적 거리 편향(거리-도플러 결합)을 단일 펄스에서 효율적으로 보상하는 방법을 제안한다. 핵심 아이디어는 (1) 빔 조향각으로부터 표적의 시선 속도 범위를 물리적으로 제약해 가능한 도플러 상한을 설정하고, 이를 반영해 확장 참조 필터 대역을 최소화하여 1차 속도 추정의 SNR 손실을 줄인 뒤, (2) 해당 1차 추정치를 중심으로 좁은 구간만 국소 정합필터 뱅크를 구성해 2차 미세 추정을 수행하는 2단계 (Coarse-to-fine) 구조에 있다. 제안 기법은 단일 펄스에서 기존 방법 대비 정확도 - 연산량의 균형을 달성하도록 설계되었으며, 다양한 SNR/관측각 조건의 시뮬레이션을 통해 유효성이 확인되었다.

Abstract

This paper proposes a method to efficiently compensate for velocity-dependent range bias (range-Doppler coupling) that occurs in the matched filter output of an Linear Frequency Modulation (LFM)-based space surveillance radar due to Doppler effects, using a single pulse. The core idea is twofold: (1) to physically constrain the LOS velocity range of the target from the beam steering angle, and then minimize the bandwidth of the extended reference filter to reduce the SNR loss in the first-stage velocity estimation; and (2) to construct a local matched filter bank only within a narrow search interval centered at this first estimate and perform fine velocity estimation in a two-stage (coarse-to-fine) framework. The proposed method is designed to achieve a balance between accuracy and computational complexity in single-pulse processing, compared with a conventional single matched filter, extended filter alone, and exhaustive matched filter bank.

Keywords

space surveillance radar, linear FM, range-doppler coupling, extended matched filter, matched filter bank

* 국방과학연구소 제3기술연구원 4부(*¹ 교신저자)
- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0003-1510-2475>
- ORCID²: <https://orcid.org/0000-0001-8250-3784>
- ORCID³: <https://orcid.org/0000-0003-4724-5542>
- ORCID⁴: <https://orcid.org/0009-0001-7105-0510>
- ORCID⁵: <https://orcid.org/0000-0002-6427-8410>
- ORCID⁶: <https://orcid.org/0000-0002-9160-3362>

• Received: Sep. 11, 2025, Revised: Oct. 09, 2025, Accepted: Oct. 12, 2025
• Corresponding Author: SungYeong Park
Agency for Defense Development, Yuseong P.O. Box 35, Daejeon, 34186,
Republic of Korea
Tel.: +82-42-821-4387, Email: psy@add.re.kr

1. 서 론

우주감시레이더(SSR, Space Surveillance Radar)는 저궤도 위성 및 우주 잔해물을 탐지 추적하여 충돌 회피와 궤도 유지, 우주 교통 관리에 핵심적인 역할을 수행한다. 최근 궤도 내 물체 수가 급격히 증가하면서, SSR에는 단일 펄스 수준에서도 높은 거리 및 속도 추정 정확도가 요구되고 있다. 특히, 저궤도 표적의 시선 속도가 수 km/s 에 달하는 경우, 거리 추정의 작은 편차도 궤도 결정의 지연이나 추적 필터의 불안정성으로 이어질 수 있다.

LFM(Linear Frequency Modulation) 신호는 높은 거리 해상도를 제공하기 때문에 SSR에 널리 사용되지만, 고속 표적에 적용할 경우 도플러 효과로 인해 정합 필터 출력이 왜곡되어 거리 편향이 발생한다[1,2]. 이러한 거리-도플러 결합(Range-Doppler coupling) 문제는 단일 펄스에서도 수 십 미터에서 수 킬로미터까지의 오차를 유발할 수 있어 SSR 운용에 치명적이다[3].

기존 연구에서는 정합필터 뱅크, V-LFM, 확장 필터, 그리고 시간-주파수 변환 기반 방법 등 다양한 보상 기법이 제안되었다. 그러나 이들은 각각 높은 연산량, 신호 대 잡음비(SNR, Signal-to-Noise Ratio) 손실, 또는 실시간 적용의 어려움이라는 한계를 가진다. 따라서 효율적인 연산량으로 단일펄스에서 정확하게 거리 편향을 보정할 수 있는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, 확장 필터와 국소 정합 필터 뱅크를 결합한 2단계(Coarse-to-fine) 보상 구조를 제안한다. 제안 기법의 특징은 다음과 같다. 첫째, 빔 조향각 정보를 활용하여 표적의 속도 범위를 사전에 제한함으로써 확장 필터의 대역폭을 최소화하고 SNR 손실을 줄인다. 둘째, 확장 필터를 통해 얻은 초기 도플러 추정을 중심으로 국소 정합 필터 뱅크를 구성하여 미세 추정을 수행하고, 보간 기법을 적용해 추정 정밀도를 향상시킨다. 마지막으로, 최종 도플러 추정치를 이용하여 거리-도플러 결합의 편향을 보정한다.

본 연구의 기여는 다음과 같이 요약된다. 첫째, 각도 기반 도플러 범위 제한을 통해 불필요한 탐색 구간을 줄여 연산 효율성 및 확장 필터의 SNR을 확

보하였다. 둘째, 확장 필터-국소 정합필터 뱅크의 2단계 구조를 도입하여 단일 펄스 환경에서도 정확도와 연산량의 균형을 달성하였다. 셋째, 다양한 SNR 및 관측각 조건에 대한 시뮬레이션을 통해 기존 방법 대비 제안 기법의 성능 우수성을 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 LFM 파형의 거리-도플러 결합 문제 및 이를 해결하기 위한 기존 방법들에 대해 기술한다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 거리 편향 보상 기법을 각도 기반 속도 범위 설정, 확장 필터 기반 1차 속도 추정 및 국소 정합 필터 뱅크 기반의 2차 속도 추정 순으로 자세히 기술한다. 4장에서는 시뮬레이션에 기반하여 제안 방법의 처리 결과 및 기존 방법과의 거리 정확도 및 처리 속도에 대한 실험 결과를 기술한다. 마지막으로 5장에서는 결론에 대해 기술한다.

II. 이론적 배경

2.1 거리-도플러 결합

거리-도플러 결합(Range-Doppler coupling)은 선형 주파수 변조(LFM) 레이더에서 송신된 신호가 고속으로 이동하는 표적에 의해 반사될 때, 표적의 도플러 주파수가 정합 필터 응답의 시간 지연(거리 추정)을 함께 왜곡시키는 현상이다. 식 (1)은 LFM 송신 신호가 $s(t) = \exp(j\pi kt^2)$, FM 기울기 $k = B/\tau$ 일 때, 도플러 주파수 f_D 에 의한 정합 필터 출력의 피크 이동을 나타낸다[2]. 이때, B, τ 는 각각 LFM 신호의 대역폭 및 펄스폭을, c 는 빛의 속도를 의미한다.

$$\Delta R = \frac{c}{2} \Delta t = \frac{cf_D}{2k} \quad (1)$$

우주 감시 레이더 등 표적 속도가 매우 높고 펄스 폭이 긴 응용에서는 거리-도플러 결합으로 인한 영향성이 매우 크기 때문에, 거리 오차가 수십 미터에서 수백 킬로미터에 이르는 심각한 편향을 유발한다. 이로 인해 궤적 추적의 수렴 속도가 늦어지거나 오폭적(Ghost target)이 생성되고, 추적 필터가 발산하기도 한다. 따라서, 고속 표적 레이더 시스템에서는 거리-도플러 결합에 의한 편차를 보정하기 위

한 파형 설계나 신호처리 기법이 요구된다. 결합 오차에 대한 알려진 보상 방법으로는 정합 필터 뱅크 사용[2][4], V-LFM 기반 방법[2], Extended filter 기법[5][6] 등이 있다. 다중 펄스에 기반하여 도플러 처리로 속도를 추정하여 편향을 보상하는 방법이나, 여러 번의 거리/각도 측정에 기반한 추적 필터 기반의 보상 방법도 가능하지만, SSR의 짧은 dwell, 낮은 재방문율, 짧은 체류 시간 및 필요 획득 시간 등을 고려할 때 적합하지 않을 수 있다. 이에 본 논문은 단일 펄스에 대한 보상 문제를 다룬다.

정합 필터 뱅크 기법은 도플러 주파수 f_D 의 가능한 여러 값을 사전에 가정하여, 정합 필터에 각각 다른 도플러 이동 위상($\exp(j2\pi f_D t)$) 성분을 반영한 후 정합 필터링을 수행하는 방법이다. 수신 신호는 실제 표적의 도플러 주파수에 대응하는 하나의 필터에서 가장 높은 필터 응답 피크를 갖기 때문에, 정합 필터 결과 중 가장 전력이 높은 뱅크의 거리를 선택함으로써 거리 편향을 제거할 수 있다. 이 방식은 가장 직관적인 구현 방식이지만, 보정하고자 하는 도플러 범위가 넓을수록 필터 수가 기하급수적으로 증가하여 연산량이 크게 늘어난다.

V-LFM(or Triangular FM)은 up-chirp과 down-chirp을 교대로 사용하는 방식이다. up-chirp 구간에서와 down-chirp 구간에서는 도플러에 의한 거리 편향이 서로 정 반대로 발생하기 때문에, 두 구간의 거리 값을 결합하면 편향을 제거할 수 있다. 그러나, 동일한 펄스 폭을 가정할 때 정합 필터 결과 up-chirp과 down-chirp의 첨두치가 각각 나타나기 때문에, 표적 탐지 시의 신호 대 잡음비(SNR)가 감소한다는 문제점이 있다.

확장 필터(Extended filter)는 정합 필터의 주파수 스윙 범위를 도플러 최대 이동량만큼 확장하여 보정하는 방법이다. 즉, 레이다가 대상으로 하는 표적이 가질 수 있는 최대 도플러 오프셋 $f_{D,max}$ 을 고려하여 원래 LFM 펄스 대역폭 B 보다 넓은 대역폭 $B + f_{D,max}$ 를 가진 참조 필터를 사용하여 표적을 탐지한다. 이후, 스펙트럼 영역에서의 진폭 상관[5]이나 running sum[6]으로 도플러 주파수를 예측한다. 이러한 방법은 정합 필터 뱅크에 비해 연산이 효율적이긴 하지만, 수신 신호와 완전히 일치하는 정합

필터를 사용한 것이 아니기 때문에, 필터의 확장 비율 $p = (f_{D,max} + B)/B$ 에 따라 약 $10\log_{10}(1+2p)$ 의 SNR 손실이 발생한다. 한편, FrFT(Fractional Fourier Transform)나 LVD(LV's Distribution) 등과 같은 시간-주파수 변환 기반의 LFM 파라미터 추정 기법도 제안되어 왔으나[7]-[9], 구현 방식에 따라 다차원 탐색/다중 펄스 기반 등으로 연산 비용이 큰 편이며, 파라미터(예: LFM 기울기) 민감도가 큰 편이다.

III. 제안 LFM 거리 편향 보상 기법

본 논문은 그림 1과 같이 단일 펄스 기반 LFM 신호를 기반으로 2단계에 걸쳐 거리 편향을 보상하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 빔 조향각을 기반으로 우주 물체 표적의 속도 범위를 제한하는 단계, 제한된 속도 범위를 기반으로 확장 필터를 구성하여 1차 속도를 추정하는 단계, 국소 정합 필터 뱅크 기반 2차 속도 추정 단계로 구성된다. 각 단계별 세부 내용은 아래와 같다.

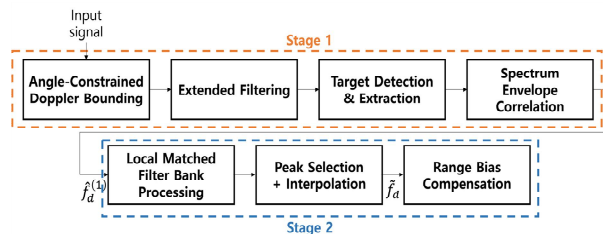


그림 1. 제안 방법의 블록 다이어그램
Fig. 1. Block diagram of proposed method

3.1 각도 기반 속도 범위 설정

우주 물체는 지구 중심을 기준으로 최대 약 7-8 km/s 수준의 고속 궤도 운동을 하고 있으며, 레이다 관측시 표적의 선속도(line-of-sight, LOS velocity)는 표적의 운동 벡터와 관측 지점의 시선 방향 간의 기하학적 관계에 의해 결정된다. 일반적으로 표적의 기하학적 속도 크기는 이미 알려진 천체역학적 범위(예: LEO에서 약 7.5 km/s 전후)에 존재하므로, 빔 조향각(azimuth, elevation)에 따라 예상 가능한 LOS 속도 범위를 사전에 제한할 수 있다. 식 (2)는

그림 2에서 나타난 시선 각도 ψ_r , 레이더의 관측 각도 ψ_a , 관측 거리 R , 지구 반경 R_e 로 도출한 수식이다.

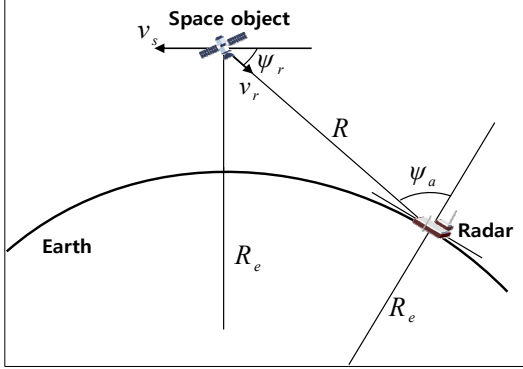


그림 2. 우주 감시 레이더 및 우주 물체 기하
Fig. 2. Space surveillance radar geometry

$$\psi_r = \text{asin} \left(\frac{R + R_e \cos \psi_a}{\sqrt{R^2 + R_e^2 + 2RR_e \cos \psi_a}} \right) \quad (2)$$

탐색 시점에서 확장 필터를 적용할 경우 레이더는 표적의 거리를 알 수 없다. 식 (2)에서, $\pi/2 - \psi_a \leq \psi_r < \pi/2$ 임을 적용하면, 아래의 식 (3) 과 같이 표적의 시선 속도를 제한할 수 있다.

$$|v_{LOS}| \leq v_{s,max} \cos \psi_r \leq v_{s,max} \sin \psi_a \quad (3)$$

이때, $v_{s,max}$ 는 우주 물체의 최대 속력을 나타내며, 우주 물체의 경우 약 8,000m/s 로 설정할 수 있다. 이에 따라, 식 (4)는 우주 물체의 최대 속도에 기반한 표적 도플러 속도 제한을 나타낸다.

$$|f_D| \leq f_{D,max} = \frac{2}{\lambda} v_{s,max} \sin \psi_a \quad (4)$$

3.2 확장 필터 기반 1차 속도 추정

본 단계에서는 우주 물체의 단일 펄스 반사 신호로부터 초기 속도를 추정하기 위해 확장 필터 (Extended Filter) 기반 방법을 적용한다. 확장 필터는 Yeh 등[5]에서 제안된 기법으로, 도플러 주파수 불일치로 인한 정합 필터 출력의 침두치 저하와 거

리 편향을 보상하기 위해 정합 필터링 시 참조 필터의 대역폭을 원래 송신 신호보다 확장하여 설계하는 방식이다[5]. 본 연구에서는 Yeh의 알고리즘을 활용하되, 3.1절에서 제시한 우주 물체의 각도 기반 속도 범위 제한을 반영하여 확장 필터의 도플러 범위를 설정한다. 즉, 표적의 선속도 범위를 우주 물체의 기하 특성에 따라 제약한 뒤 이를 식 (4)의 형태로 도플러 상한으로 변환하고, 해당 범위를 포함하도록 확장 기준 필터 $G_R(f)$ 를 식 (5), (6)과 같이 구성한다.

$$B_R = B + 2|f_{d,max}| \quad (5)$$

$$G_R(f) \approx \text{rect} \left(\frac{f}{B_R} \right) \exp \left(-j\pi \frac{f^2}{\gamma} \right) \quad (6)$$

레이더는 이러한 확장 필터 기반 정합 필터링 후, [5]의 방식과 같이 표적 탐지 처리 및 주파수 영역의 진폭 상관(Envelope correlation)을 통해 1차 도플러 추정치 $\hat{f}_d^{(1)}$ 을 얻는다. 이렇게 획득한 1차 도플러 주파수 추정치는 이후 3.3절에서 수행되는 국소 정합 필터 बैं크의 중심값으로 사용되어, 최종 거리-속도 보정 과정의 초기화 정확도를 높이고 연산량을 줄이는 역할을 수행한다.

3.3 국소 정합 필터 बैं크 기반 2차 속도 추정

확장 필터에 기반한 1차 추정으로 얻어진 도플러 주파수 추정치 $\hat{f}_d^{(1)}$ 은 표적의 실제 도플러 주파수와 근접하지만, 여전히 추정 오차가 존재할 수 있다. 따라서 본 단계에서는 이를 중심으로 국소 정합 필터 बैं크(Local matched filter bank)를 구성하여 2차 속도 추정을 수행한다. 정합 필터 बैं크의 도플러 주파수 보상 범위는 시스템 파라미터 혹은 탐지 단계에서 파악한 수신 신호의 SNR 등에 따라 다르게 정의될 수 있다. 본 논문에서는 주파수의 탐색 폭을 f_w 로 가정한다. 이 경우 주파수 탐색 범위는 $[\hat{f}_d^{(1)} - f_w/2, \hat{f}_d^{(1)} + f_w/2]$ 이다.

다음으로 정합 필터의 주파수 간격을 정의한다.

도플러 보상 값을 Δf 만큼 바꾸면 LFM의 등가 이동 시간은 식 (1)에 의해 $\Delta\tau = \Delta f/k$ 이다. 이를 샘플 간격 $T_s = 1/f_s$ 로 정규화하면 $\epsilon = \Delta\tau/T_s = (\Delta f/k)f_s$ 가 된다. ϵ 이 1샘플 증가할 때마다, 출력 전력은 거리 straddling에 의해 한 주기의 변조를 보인다. 따라서, 피크가 정확히 1샘플 이동하는데 필요한 도플러 변화량 f_{step} 은 식 (7)에 의해 결정된다.

$$t_{step} = \frac{f_{step}}{k} = \frac{1}{f_s} \quad (7)$$

보상 주파수 vs 출력 전력 곡선은 f_{step} 주기로 사인파에 가깝게 반복된다. 이 주기성을 이용해, 제안 방법에서는 격자 간격 Δf 를 두 가지 방식 중 하나로 정한다. 식 (8)은 격자 간격을 정하는 두 가지 방법을 나타낸다.

$$\Delta f < \frac{f_{step}}{2} \text{ or } \Delta f = Nf_{step}, \quad (8)$$

전자는 straddling에 의한 주기적 전력 변조를 복원할 수 있도록 촘촘히 샘플링해 보간으로 최대치를 찾는 방법이며, 후자는 시간 간격 $\Delta\tau$ 를 N/f_s 로 설정함으로써 항상 샘플 시점에 같은 위상을 샘플링하도록 하여 straddling에 의한 전력 변동의 영향성을 없애고, 순수한 매칭 효과만으로 최대값을 선택하도록 하는 방법이다. 주파수 보상값 샘플링 주기 Δf 는 연산량과 속도 정확도의 trade-off에 의해 결정될 수 있으므로 시스템에 맞게 정해져야 한다.

레이더는 위와 같은 수식에 따라 결정된 주파수 간격에 따라 국소 필터 बैं크를 구성한다. 식 (9), (10)은 각각 필터의 한쪽 방향 개수 및 i 번째 필터 बैं크의 주파수 보상값 f_i 을 나타낸다. 이때, 필터 बैं크의 총 개수는 $(2N_f + 1)$ 개이다.

$$N_f = \left\lceil \frac{f_w}{2\Delta f} \right\rceil \quad (9)$$

$$f_i = \hat{f}_d^{(1)} + i\Delta f, \quad i \in \{-N_f, \dots, 0, \dots, N_f\} \quad (10)$$

i 번째 정합 필터의 시간 영역 신호 $s_{ref,i}(t)$ 는 식 (11)과 같다.

$$s_{ref,i}(t) = \exp(j\pi\gamma t^2)\exp(j2\pi f_i t) \quad (11)$$

레이더는 식 (12)와 같이 수신 신호 $x(t)$ 와 정합 필터 बैं크의 신호를 정합 필터링한 신호 $y_i(t)$ 를 얻는다. 이때 $X(f)$ 와 $S_{ref,i}(f)$ 는 각각 $x(t)$ 및 $s_{ref,i}(t)$ 의 주파수 영역 변환 신호이며, F^{-1} 은 IFFT 연산을 의미한다. 이후, i 번째 정합 필터링 결과에서 첨두치 P_i 를 식 (13)에 의해 계산하며, 정합 필터링 첨두치 P_i 를 최대화하는 인덱스 i^* 에 해당하는 도플러 값을 표적의 도플러로 추정한다.

$$y_i(t) = F^{-1}\{X(f)S_{ref,i}^*(f)\} \quad (12)$$

$$P_i = \max |y_i(t)|^2 \quad (13)$$

추정 시에는 보간 기법 등을 이용하여 샘플 이하 단위로 표적 도플러 주파수 \tilde{f}_d 를 추정할 수 있다. 레이더는 \tilde{f}_d 로 거리-도플러 결합 보정을 수행한다. 식 (14)는 보정을 수행하여 표적의 초기 거리 R_0 로부터 최종 거리 R' 을 계산하는 과정을 나타낸다.

$$R' = R_0 - \frac{c\tilde{f}_D}{2k} \quad (14)$$

본 연구의 제안 구조에서 1차 확장 필터 추정과 2차 국소 정합 필터 बैं크는 상호보완적인 역할을 수행한다. 확장필터는 넓은 도플러 영역에서도 안정적인 초기 추정을 제공하여 탐색 공간을 효과적으로 축소하며, 이후 국소 정합 필터 बैं크는 전수 조사 방식에 비해 현저히 적은 필터 개수인 $(2N_f + 1)$ 개의 필터를 탐색하므로, 제안 기법은 단일 펄스 기반 거리-속도 추정에서 연산량 절감과 추정 정확도의 균형을 동시에 달성할 수 있다.

실제 우주 감시 환경에서는 복수 표적, 가속도, 클러터 및 간섭과 같은 복잡한 요인이 존재할 수 있다. 본 논문에서 제안된 보상 모델은 단일 펄스

기반에서 정의되는 거리-도플러 결합 관계에 기반하여 이를 수학적으로 정립한 것으로, 표적의 수나 외부 환경 조건이 달라지더라도 그 기본 원리는 변하지 않는다. 따라서 본 연구에서 제시한 보상 절차는 실제 운용 환경에서도 충분히 유효하게 적용될 수 있는 기반을 제공한다.

IV. 실험 결과

본 장에서는 시뮬레이션에 기반한 실험 결과를 기술한다. 4.1절에서는 표적 신호를 모의하고 제안 방법의 신호 처리 단계별 결과를 기술한다. 4.2절에서는 제안 방법 및 기존 방법들의 성능 비교를 위해 거리 추정 오차, SNR 개선 및 연산 시간을 비교한 결과를 기술한다. 실험을 위해 S대역 우주 감시 레이더를 가정하였으며, 표 1과 같이 예시 파형 파라미터를 설정하였다.

표 1. 파형 및 시스템 파라미터
Table 1. Waveform/system parameter for experiment

| Type | Symbol | Value |
|--------------------|----------|-----------|
| Center frequency | f_c | 3.0 GHz |
| Pulse width | T_p | 2 ms |
| Pulse bandwidth | B | 1 MHz |
| Chirp rate | γ | 0.1 GHz/s |
| Sampling frequency | f_s | 2 MHz |

4.1 제안 방법 시뮬레이션 결과

본 절에서는 제안한 알고리즘의 단계별 동작 결과를 확인하기 위해 단일 표적 환경에서 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1의 파형 파라미터를 사용하여 수신 신호를 생성하고, 점표적 반사 신호에 속도 -3,000m/s에 해당하는 도플러 주파수를 부여하였다. 입력 신호는 AWGN(Additive White Gaussian Noise)을 포함하도록 설정하였으며, 본 절에서는 신호 대 잡음비(SNR)가 충분히 큰 조건을 기준으로 한다.

그림 3은 빔 조향각별 확장 필터의 스펙트럼을 나타낸다. $\psi_a = 90^\circ$ 인 경우가 기존 방법과 같이 최대 폭으로 확장 필터를 여는 방법에 해당한다. 우주 물체의 최

대 속도를 8,000 m/s로 가정하면, 최대 속도를 고려하여 확장 필터를 사용하는 경우, 표적의 최대 도플러 주파수는 약 160kHz이므로, 1.32MHz를 덮는 확장 필터를 사용해야 한다. 반면 제안한 방법에서는 빔 조향각이 $10^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 인 경우에 필터 별 확장 비율 p 는 각각 0.0278, 0.0801, 0.1387에 해당한다. 이와 같이 확장 필터를 표적의 속도 범위에 맞게 사용함으로써 제안 방법은 SNR 손실을 최소화하여 탐지를 수행한다.

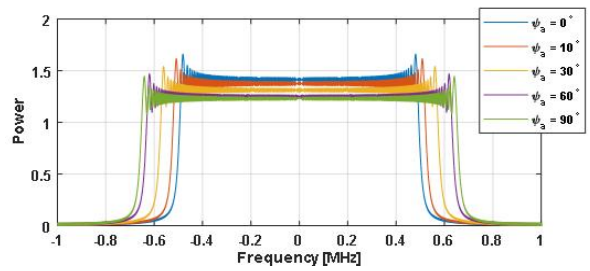


그림 3. 빔 조향각 별 확장 필터 스펙트럼
Fig. 3. Extended filter spectrum

그림 4는 표적의 속도에 따라 기존 방법, 최대 확장 필터링, 제안된 빔 조향각에 따른 확장 필터링을 사용하는 경우의 SNR 손실을 분석한 그림이다. 기존 방법은 필터 확장을 수행하지 않으므로 표적의 속도가 빨라지는 경우 수신 신호 성분이 손실되어, $20\log_{10}(1 - |f_D|/B)$ 항에 따른 SNR 손실이 발생한다[1]. 확장 필터 방법은 표적의 속도에 따라 SNR 손실이 발생하지는 않지만, 잡음 성분이 더 많이 통과되어 일정한 SNR 손실 $10\log_{10}(1 + 2p)$ 을 발생시킨다. 제안하는 방법은 빔 조향각에 따라 확장 비율을 최적화하므로, 표적의 최대 속도가 낮은 고각 영역에서 손실을 최소화하며 신호를 필터링할 수 있다.

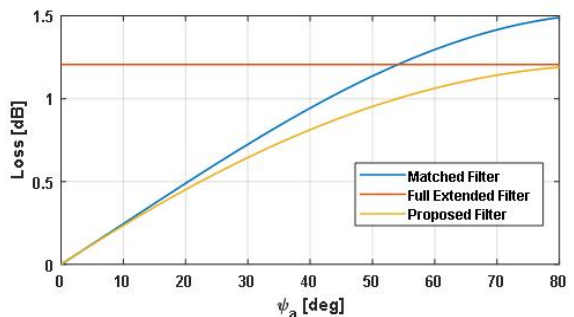


그림 4. 빔 조향 각에 따른 펄스 압축 SNR 손실
Fig. 4. Pulse compression SNR loss

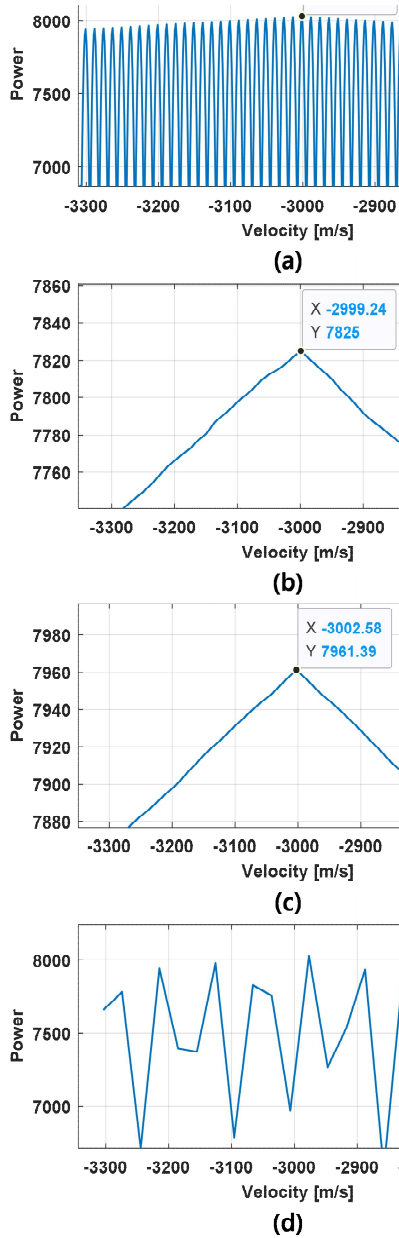


그림 5. 정합 필터 बैं크 간격 별 펄스 압축 첨두치 (필터 बैं크 간격을 각각 (a) $\Delta f = 0.1f_{step}$, (b) $\Delta f = f_{step}$, (c) $\Delta f = 3f_{step}$, (d) $\Delta f = 2.38f_{step}$ 로 설정한 결과)
 Fig. 5. Pulse compression peak value for different filter bank interval (Filter bank interval is set as (a) $\Delta f = 0.1f_{step}$, (b) $\Delta f = f_{step}$, (c) $\Delta f = 3f_{step}$, (d) $\Delta f = 2.38f_{step}$, respectively)

이후, 레이다는 펄스 압축 결과에 따라 탐지 처리를 수행하고, [5]에서와 같이 표적 신호를 분리하여 스펙트럼의 진폭 상관을 통해 1차 속도를 추정한다. 그리고, 추정한 1차 속도를 기반으로 국소 정합 필터 बैं크 처리를 수행한다. 국소 정합 필터 बैं크

폭 f_w 는 $\pm 6\text{kHz}$ 로 설정하였다. 3.3절에서 설명한 필터 बैं크 간격 Δf 에 따른 보상 속도 대비 정합 필터 बैं크 처리 후 첨두치 P_i 는 그림 5와 같다.

그림 5-(a~d)에서 필터 बैं크 간격은 각각 $f_{step} = 595\text{Hz}$ 의 0.1배, 1배, 3배, 2.38배로 설정되었다. Δf 를 임의로(2.38배) 설정한 경우, 그림 5-(d)에서와 같이 거리 straddling에 의한 추정 속도의 왜곡이 발생한다. 따라서 그림 5-(a)와 같이 충분히 간격을 촘촘히 설정하거나, 그림 5-(b), (c)와 같이 동위상 샘플링을 통해 첨두치를 식별할 수 있다. 레이다는 필터 बैं크 처리 결과로부터 식 (12)-(15)을 통해 거리 편향을 보정한다.

4.2 거리 정확도 성능 비교 결과

본 절에서는 제안 방법의 거리 정확도 성능을 비교하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 예시 파형에 대하여 입력 신호의 SNR을 기준으로, [5]의 확장 필터 기반 방법과 제안하는 방법의 정확도를 RMSE로 측정하고 서로 비교하였다. 필터 बैं크 간격은 f_{step} 의 1배로 설정하였고, 몬테카를로 시뮬레이션 횟수는 SNR당 10^5 번을 수행하였다. 거리 및 속도 정확도 측정 결과는 각각 그림 6, 7과 같다.

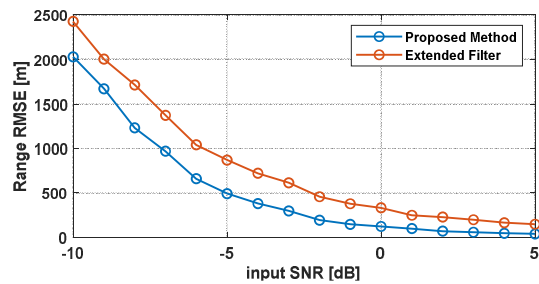


그림 6. 거리 RMSE 실험 결과
 Fig. 6. Experimental results for range RMSE

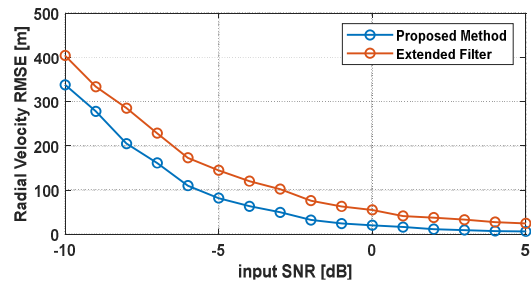


그림 7. 속도 RMSE 실험 결과
 Fig. 7. Experimental results for radial velocity RMSE

제안 방법이 [5]의 확장 필터에서 국소 정합 필터뱅크 처리를 통해 거리 및 속도 정확도를 높일 수 있음을 확인할 수 있다.

4.3 연산량 비교 결과

본 절에서는 제안 방법의 연산량을 비교하였다. 이론적으로, 확장 필터링 기반 속도 추출 방법[5]은 FFT 기반 처리 및 진폭 상관에 비례하기 때문에, 총 연산량은 $O(N \log N + N) \approx O(N \log N)$ 에 해당한다. 반면 진수 탐색을 수행하는 정합 필터뱅크를 사용시, 필터 개수는 $M_{bank} = \frac{2f_{d,max}}{\Delta f} + 1$ 에 해당하며 총 연산량은 $O(M_{bank} \cdot N \log N)$ 이다. 제안하는 방법은 진폭 상관 수행 후 국소 필터뱅크만큼 주파수 필터링 처리를 수행하므로, 필터 수 $M_{local} = \frac{2f_w}{\Delta f} + 1$ 에 해당하며 총 연산량은 $O(N \log N + M_{local} N \log N)$ 이다. 여기서, $f_w \ll f_{d,max}$ 이므로 연산량 측면에서 진수 탐색 대비 큰 절감 효과를 갖는다. 시뮬레이션 환경에서, 처리 시간을 비교한 결과는 표 2와 같다. 모든 실험은 Intel Xeon Gold 6140 (2.3GHz) CPU, 384GB RAM, NVIDIA Quadro P6000(24GB) GPU가 장착된 워크스테이션 상에서 MATLAB R2022a로 수행되었다. FFT 연산 및 벡터화된 정합 필터뱅크 계산은 모두 GPU 가속(gpuArray)를 활용하여 구현되었다. 실험 결과, 제안한 방법이 진수 조사를 수행하는 정합 필터뱅크 방법에 비해 계산 효율적이며, 적은 연산량으로 높은 정확도를 얻을 수 있음을 보인다. 이론적으로 정합 필터뱅크의 연산량은 필터 개수에 선형적으로 증가해야 하지만, MATLAB에서 벡터화 기반으로 구현할 경우 메모리 및 캐시 한계의 영향으로 정합 필터뱅크 기반 진수 탐색 시에 실행 시간이 크게 증가하는 경향을 보였다. 제안 기법은 대부분 행렬 연산과 FFT에 기반하기 때문에 임베디드 환경에서 효율적으로 가속될 수 있으며, 표 2의 MATLAB 측정값(평균 98.09us)을 보수적 상한으로 보더라도, 본 연구에서 가정한 펄스 폭 2ms 및 통상적인 PRI 내 처리 조건을 고려하면 충분한 여유를 가진다. 따라서 본 방법은 실제 임베디드 구현을 전제로 하더라도 실시간 동작 가능성을 가질 수 있다.

표 2. 연산량 비교 결과

Table 2. Computational complexity comparison

| Method | $O(\cdot)$ | Processing time [us] |
|----------------------------|----------------------------|----------------------|
| Extended filter [5] | $N \log N$ | 36.95 |
| Bank of matched filter [2] | $M_{bank} \cdot N \log N$ | 2598.94 |
| Proposed method | $(1 + M_{local}) N \log N$ | 98.09 |

V. 결 론

본 논문에서는 LFM 기반 우주 감시 레이더에서 도플러 효과로 인해 발생하는 거리-도플러 결합 문제를 단일 펄스에서 효율적으로 보상하기 위한 방법을 제안하였다. 제안한 기법은 먼저 빔 조향 각으로부터 표적의 속도 범위를 제한하여 확장 필터의 대역폭을 최소화하고, 이를 통해 1차 속도 추정 시 발생하는 SNR 손실을 줄였다. 이어서, 1차 추정치를 중심으로 국소 정합 필터뱅크를 구성하고 보간 기법을 적용함으로써 2차 미세 추정을 수행하여 거리 편향을 정밀하게 보정하였다. 시뮬레이션 결과, 제안한 방법은 기존의 단일 정합 필터, 확장 필터 단독, 진수 탐색형 필터뱅크와 비교하여 정확도와 연산 효율성의 균형을 동시에 달성함을 확인하였다. 특히, 관측각에 따른 속도 제한 효과를 반영함으로써 확장 필터의 SNR 손실을 줄이고, 국소 탐색 범위를 최소화하여 연산량을 크게 절감할 수 있었다. 향후 연구로는 실제 우주 환경을 고려하여 다표적, 표적 기동(가속도), 클러터/간섭 상황에 대한 대응을 포함한 실제 운용 복잡성까지 포괄하도록 확장할 예정이다.

References

- [1] M. A. Richards, "Fundamentals of Radar Signal Processing", 2nd ed., McGraw-Hill Education, New York, NY, USA, 2014.
- [2] M. I. Skolnik, "Radar Handbook", 3rd ed., McGraw-Hill, New York, NY, USA, 2008.
- [3] B. Hennessy, H. Yardley, R. Debnam, T. A.

- Camilleri, N. K. Spencer, D. A. Holdsworth, G. Warne, B. Cheung, and S. Kharabash, "Space Surveillance with High-Frequency Radar", *Sensors*, Vol. 25, No. 7, Art. 2302, Apr. 2025. <https://doi.org/10.3390/s25072302>.
- [4] T. Kim, J. Park, J. Park, S. Park, S. Yoo, and Y. Kang, "Target velocity estimation method using a single pulse LFM waveform", *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science (JKIEES)*, Vol. 31, No. 6, pp. 555-562, Jun. 2020. <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2020.31.6.555>.
- [5] C. Yeh, J. Yang, X. Shan, and Y. Peng, "Simultaneous range and radial velocity estimation with a single narrowband LFM pulse", *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 23, no. 3, pp. 372-377, 2012. <https://doi.org/10.1109/JSEE.2012.00046>.
- [6] R. Kadlimatti and A. T. Fam, "Doppler detection for linear FM waveform using extended matched filter", *Proc. IEEE Radar Conf. (RadarConf16)*, Philadelphia, PA, USA, pp. 1-5, May 2016. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2016.7485091>.
- [7] O. Aldimashki and A. Serbes, "LFM signal parameter estimation in the fractional Fourier domains: Analytical models and a high-performance algorithm", *Signal Processing*, Vol. 214, Art. 109224, Jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2023.109224>.
- [8] Y. Wang, K. Wang, F. Jing, X. Lan, Y. Zou, and L. Wan, "LFM signal analysis based on improved Lv distribution", *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 169038-169046, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2954455>.
- [9] E. Swiercz, D. Janczak, and K. Konopko, "Detection of LFM radar signals and chirp rate estimation based on time-frequency rate distribution", *Sensors*, Vol. 21, No. 16, Art. 5415, Aug. 2021. <https://doi.org/10.3390/s21165415>.

저자소개

박 성 영 (SungYeong Park)



2014년 2월 : 한국과학기술원
전기및전자공학부(공학사)
2016년 2월 : 한국과학기술원
전기및전자공학부(공학석사)
2016년 2월 ~ 현재 :
국방과학연구소 선임연구원
관심분야 : 능동위상배열레이다,

레이다 신호처리

임 상 호 (Sangho Lim)



2006년 2월 : 중앙대학교
전자전기공학부(공학사)
2008년 2월 : KAIST 전기 및
전자공학과(공학석사)
2011년 8월 : KAIST 전기 및
전자공학과(공학박사)
2011년 9월 ~ 2016년 9월 :

삼성전자 책임연구원

2016년 10월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임연구원
관심분야 : 영상레이다, 우주감시레이다

양 은 정 (Eunjung Yang)



2004년 2월 : 한국과학기술원
전기및전자공학과(공학사)
2006년 8월 : 한국과학기술원
전기및전자공학과(공학석사)
2011년 2월 : 한국과학기술원
전기및전자공학과(공학박사)
2011년 2월 ~ 현재 :

국방과학연구소 책임연구원

관심분야 : 레이다 신호처리

신 혁 수 (Hyuksoo Shin)



2011년 2월 : 고려대학교
컴퓨터통신공학부(공학사)
2020년 2월 : 고려대학교
전파통신공학과(공학박사)
2019년 12월 ~ 현재 :

국방과학연구소 선임연구원
관심분야 : 항공기 탑재 레이다

체계 설계 / 신호처리

정 태 희 (Taehee Jeong)



2009년 2월 : 한양대학교
전자통신컴퓨터공학부(공학사)
2011년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학석사)
2024년 2월 : 한국과학기술원
전기및전자공학부(공학박사)
2011년 1월 ~ 현재 :

국방과학연구소 선임연구원
관심분야 : 레이더 신호처리, 표적 탐지, 레이더 시스템

조 병 래 (Byunglae Cho)



1999년 2월 : 경북대학교
전자전기공학부(공학사)
2001년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학석사)
2005년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학박사)
2005년 3월 ~ 2006년 1월 :

포항공과대학교 전자전기공학과 연구원
2006년 1월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임연구원
관심분야 : 레이더 신호처리, 영상레이더