

항공기 레이다용 거리 기반 실시간 PRF 선정 알고리즘 설계 및 검증

Design and Validation of a Real-Time PRF Selection Algorithm for Airborne Radar Systems Based on Range Information

박연희 · 윤지환 · 노지은

Yeonhee Park · Ji Hwan Yoon · Ji Eun Roh

요약

항공기 레이다에서 클러터 분포를 고려한 최적의 PRF를 선정하는 것은 표적 탐지 성능을 향상시키는 데 매우 중요하다. 특히, 항공기 레이다에서는 비행 환경에 따라 주엽 클러터, 부엽 클러터 분포가 실시간으로 변화하기 때문에, 이를 고려한 최적의 PRF 선정 알고리즘이 필요하다. 기존의 여러 연구에서 PRF 선정 알고리즘이 제안되었으나, 복잡한 현대 전장에서 다양한 임무를 수행해야 하는 전투기 탑재 능동위상배열 레이다의 경우 계산 시간의 단축을 통해 실시간성을 개선하는 것이 더욱 요구된다. 본 논문에서는 실시간으로 획득된 거리-도플러 맵에서 표적과 클러터 신호 사이의 거리를 비교하여 최적의 PRF를 선택하는 알고리즘을 제안하여 실시간성을 향상시키고자 하였으며, 시뮬레이션 결과를 통해 최적의 PRF 선정 결과와 계산 시간 단축 효과를 확인하였다. 또한 레이다를 탑재한 FTB(flight test bed)를 활용한 실 비행시험 결과를 통해 제안 알고리즘이 실시간 운용과 추적 유지 관점에서 효과적으로 작동함을 확인하였다.

Abstract

In airborne radar systems, selecting the optimal pulse repetition frequency (PRF) in response to variations in clutter distribution is crucial for enhancing target detection performance. Specifically, several factors must be considered when determining the optimal PRF, including main-lobe clutter, sidelobe clutter, and blind range zone. Given that these factors vary constantly, a real-time PRF selection algorithm is essential for airborne radar operations. Although several studies have proposed PRF selection algorithms, the computational time required for multifunctional airborne radar operations must be reduced. This study proposes an algorithm that compares target distance and interference levels in the range-Doppler map to select the optimal PRF, thereby improving real-time performance. Simulation results validated the PRF selection under varying environmental conditions and reduced the computational overhead. Flight test results further confirmed that the proposed algorithm performed effectively in both real-time operation and optimal PRF selection to without track loss.

Key words: Airborne Radar, Clutter, Radar Flight Test, Track Performance, Waveform Design

「이 연구는 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소에서 수행한 연구 결과임(274190001).」

국방과학연구소(Agency for Defense Development(ADD))

· Manuscript received June 10, 2025 ; Revised June 30, 2025 ; Accepted August 4, 2025. (ID No. 20250610-055)

· Corresponding Author: Yeonhee Park (e-mail: yhpak@add.re.kr)

I. 서 론

송신 파형의 설계는 레이더 시스템에서 매우 중요한 요소이다. 항공기 레이더의 주요 역할은 강력한 지상 클러터 환경에서도 표적의 거리와 속도를 정확하게 측정하는 것이며, 클러터에 강인한 특성을 가지는 MPRF(*medium pulse repetition frequency*) 파형이 널리 사용되고 있다. MPRF 파형에서는 거리 모호성을 해결해야 하는데, 탐색 단계에서는 목표물에 대한 정보가 없으므로 모호성을 해결하기 위해 다수의 PRF가 사용된다^{[1][3]}. 반면, 추적 단계에서는 추적 필터로부터 예측된 목표 거리 및 도플러 주파수 정보를 활용하여 단일 PRF만으로도 모호성을 해결할 수 있다.

거리-도플러 맵(*range-Doppler map*)은 표적의 거리 및 속도를 동시에 분석할 수 있는 대표적인 2차원 레이더 신호 처리 기법이다. PRF에 따라 거리-도플러 도메인에서의 클러터 분포가 달라지므로, 단일 PRF를 사용하는 추적 단계에서는 클러터 간섭이 없는 깨끗한 영역에 표적 신호를 위치시키는 최적의 PRF를 선택하는 것이 중요하다. 이때 그림 1과 같이 주엽 클러터(*MLC, main-lobe clutter*), 부엽 클러터(*SLC, side-lobe clutter*), 그리고 송신 펄스에 의해 발생하는 블라인드 존(*blind range zone*)을 고려해야 한다.

주엽 클러터는 도플러 축에서 플랫폼의 속도에 가까운

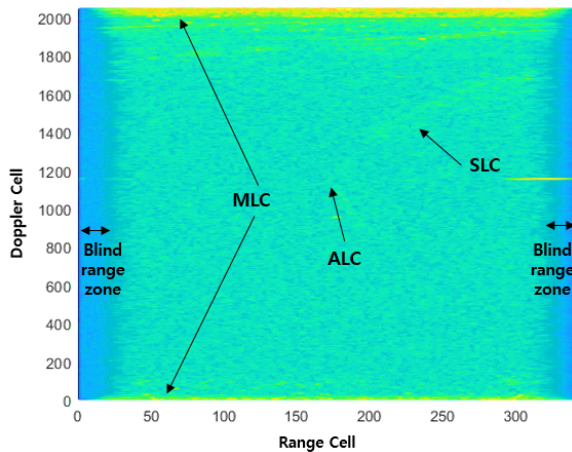


그림 1. 간섭신호가 존재하는 거리-도플러 맵
Fig. 1. Range-Doppler map with blind zone due to eclipse, sidelobe clutter including altitude line, and mainlobe clutter.

영역에 강한 에너지로 집중되며, 부엽 클러터는 다양한 거리 및 속도 영역에 비교적 낮은 세기로 분포한다. 고도 클러터는 플랫폼 고도와 동일한 거리에서 발생하며, 도플러가 거의 없기 때문에 도플러 0 근처에 나타난다. 각 클러터의 에너지는 플랫폼의 속도 및 고도, 레이더 운용 빙폭, 빙 조향각 등에 의해 결정된다^[4].

이러한 간섭 요소들의 실시간 변화를 고려하여 최적의 PRF를 실시간으로 계산하는 알고리즘에 대한 연구는 활발히 진행되어 왔다^{[1][3][5][7]}. 그러나 레이더는 신호처리부, 송수신기, 안테나, 전원 공급 장치 등 다양한 하위 시스템으로 구성된 복합 시스템이므로, 각 하위 시스템의 요구사항과 제약 조건을 함께 고려하여 알고리즘을 설계할 필요가 있다. 따라서, 높은 연산 복잡도를 가지는 실시간 PRF 계산 방식보다는, 미리 정의된 PRF 집합 중에서 성능 기준을 만족할 수 있는 최적의 PRF를 선택하는 방식이 현실적이다.

고정된 지상 레이더의 경우, 사전 정의된 PRF집합 내에서 최적의 PRF를 선정하는 알고리즘이 기준에 제안된 바 있으나^[6], 클러터 환경이 실시간으로 변화는 공중 상황을 고려한 항공기 레이더용 알고리즘에 대한 연구가 필요하다. 또한 기준에 실시간 연산을 통해 최적의 PRF를 선정하는 항공기 레이더용 파형 선정 알고리즘이 제안된 바 있으나^[7], 전투기 근접 교전을 위한 레이더 운용에서는 매우 짧은 추적 갱신 주기가 요구되므로, PRF 선택에 소요되는 계산 시간을 더욱 단축할 필요가 있다.

본 연구에서는 변화하는 클러터 분포를 고려함과 동시에 항공기 레이더 시스템의 실시간 성능을 향상시키는 PRF 선택 알고리즘을 제안한다. 제 II장에서는 간섭과의 거리 비교를 위한 식을 제안함으로써, SLC를 기반으로 한 PRF 선택 알고리즘을 설명한다. 제 III장에서는 시뮬레이션 및 FTB(*flight test bed*)를 활용한 실 비행시험 결과를 통해 알고리즘의 효과를 검증한다. 마지막으로 제 IV장에서는 본 연구의 결론을 정리한다.

II. 항공기 레이더 클러터 분포 기반 PRF 선정 알고리즘

본 장에서는 제안하고자 하는 추적 PRF 선택 알고리즘을 소개한다. 첫 번째 단계는 후보 PRF 집합을 미리 설정

하는 것이며, 두 번째 단계는 설정된 후보 PRF군 내에서 RD 맵에서 간섭을 회피하여 최적의 PRF를 선택하는 것이다. 이 때, 계산 복잡도를 줄이기 위해, 후보 PRF들 간에 목표와 간섭 간의 거리를 비교하는 변수를 정의하였다.

첫 번째 단계에서는 RD 맵에서의 간섭 영역을 최소화하여 가시성(visibility)을 확보하고 안정적인 추적 성능을 얻을 수 있는 PRF 후보군을 선정하는 것이 목적이다. 거리 축의 송신 펄스폭에 의한 블라인드 존과 도플러 축의 주엽 클러터 영역은 신호처리 과정에서 제거되는 영역이므로, 표적 신호 탐지를 위해서는 적어도 하나의 PRF에서 표적 신호가 송신 펄스 폭에 의한 블라인드 존과 주엽 클러터에 의한 도플러 간섭으로부터 벗어날 수 있어야 한다. 서로 다른 가시성을 갖는 PRF 집합 간의 가시성 맵을 그림 2에 비교하였다. 가시성 맵이란 여러 PRF 조합을 통해 관측 가능한 거리와 속도(Doppler) 영역의 가시성을 시각화한 것으로, 각 PRF 조합이 커버하는 영역과 블라인드 존이 어떻게 분포되어 있는지를 거리-도플러 평면 상에 나타낸 것이다. 검은 영역은 10개의 PRF 모두에서 송신 간격 및 주엽 클러터에 의해 블라인드 처리된 영역으로, 표적 신호가 어느 PRF에서도 탐지되지 않음을 의미한다. 따라서, 추적 단계에서 최적의 PRF를 선택하기 전에 충분한 가시성 성능을 갖춘 PRF 집합을 평가하는 과정이 필수적이다.

다음 단계에서는 사전에 설정된 PRF 집합 중 표적의 예상 거리 및 도플러 정보를 기반으로 클러터 측면에서의 최적의 PRF를 선택한다. 기존의 지상 레이다를 다룬 연구^[6]에서는 송신 파형에 의한 블라인드 영역, 거리 축의 지상 클러터, 도플러 영역의 주엽 클러터만을 PRF 선

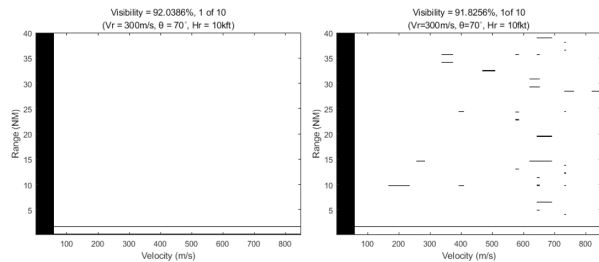


그림 2. 서로 다른 가시성을 갖는 PRF 후보군의 거리-도플러 맵
Fig. 2. Comparison of visibility between good predetermined PRFs and bad predetermined PRF set.

택 요소로 고려하였다. 하지만 이들은 고정된 값으로 비교적 단순한 알고리즘 로직을 가진다. 반면, 본 연구는 항공기 레이다의 실시간으로 변화하는 클러터 특성을 고려하여 PRF를 선택하고자 한다.

표적 신호가 거리-도플러 맵의 깨끗한 영역에 위치하려면, 간섭신호로부터 최대한 멀리 떨어진 위치에 배치되는 것이 바람직하다. 계산 복잡도를 줄이고 실시간 성능을 향상시키기 위해, PRF 집합에 대해 목표 신호와 간섭 간의 거리를 비교할 수 있는 수식을 도입하였다. 본 알고리즘에서는 $distH$, $distR$, $distF$ 의 세 가지 변수를 정의하며, 각 변수에 대한 정의는 다음과 같다.

- $distH$: 거리 도메인에서 부엽 클러터 신호 중 전력이 가장 강한 고도 클러터(ALC, altitude line clutter)를 회피하기 위한 변수
- $distR$: 거리 도메인에서 신호 송신 구간에서 가장 멀리 떨어진 위치를 찾기 위한 변수 (거리-도플러 맵 내 고도 클러터 포함 여부에 따라 $distR_c$ 와 $distR_H$ 로 구분)
- $distF$: 도플러 도메인에서 주엽 클러터로부터 멀리 떨어진 위치를 찾기 위한 변수

최적의 PRF는 그림 3과 같이 이 세 가지 거리 변수의 제곱합($distH^2 + distR^2 + distF^2$)이 최소가 되는 값으로 결정된다.

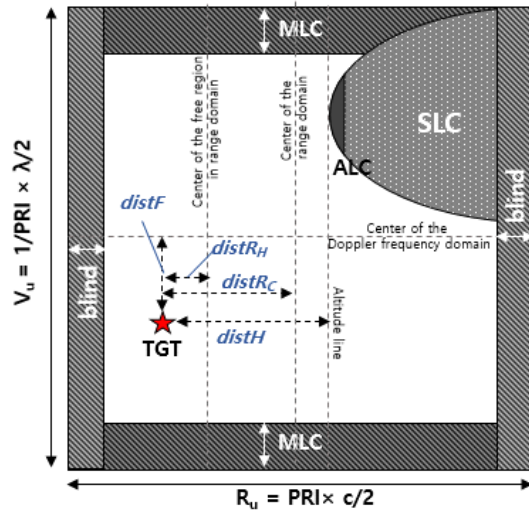


그림 3. 최적의 PRF 선정을 위한 변수 $distH$, $distR$, $distF$ 의 정의
Fig. 3. Example of $distH$, $distR$, $distF$ and for selecting best tracking PRF.

2-1 거리 도메인에서 고도 클러스터 회피(distH)

부엽 클러스터는 일반적으로 고도 위치에서 가장 강한 전력을 나타낸다. 기존 연구^[8]에서는 고도의 왼쪽 영역만, 즉, 고도의 모호성있는 거리보다 작은 거리에 대해서만 PRF 선택 영역으로 제한했지만, 이 경우 고도선이 RD 맵의 왼쪽 가장자리에 위치한다면 사용할 수 있는 영역이 매우 제한될 수 있다. 본 알고리즘은 선택 후보를 확장하기 위해 양측 모두에서 PRF 선택이 가능하도록 하였다. 단, 부엽 클러스터는 고도 기준으로 오른쪽 방향으로 퍼지므로, 클러스터가 없는 왼쪽 영역을 우선적으로 고려하고, 오른쪽 영역에서는 range 도메인의 끝 방향으로 갈수록 distH 값이 선형적으로 감소하도록 설정하였다(그림 4). 결과적으로, PRF 선택 알고리즘은 목표 신호가 오른쪽의 부엽 클러스터보다 왼쪽 클리어 영역에 위치할 확률을 높인다. 그림 4의 distH는 다음의 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$distH(r) = \begin{cases} 0 & , r_{blind} < r < H_{own} \\ distH_{max} & , H_{own} \leq r < H_{own} + H_{rej} \\ -\frac{distH_{max}(r - (R_u - r_{blind}))}{(R_u - r_{blind}) - (H_{own} - H_{rej})} & , H_{own} + H_{rej} \leq r < R_u - r_{blind} \end{cases} \quad (1)$$

여기서 R_u 는 각 PRF의 모호성있는 거리, H_{own} 는 해당

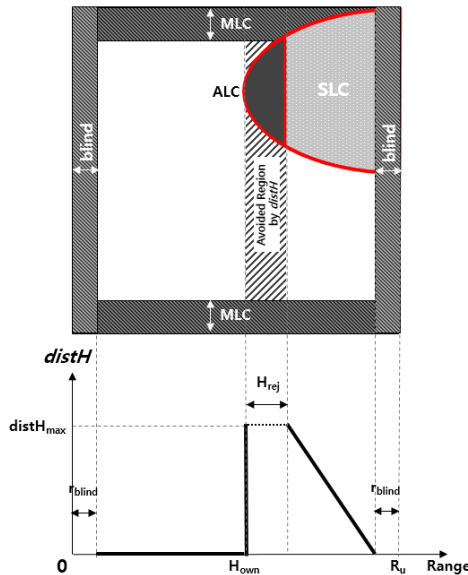


그림 4. distH의 계산 방식
Fig. 4. Calculation of distH.

PRF 기준 모호성있는 고도 거리, H_{rej} 는 고도 클러스터 영역 마진, r_{blind} 는 송신 구간 블라인드 영역을 의미한다.

2-2 거리 도메인에서 블라인드 존 회피(distR)

본 절에서는 거리 도메인에서의 블라인드 존 회피를 위해 두 가지 distR 변수를 제안한다. 첫 번째는 distR_C로, 거리 도메인의 가장자리 간섭인 송신 블라인드 존을 피하기 위해 표적 신호가 중심에 가까울수록 유리하도록 설정된다(그림 5).

$$distR_c(r) = \begin{cases} -distR_{max} \left(\frac{2}{R_{free}} (r - r_{blind}) - 1 \right) & , r_{blind} < r < r_{blind} + 0.5R_{free} \\ distR_{max} \left(\frac{2}{R_{free}} (r - (R_u - r_{blind})) + 1 \right) & , r_{blind} + 0.5R_{free} \leq r < R_u - r_{blind} \end{cases} \quad (2)$$

여기서 R_{free} 는 거리 도메인에서 양 끝의 송신 구간을 제외한 클리어한 거리 영역을 의미한다.

그러나 중심이 항상 최적 위치는 아니다. 예를 들어, 고도가 거리 도메인의 중심에 위치한 경우, SLC로 인해 목표

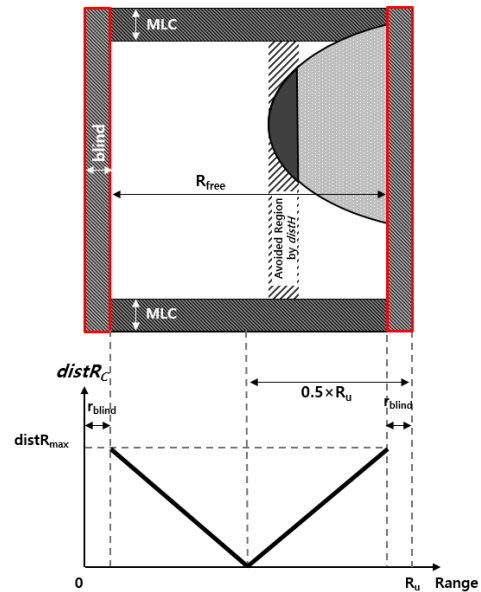


그림 5. distR_C의 계산 방식
Fig. 5. Calculation of distR_C.

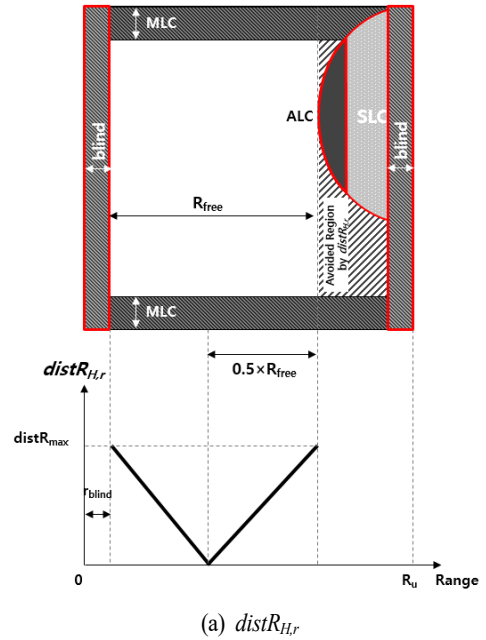
의 SCR(signal-to-clutter ratio)이 저하되어 표적 신호 탐지가 어려울 수 있다. 이를 보완하기 위해 가장자리의 송신 블라인드 존 뿐만 아니라 고도까지 함께 고려한 $distR_H$ 를 추가로 제안하였다. $distR_H$ 는 고도의 모호성있는 거리에 따라 두 가지 방식으로 정의된다. 고도가 중심보다 오른쪽에 있으면, 클리어 영역은 왼쪽에 위치하며 그 중심을 기준으로 PRF를 선택한다(그림 6(a)). 반대로 고도선이 중심보다 왼쪽에 있으면, 오른쪽 영역이 상대적으로 넓고 후보 PRF도 많아, 오른쪽 영역을 사용하는 것이 유리하다(그림 6(b)).

$$\begin{aligned}
 & distR_{H,r}(r) \\
 &= \begin{cases} -distR_{max} \left(\frac{2}{R_{free}}(r - r_{blind}) - 1 \right) & , r_{blind} < r < r_{blind} + 0.5R_{free} \\ distR_{max} \left(\frac{2}{R_{free}}(r - (R_u - r_{blind})) + 1 \right) & , r_{blind} + 0.5R_{free} \leq r < H_{own} \end{cases} \quad (3)
 \end{aligned}$$

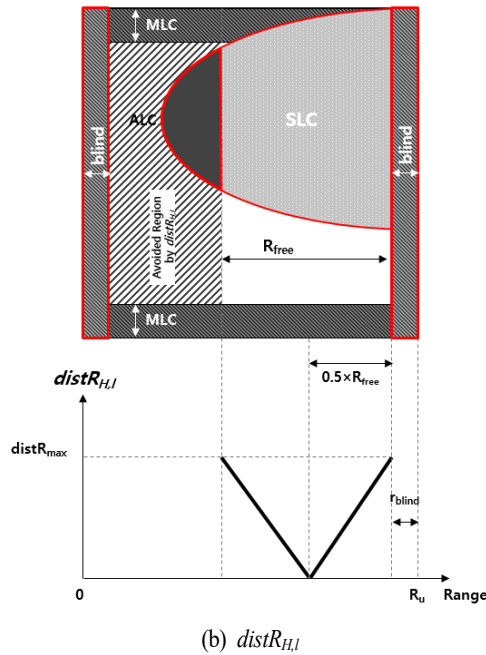
$$\begin{aligned}
 & distR_{H,l}(r) \\
 &= \begin{cases} -distR_{max} \left(\frac{2}{R_{free}}(r - H_{own}) - 1 \right) & , H_{own} < r < H_{own} + 0.5R_{free} \\ distR_{max} \left(\frac{2}{R_{free}}(r - (R_u - r_{blind})) + 1 \right) & , H_{own} + 0.5R_{free} \leq r < R_u - r_{blind} \end{cases} \quad (4)
 \end{aligned}$$

여기서 R_{free} 는 거리 도메인에서 고도 클러터의 영향을 최소화한 영역을 의미한다.

$distR_C$, $distR_H$ 두 변수 모두 시스템의 목적에 따라 적용 가능하다. $distR_C$ 의 경우, 블라인드 존을 회피하면서 표적 신호를 위치시킬 수 있는 클리어한 영역을 비교적 간단히 찾을 수 있으며, 사용 가능한 PRF 수도 충분히 확보 가능하다. 그러나 부엽 클러터의 위치를 고려하지 않기 때문에 표적의 위치와 고도 클러터의 위치가 겹쳐 표적 신호 탐지 성능을 저하시킬 수 있다. 이러한 부작용을 고려해 $distR_H$ 의 사용이 가능하며, 이 경우 탐지성능을 향상시킬 수 있는 PRF 선택이 가능하나, 가용한 PRF 수가 줄어드는 trade-off 관계가 있다. 즉, $distR_C$ 은 고도 및 부엽 클러터의 공간적 분포를 반영하지 않고, 블라인드존 회피에 중점을 둔 방식으로, 클러터 영향이 적은 운용 환경에서 충분한 PRF 세트를 효율적으로 구성할 수 있다는 장점이 있다. 반면, $distR_H$ 는 고도 및 부엽 클러터의 영향을



(a) $distR_{H,r}$



(b) $distR_{H,l}$

그림 6. $distR_{H,r}$, $distR_{H,l}$ 의 계산 방식

Fig. 6. Calculation of $distR_{H,r}$, $distR_{H,l}$.

실질적으로 반영하여 클러터 밀도가 높은 환경에서도 클러터 간섭을 최소화할 수 있는 최적의 PRF를 선택하는데 유리하다. 따라서 전투기 운용 측면에서, $distR_C$ 은 상

대적으로 클러터의 영향이 적은 환경에서 작전 운용 시 신속한 PRF 스케줄링에 적합하며, $distR_H$ 는 복잡한 클러터 조건 하에서의 정밀 운용이 요구되는 작전 운용 시 보다 효과적으로 적용될 수 있다.

2-3 도플러 도메인에서 주엽 클러터 회피(distF)

도플러 도메인에서는 플랫폼 속도 보상 후, 주엽 클러터가 거리-도플러 맵 가장자리에 위치하게 된다. 도플러 영역에는 다른 간섭 요소가 없기 때문에, 목표 신호는 도플러 중심에 위치하는 것이 가장 바람직하다(그림 7). 따라서 $distF$ 는 도플러 중심에서 최소가 되도록 하고, 가장자리로 갈수록 증가한다. 이 수식은 도플러의 유효 영역과 주엽 클러터 폭을 고려하여 식 (5)로 표현된다.

$$distF(r) = \begin{cases} -distF_{max} \left(\frac{2}{V_{free}} (v - v_{blind}) - 1 \right) & , v_{MLC} < v < v_{MLV} + 0.5 V_{free} \\ distF_{max} \left(\frac{2}{V_{free}} (v - (V_u - v_{MLC})) + 1 \right) & , v_{MLC} + 0.5 V_{free} \leq v < V_u - v_{MLC} \end{cases} \quad (5)$$

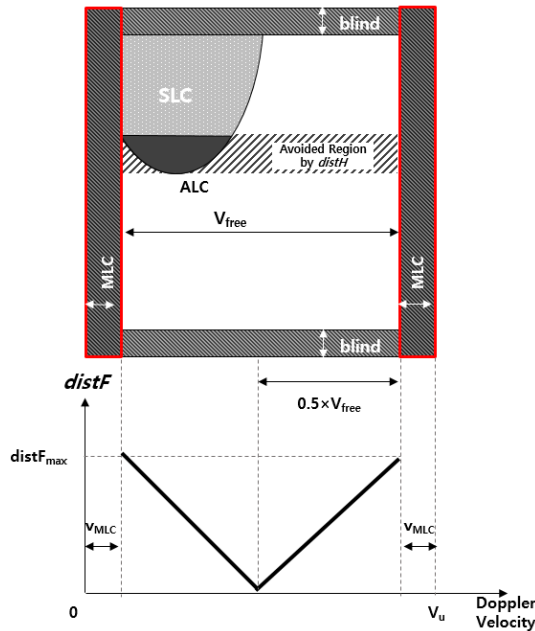


그림 7. $distF$ 의 계산 방식
Fig. 7. Calculation of $distF$.

여기서 V_u 는 각 PRF의 모호성있는 도플러 속도, V_{free} 는 도플러 도메인에서 양 끝의 주엽 클러터 구간을 제외한 클리어한 영역, v_{MLC} 는 주엽 클러터의 폭을 의미한다.

2-4 최적 PRF 선택: $distH^2 + distR^2 + distF^2$ 최소화

매 추적 갱신 시점마다 $distH$, $distR$, $distF$ 를 계산하고, 이들의 제곱합을 구한다. 본 연구에서는 세 변수의 상대적 중요도를 균등하게 가정하여 동일한 가중치를 적용한 제곱합 최소화 방식으로 PRF 선정 알고리즘을 구성하였다. 이는 알고리즘의 구조를 단순화하고 변수 간 상호작용을 정량적으로 비교하기 위한 초기 설계 기준으로 설정된 것이다. 이 값이 최소가 되는 PRF가 해당 시점에서 가장 적합한 PRF가 된다. 레이더 신호처리 과정에서 처리하지 않는 블라인드 레인지 존(r_{blind})이나 주엽 클러터 영역(v_{MLC})에 목표 신호가 위치하는 것을 방지하기 위해, 이 영역에 해당하는 PRF들의 $distR$, $distF$ 값은 매우 큰 값으로 설정한다. 이들의 최대값($distH_{max}$, $distR_{max}$, $distF_{max}$) 역시 동일한 값으로 설정하였다.

III. 시뮬레이션과 실 비행시험을 통한 검증

3-1 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에 사용한 PRF 집합은 표 1과 같다. II 장에서 언급한 바와 같이 클린한 가시성 맵을 확보할 수 있는 PRF 후보군을 설계했으며, 표적의 거리에 따라 CPI(coherent pulse integrations) 수를 차등 적용하였다⁹⁾. 100 km 거리의 표적이 레이더를 향해 300 m/s의 시선속도로 접근하는 상황을 가정하였다. 이 때 레이더의 고도는 평균 5,000 m를 기준으로 무작위로 변동하도록 설정했으며, 레

표 1. 시뮬레이션에 사용한 파형
Table 1. Waveform table for simulations.

Waveform number	Range [NM]	PRF set [μs]
1-10	$60 < r$	[20, 21, 23, 24, 26, 31, 33, 37, 39, 41]
11-0	$40 < r \leq 60$	
21-30	$20 < r \leq 40$	
31-40	$r \leq 20$	

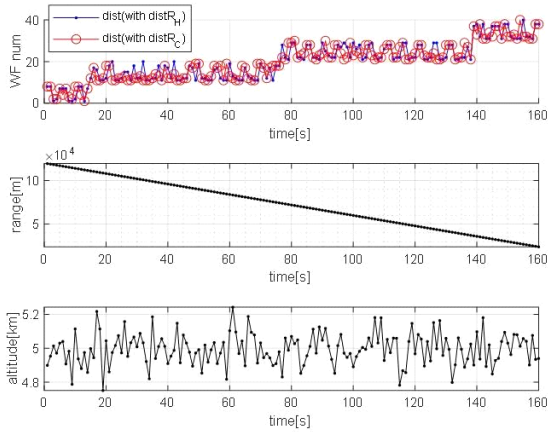


그림 8. 표적 거리 및 레이더 고도에 따른 PRF 선정 시물레이션 결과

Fig. 8. Simulation result of waveform selection based on the proposed PRF selection algorithm, target range, and radar altitude.

이들의 운용 고도에 따른 클러스터 분포 및 표적 거리에 따라 II 장에서 제시한 알고리즘대로 최적의 PRF를 선택한 결과는 그림 8에 제시되어 있다.

$distR$ 의 두 가지 산출 방식에 따라 PRF 선정 결과가 서로 다를 수 있다. 예를 들어, 그림 9의 time tick 100 시점에서의 선택 결과를 살펴보면, 세 변수의 제곱합을 최소화 하는 파형번호가 각각 23과 29로 서로 다르다.

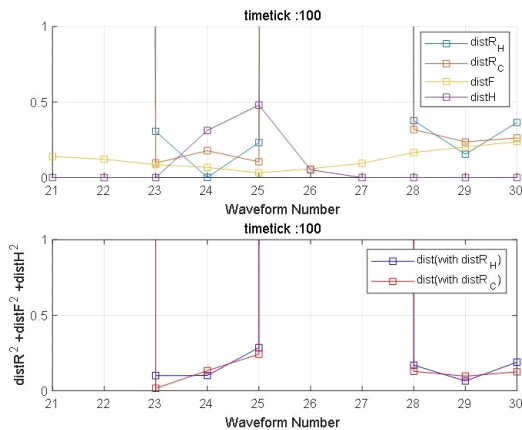


그림 9. Time tick 100에서의 각 파형번호 별 변수값 및 변수의 제곱합 결과

Fig. 9. Example of the result of $distR^2 + distF^2 + distH^2$ (time tick 100).

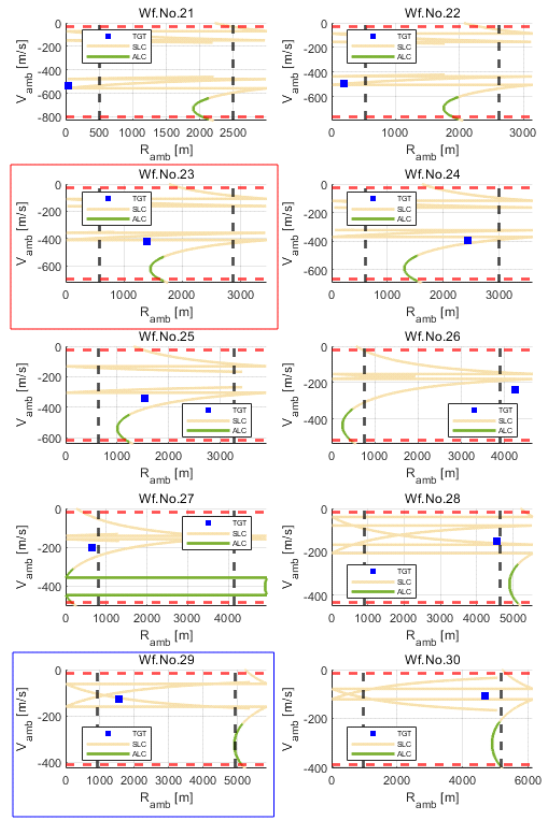


그림 10. 시물레이션을 통한 각 파형번호 별 간섭 및 표적 신호 분포와 PRF 선정 결과(time tick 100, $distR_C$: 빨간 상자, $distR_H$: 파란 상자)

Fig. 10. Simulation results of RD map of 10 PRFs and selected PRF by $distR_C$ (red box) and $distR_H$ (blue box) at the time tick of 100.

그림 10의 해당 시점에서의 각 파형번호 별 클러스터 및 표적 신호의 분포를 보면 파형번호 23은 표적 신호가 거리 도메인의 중심에 근접해있고, 파형번호 29의 경우 블라인드 존과 고도 클러스터 사이 중심에 근접한 기준으로 선정되었다. 해당 두 파형 모두 표적 탐지가 가능하도록 잘 선정된 것을 알 수 있다. 그림 10에서 붉은 점선은 주엽 클러스터 영역, 검은 점선은 송신 구간 블라인드 존, 노란 선은 부엽 클러스터 분포의 경계, 녹색 선은 가장 강한 부엽 클러스터 전력을 가지는 고도 클러스터를 의미하며, 마지막으로 파란색 사각형은 표적의 예측 거리 및 도플러 속도를 나타낸다.

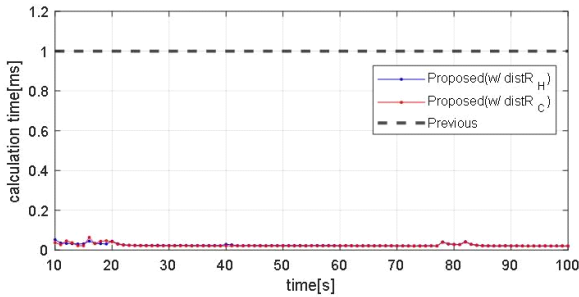


그림 11. 기존 및 제안 알고리즘 간 연산 시간 비교
Fig. 11. Comparison of calculation time between previous algorithm and proposed algorithm.

PRF 선정 계산 시간은 약 $25 \mu\text{s}$ 로 측정되었다. 제안 알고리즘의 계산 시간은 기존 알고리즘^[7] 대비 현저히 짧은 것으로 나타나며(그림 11), 이에 따라 제안 알고리즘은 실시간 처리 성능을 향상시키는 동시에 안정적인 추적 성능을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 본 논문에서는 연산량 비교를 정량적으로 수행하지는 않았지만, 향후 연구에서는 제안 기법의 구조적 특성을 수식적으로 분석하고, 기존 기법과의 연산 복잡도 비교를 통해 이론적 우수성을 추가적으로 검증할 예정이다.

3-2 FTB를 활용한 실 비행시험 결과

실 비행 환경에서의 제안 알고리즘 유효성을 확인하기 위해 AESA 레이더가 탑재된 시험항공기(FTB, flight test bed)와 실제 표적 항공기를 사용한 레이더 비행시험을 수행하였다^[10]. 시험 시나리오는 앞서 시뮬레이션과 유사한 수평 접근 비행으로 구성되었다. 개발 중인 시스템의 보안상의 이유로, 실제 사용된 PRF 등의 파형정보는 비공개 처리하였다. 본 비행시험에서는 거리 도메인의 중심을 기준으로 선정하는 $distR_C$ 변수를 사용한 알고리즘이 적용되었다.

그림 12의 결과를 보면, 표적이 접근해오고 레이더의 고도가 변함에 따라 제안 알고리즘을 통해 파형번호가 다르게 선정되었다. 비행시험 수행 중 부적절한 PRF 선정으로 인한 추적 소실은 발생하지 않았다. 그러나 그림 13의 time tick 176827 시점의 거리-도플러 맵을 보면 표적의 신호가 고도 클러스터와 매우 근접하게 위치함을 알 수 있다.

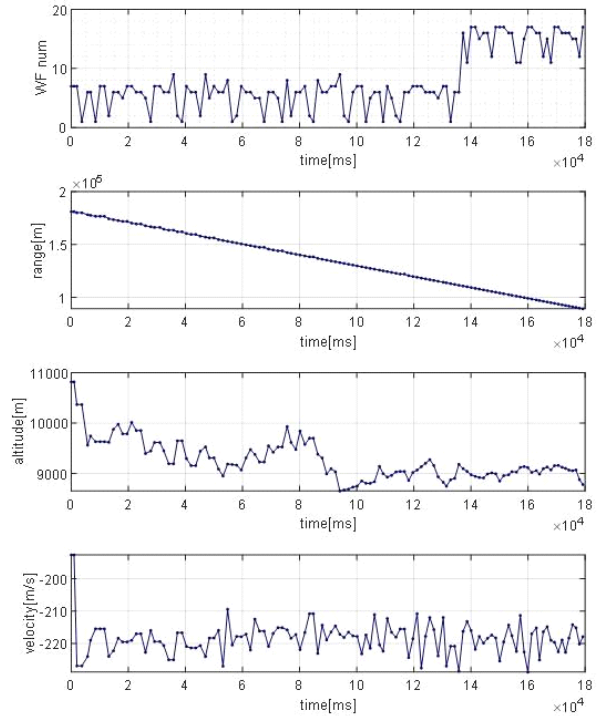


그림 12. 비행시험을 통해 획득한 항공기 고도 및 표적 거리에 따른 파형 선정 결과($distR_C$ 적용)
Fig. 12. Flight test result of PRF selection based on the proposed PRF selection algorithm by $distR_C$.

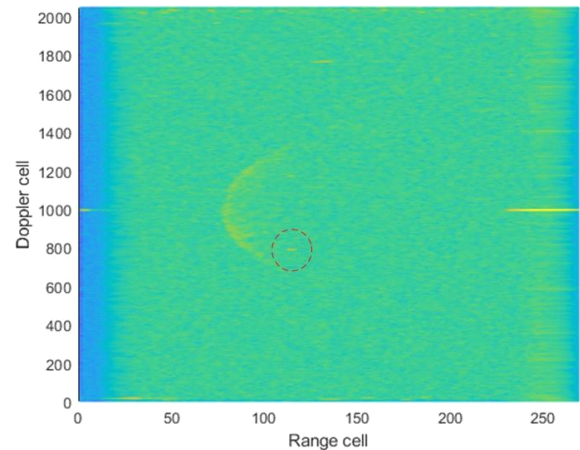


그림 13. 비행시험을 통해 획득한 time tick 176827에서의 거리-도플러 맵의 클러스터 분포 및 표적 신호
Fig. 13. Comparison of calculation time between previous algorithm and proposed algorithm.

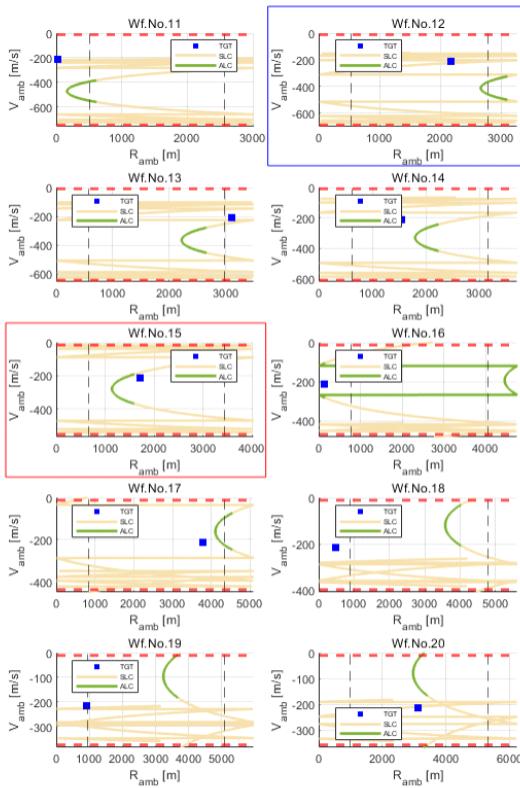


그림 14. 비행시험을 통해 획득한 각 파형번호 별 간섭 및 표적신호 분포와 PRF 선정 결과(time tick 176827, $distR_C$: 빨간 상자, $distR_H$ 재계산결과: 파란 상자)

Fig. 14. Comparison of selected PRF between flight test result by using $distR_C$ (red box) and re-selection by using $distR_H$ (blue box).

이는 추적 필터의 불확실성 또는 클러터 전력의 영향에 따라 추적 손실이 발생할 수 있는 위험이 있다. 해당 시점에서 선정된 파형은 15번이며, 그림 14는 이 time tick에서 사용된 모든 PRF들의 거리-도플러 맵을 나타낸다. 빨간색 박스는 비행시험에서 $distR_C$ 기반으로 PRF를 선정한 결과이며, 파란색 박스는 비행시험에서 획득한 데이터를 바탕으로 동일 조건에서 고도 클러터 영향을 줄이기 위해 $distR_H$ 기반으로 PRF를 재계산한 결과이다. 두 가지 $distR$ 변수를 사용한 제안 알고리즘에서 모두 적절한 PRF를 선정함을 알 수 있다.

결론적으로 실 비행시험을 통해 제안 알고리즘을 검증

한 결과 실시간 처리 성능과 최적의 PRF 선택 측면 모두에서 효과적으로 작동하였다. 특히, 표적과 고도 클러터의 위치에 따라 $distR_C$ 와 $distR_H$ 를 선택적으로 사용해 좀더 우수한 성능을 확보할 수 있다는 것을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 항공기 레이더 시스템에서 실시간으로 추적 성능을 향상시키기 위한 효율적인 PRF 선택 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 거리-도플러 맵에서의 클러터, 블라인드 존 등 제약 조건을 정량화한 거리 기반 척도인 $distH$, $distR$, $distF$ 의 통합하여, 각 도메인에서 클러터 및 블라인드 존을 회피하고 표적 신호가 최적의 위치에 배치되도록 PRF를 선택한다.

시뮬레이션 결과 제안된 알고리즘은 기존 알고리즘 대비 계산 시간이 단축되고, 클러터나 블라인드 존에 의해 표적 신호가 소실되지 않는 최적의 PRF를 선택함으로써 추적 안정성을 크게 향상시켰다. 또한 실제 AESA 레이더를 탑재한 FTB 비행시험을 통해 제안된 알고리즘의 실시간 적용 가능성과 유효성이 입증되었으며, 특히 $distR_H$ 변수를 사용할 경우 고도 클러터가 열악한 상황에서도 안정적인 추적 성능을 확보할 수 있음을 확인하였다.

향후 연구에서는 시스템 파라미터 기반의 통합 시뮬레이션 환경을 확보하여 탐지 및 추적 성능 측면의 확장 분석을 통해 본 알고리즘의 적용 가능성을 확대하고, 머신러닝 기반의 적응형 PRF 선택 알고리즘의 가능성을 모색할 예정이다. 또한, 운용 환경에 따라 $distH$, $distR$, $distF$ 각 변수의 기여도가 상이할 수 있으며, 이에 따라 가중치 최적화 기법을 적용할 경우, 알고리즘의 유연성과 적용성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] C. M. Alabaster, E. J. Hughes, and J. H. Matthew, "Medium PRF radar PRF selection using evolutionary algorithms," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, no. 3, pp. 990-1001, Jul. 2003.
- [2] D. Wiley, S. Parry, C. Alabaster, and E. Hughes,

- "Performance comparison of PRF schedules for medium PRF radar," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 42, no. 2, pp. 601-611, Apr. 2006.
- [3] C. M. Alabaster, E. J. Hughes, "The design of medium PRF radar schedules for optimum detectability in diverse clutter scenes," in *Proceedings of the 2006 International Waveform Diversity & Design Conference*, Lihue, HI, Jan. 2006.
- [4] G. W. Stimson, H. D. Griffiths, C. J. Baker, and D. Adamy, *Introduction to Airborne Radar*, 3rd ed. Raleigh, NC, SciTech, 2014.
- [5] P. G. Davies, E. J. Hughes, "Medium PRF set selection using evolutionary algorithms," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 38, no. 3, pp. 933-939, Jul. 2002.
- [6] K. Singh, S. Elayaperumal, and J. Senthil Rengarajan, "Track waveform selection based on target and clutter characteristics," in *Proceedings of the International Radar Symposium India 2013*, Bangalore, Dec. 2013, pp. 147-149.
- [7] T. H. Kim, E. H. Kim, and S. W. Lee, "Real-time PRF selection for search/track in MPRF waveform airborne radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 10, pp. 1050-1061, Oct. 2014.
- [8] J. M. Seo, E. H. Kim, J. E. Roh, and J. H. Lee, "PRF selection for tracking of MPRF (medium pulse repetition frequency) mode," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 9, pp. 733-739, Sep. 2017.
- [9] B. R. Mahafza, A. Elsherbeni, *MATLAB Simulations for Radar Systems Design*, New York, NY, Chapman & Hall/CRC, 2004.
- [10] I. Oh, "Flight test measures using FTB for the development of fighter avionics equipment," in *Proceedings of the Annual Conference of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Jeju, Jun. 2024. pp. 755-756.

박 연 희 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6399-663X>



2014년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)

2016년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)

2016년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] AESA 레이더 체계설계, 항

공기 레이더 시스템

노 지 은 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5156-9860>



2006년 2월: 포항공과대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)

2006년 2월~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] AESA 레이더 체계설계, 항공기 레이더 시스템

윤 지 환 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1661-4395>



2008년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)

2016년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)

2016년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] AESA 레이더 체계설계, 항

공기 레이더 시스템