

항공기 레이더의 근접 표적 추적 모드 신호처리 설계

Designing a Signal Processing Method for the Short-Range Target Tracking Mode of Airborne Radars

박 성 영

Sung Yeong Park

요 약

항공기 레이더는 기총 사격 지원을 위하여 수 백 미터의 최소 거리까지 표적을 정확히 추적해야 하는 임무를 갖는다. 한편, 표적이 수 km 이내로 근접하는 경우 글린트 오차가 각도 정확성에 미치는 영향성이 커지며, 표적의 기동이 커서 표적 탐지에 어려움이 있으므로 이를 위한 파형 및 신호처리 설계가 필요하다. 본 논문에서는 이러한 사항들을 고려하여 항공기 탑재 레이더에서 수 km 이내의 기동 표적을 탐지하는 모드의 신호처리 설계에 대한 내용을 다룬다. 제안한 설계는 CPI 길이에 대한 coherence 제한사항 및 주파수 기민성을 사용하는 다중 Burst에 기반하여 파형을 운용함으로써 글린트 오차의 영향성을 줄이는 방법을 포함한다. 제시한 방법을 기반으로 수송기 비행시험을 통해 검증한 결과 표적을 정확하게 탐지하는 결과를 보였으며, 다양한 가중합에 의한 글린트 오차 감소를 분석한 내용을 제시하였다.

Abstract

Airborne radars should track an enemy aircraft from maximum to minimum range very accurately to assist in immediate action. Meanwhile, when the target aircraft enters into very close range, such as a few kilometers, the effect of the glint on the angle measurement error increases. In this study, the design of signal processing and waveform consideration of short-range tracking mode of airborne radars is described. The proposed mode design includes the coherence limitation of the CPI and usage of multiple bursts to reduce the glint effect. The proposed method is verified via flight tests, and it is confirmed that the signal processing works accurately with a reduced angle measurement error.

Key words: Radar Signal Processing, Angular Glint, Radar Short Range Mode, Radar Waveform Consideration

I. 서 론

항공기 탑재 레이더는 주로 펄스 도플러 레이더로 설계되며, 공대공 및 공대지/해 표적 탐지/추적, 영상 형성, 지상 거리 측정 등의 다양한 임무를 가진다. 항공기 레이

더는 상황 인식을 위하여 수십~수백 km의 먼 거리의 표적을 탐지/추적함과 동시에 기총 사격 지원을 위하여 수백 미터~수 km 이내의 최소 거리까지 모노펄스 각도 추정을 기반으로 표적을 정확하게 추적하는 임무를 가진다. 원거리 표적의 추적 모드의 경우, 표적의 위치/속도를

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received May 03, 2021 ; Revised June 3, 2021 ; Accepted June 24, 2021. (ID No. 20210503-048)

· Corresponding Author: Sung Yeong Park (e-mail: psy@add.re.kr)

예측할 수 있다는 정보를 사용하여 MPRF(medium pulse repetition frequency) 또는 HPRF(high pulse repetition frequency) 기반의 단일 PRF 파형을 사용하는 것이 일반적이다. 이러한 경우, 레이더는 CI(coherent integration)를 이용하여 신호를 누적하고, 표적과 지면에 의한 반사 신호를 구분하기 위하여 거리 도플러 맵 상에서 탐지를 수행한다.

반면, 수백 미터 이내의 근거리 표적에 대한 탐지, 추적은 원거리 표적에 비해 몇 가지의 다른 특성을 갖는다. 첫 번째로, 레이더의 표적 위치 측정 시 글린트(Glint) 오차가 정확성에 미치는 영향성이 매우 커진다. 항공기 레이더는 주로 모노펄스 각도 측정을 통해 표적의 각도를 계산한다. 이 때 글린트 오차는 표적 내부의 여러 scatterer들의 반사 신호들이 서로 위상 간섭을 일으킴으로써 레이더의 표적 중심 측정 위치를 이동시킴에 따라 발생하는 오차이다^[1]. 레이더의 표적 측정 위치는 글린트 오차에 의해서 표적의 물리적 길이 이상으로 변화할 수 있다^[2]. 표적이 근접할 경우, 글린트 효과에 의한 각도 오차는 거리에 반비례하므로 글린트 오차가 각도 오차에 미치는 영향성이 상대적으로 잡음에 의한 측정오차보다 커진다. 따라서 이를 다른 모드와 같은 방식으로 처리할 경우, 글린트 오차에 의한 추적 필터 발산 등의 문제가 발생할 수 있으며, 추적 정확도 확보를 위하여 파형 설계 및 신호처리 측면에서 이를 해결하기 위한 설계가 필요하다.

두 번째로, 전투기 레이더가 근접한 표적을 추적하는 상태에서는 교전 상황일 가능성이 높기 때문에, 표적 및 자항공기의 기동이 심한 것이 일반적이다. 표적의 거리가 짧고 기동이 심할 경우 CPI(coherent processing interval) 내에 각도 변화가 유의미하게 발생하여 신호처리 결과에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 레이더 특성에 맞도록 이를 고려한 모드 설계가 이루어져야 한다.

이와 같은 전투기 레이더의 탐지/추적을 위한 MPRF, HPRF 기반 모드 설계에 대하여 참고문헌 [3]~[5]에서 다루었으나, 주로 장거리 표적의 탐지/추적을 위한 내용이며, 수 km 이내의 근거리 표적에 대해서는 다른 설계가 필요하다. 예를 들어, 기존 방법과 같이 단일 PRF를 사용하여 표적을 추적할 경우, Burst 별로 글린트 오차가 매우 큰 수준으로 발생하여 추적이 정상적으로 이뤄질 수 없다. 또한, 기존 설계에서는 CPI 내의 coherence 유지를 위

한 제한조건을 고려하지 않아 근거리의 표적 탐지/추적에 제한적인 성능을 발휘할 수 있다.

본 논문에서는 위와 같은 수 km 이내의 근접 교전에서 레이더 탐지/추적 특성을 고려한 모드 설계 내용에 대하여 기술한다. 근접 표적 추적을 위한 신호처리 방식을 기술하고, 각 단계별 처리 방법에 대하여 설명하였다. 또한 이를 위한 파형을 설계할 때 고려해야 할 사항으로써, CPI가 너무 길 경우 발생할 수 있는 문제점과 다중 Burst를 이용한 파형 운용 방법에 대하여 설명하였다. 제한한 방법은 비행시험을 통해 표적을 정상적으로 추적할 수 있음이 확인되었다.

본 논문의 차례는 다음과 같다. II장에서는 근거리 표적을 정확하게 탐지하기 위하여 글린트 오차 등의 표적 특성을 고려한 레이더 및 신호처리 설계, 파형 설계 고려 사항을 제시한다. III장에서는 본 모드의 성능을 검증하기 위한 시뮬레이션 및 수송기 탑재 비행시험 결과를 기술한다. IV장에서는 결론을 도출한다.

II. 근접 표적 추적 모드 설계

2-1 글린트 오차를 고려한 처리 절차 설계

글린트 오차는 표적의 전자파 반사 시 표적 내의 여러 scatterer들의 상호 위상 간섭으로 인하여 표적의 위치가 무작위적으로 변화하는 오차 성분이다. 참고문헌 [2]에 의하면 글린트 오차의 확률밀도함수는 표적의 형태에 따라 아래와 같은 student-t 분포에 의해 모델링될 수 있다.

$$dP_{\epsilon} = \frac{\mu}{2(1 + \mu^2 \epsilon^2)^{3/2}} \quad (1)$$

이 때 μ 는 중심으로부터의 scatterer의 밀집된 정도를 표현하는 값이고, ϵ 은 표적의 길이로 정규화된 오차값을 나타낸다. 이러한 student-t 분포는 간략화를 위하여 정규 분포로 근사화될 수 있고, 항공기 표적의 경우 표준 편차 σ_g 가 $L/6 \sim L/4$ 인 정규 분포로 근사화될 수 있다^[2]. 이는 전투기 길이 $L=20$ m로 가정할 경우, 3.33 m~5 m 수준의 표준편차를 갖는 위치 오차 성분이 발생할 수 있음을 나타낸다. 이러한 수준의 오차는 거리가 가까울 경우, 큰 수준의 각도 오차를 발생시킬 수 있다. 즉, 레이더의 글린트

효과에 의한 거리 및 각도 측정 오차 σ_{rg} , $\sigma_{\theta g}$ 는 각각 아래와 같은 수식에 의하여 모델링될 수 있다. 이 때, L_r 과 L_x 는 표적의 거리 방향 및 방향의 길이이고, k 는 4에서 6 사이의 상수이다.

$$\sigma_{rg} = \frac{L_r}{k}, \sigma_{\theta g} = \frac{L_x}{kR} \quad (2)$$

예를 들어 만약 전투기 표적의 경우, $L_x=20$ m, $k=4$, $R=200$ m를 가정할 경우, 글린트 효과에 의한 각도 측정 오차는 25 mrad 수준으로 발생한다. 이러한 오차를 그대로 수용할 경우 레이더 추적 필터가 발산하거나 표적 추적이 정상적으로 이루어지지 않을 수 있다.

참고문헌[1], [6], [7] 등에서 다루었듯이, 이러한 글린트 오차에 대처하기 위하여 레이더는 주파수 기민성(frequency agility)을 사용하여 측정 정확도를 개선할 수 있다. 레이더의 중심 주파수를 변경할 경우, 표적 내부의 scatterer간의 간섭 특성이 다르게 나타나기 때문이다. 주파수 기민성을 사용할 경우, 주파수 간의 간격은 scatterer간의 간섭이 충분히 변화할 수 있는 수준이어야 한다^[8]. 이 때 레이더는 탐지 성능 확보를 위하여 특성에 따라 NCI 혹은 CI를 사용하여 신호를 누적할 수 있는데, 이러한 신호 누적 방식에 따라서 주파수 운용 방법 및 신호처리 방법은 다르게 설계되어야 한다.

NCI를 사용할 경우, 펄스 간 주파수 기민성을 사용할 수 있기 때문에 글린트 오차 감소에 더욱 효과적이지만, 클러터와 표적을 분리할 수 없다는 단점이 존재한다. CI를 사용할 경우, 클러터와 표적을 분리할 수 있어 더욱 안정적인 표적 탐지가 가능하지만, Burst 간 주파수 기민성을 사용해야 하기 때문에 NCI에 비하여 주파수 변경 빈도가 낮고, CPI 내에서 표적 신호가 Coherence를 유지해야 한다는 조건이 필요하다. 본 논문에서는 CI를 사용하였으나, 근접 표적 추적 모드에서는 표적이 근접해 있으므로 클러터 신호보다 훨씬 강한 세기를 갖는다는 점에서 NCI를 기반으로 모드를 설계하는 것도 가능하다.

CI를 사용할 경우, 처리 과정은 그림 1과 같다. 이 때, 상술한 것과 같이 글린트 오차의 영향을 줄인 각도 값을 측정하기 위해서는 파형 설계 시 1개 Dwell내에 여러 개의 Burst를 구성해야 한다. 각 Burst는 한 CPI로써 여러 개

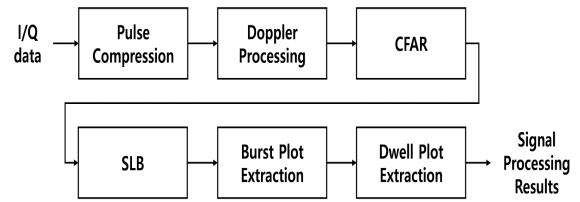


그림 1. 근접 표적 추적 모드 신호처리 순서도

Fig. 1. Signal processing block diagram.

의 펄스로 구성된다. Burst 별로 중심주파수를 변경하며, 여러 개 Burst의 각도 측정값으로부터 가중합을 구하여 글린트 오차의 영향을 최소화하는 최종 각도값을 측정한다. 이와 관계된 파형설계에 관해서는 2-2절에서 다룬다.

각도 측정에 있어서, 글린트 오차만을 고려할 경우 주파수 기민성의 주기에 따라 신호 세기가 가장 큰 CPI에서의 측정값 혹은 주파수 별 측정값의 가중평균을 사용할 수 있다^{[1], [6], [7]}. 가중치 함수로써는 평균, 신호 전력, 신호 전력의 제곱 등이 적용될 수 있다. 실제 레이더 측정치의 오차 성분으로는 잡음, 추정량(estimator)의 편향(bias), 글린트 오차, 빔 조향각 오차 등의 오차 성분들이 혼재되어 나타난다. 실제 측정된 데이터를 기반으로 다양한 가중치 함수에 의한 레이더 위치 측정 성능을 비교한 결과는 3-2절에서 다루었다.

그림 1에서 각 블록들에 대한 설명은 다음과 같다. 펄스 압축은 거리 해상도를 확보하고, SNR을 최대화시키기 위하여 정합 필터링을 수행하는 처리 과정이다^[4]. 근접 표적 추적 모드에서는 일반적으로 표적 거리가 짧고 단일 표적을 추적하며 교전을 수행하므로, 해상도를 높이기 위한 넓은 대역폭의 파형은 사용하지 않고, 최대한 짧은 거리까지 신호를 수신할 수 있도록 매우 짧은 펄스 폭을 사용하였다. 이후 도플러 처리에서 펄스 간의 FFT(fast fourier transform)를 사용하여 CI를 수행함으로써 펄스 전력을 누적하고 표적의 도플러 주파수 정보를 얻는다^[9].

CFAR(constant false alarm rate) 처리에서는 거리-도플러 방향의 2D CFAR로써 표적 신호의 위치를 탐지한다^[9]. SLB(sidelobe blanking) 처리에서는 CFAR 탐지를 통과한 거리-도플러 셀에서 안테나 Sum 채널과 Guard 채널과의 크기를 비교하여 Guard 채널의 크기가 더 큰 셀을 제거함으로써 빔 폭 외부의 탐지 성분을 제거한다^[8]. Plot 추출에

서는 **split gate** 알고리즘으로 거리를 추출하며^[4], 모노펄스 각도 측정을 통해서 빔 내의 각도를 측정하여 거리, 도플러 속도, 각도 성분 등이 포함된 **Burst Plot**을 생성한다^[8]. **Dwell Plot** 추출 단계에서는 **Burst**별로 측정된 **Plot**의 거리, 도플러를 기반으로 모호성을 제거하고, 표적의 최종 측정 각도를 추출한다. 모호성 제거를 위해서는 참고 문헌 [10]의 **Coincidence algorithm**을 사용하였다.

2-2 파형 설계 고려 사항

항공기 레이더의 추적 모드에서는 레이더가 추적 필터를 사용하여 표적의 위치 및 속도를 추정할 수 있기 때문에, 주엽 및 부엽 클러스터의 영향을 받지 않고 표적을 탐지할 수 있는 한 개의 **PRI**를 선택한 후, 측정치를 얻어 추적에 사용하는 것이 일반적이다.

반면, 본 논문의 근접 표적 추적 모드에서는 글린트 오차 감소를 위하여 1개 **Dwell**이 여러 개의 **Burst**로 구성되는 파형 구성을 가진다. 이에 따라 **CPI**마다 **PRI**를 다르게 설정하여 클러스터 및 재밍 신호로부터의 탐지 성능 저하 위험을 최소화하도록 하였다. 이는 일부 **CPI**에서 클러스터 혹은 재밍과 같은 간섭신호로부터 오탐지가 발생할 경우에도 여러 개의 **PRI**에서 얻은 탐지 정보로 모호성을 제거할 경우 해당 오탐지가 제거될 수 있기 때문이다. 이 때 추적 파형 선택에는 참고문헌 [11]의 방법과 같이 주엽, 부엽 클러스터의 상대속도 및 거리를 예측하여 표적 신호를 잘 탐지할 수 있는 최적의 1개 **PRI**를 선택한 후, $\pm t_j$ 를 **jittering**하여 총 4개의 **PRI**를 선택하도록 하였다. 즉, 예를 들어 표적과 자항공기의 기하를 고려한 최적의 **PRI**로 t_X 가 선택되었을 경우, $[t_X - t_j, t_X, t_X + t_j, t_X + 2t_j]$ 의 4개 **PRI**로 파형을 송수신하였다. t_j 는 레이더 시스템에 따라 결정되는 값으로, 본 논문에서는 **PRI**의 약 10 % 수준으로 설정하였다.

근접 표적 추적 모드에서 **CPI**의 길이가 길 경우 표적의 **scatterer** 간섭 특성이 변화하여 생기는 반사 신호의 크기 및 위상 변화로 인해 **CI** 처리 결과가 왜곡될 수 있다. 표적이 N 개의 **scatterer**를 가지고, 각 **scatterer**들의 **RCS**가 σ_i , 레이더로부터의 거리가 R_i 일 때, 표적 반사 신호는 아래 성분에 비례하여 나타난다^[12].

$$y(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{\sigma_i} e^{j2\pi f_c \left(t - \frac{2R_i}{c}\right)} \quad (3)$$

RCS σ 는 $|y|^2$ 에 비례한다. 수신 신호 크기 및 위상의 상대적인 변화값을 보기 위해 ζ 와 ϕ 를 아래와 같이 정의하였다^[12].

$$\zeta = |y|^2 = \left| \sum_{i=1}^N \sqrt{\sigma_i} e^{-j4\pi R_i/\lambda} \right|^2 \quad (4)$$

$$\phi = \angle(y(t)) \quad (5)$$

시뮬레이션을 위한 예시로 표적의 **scatterer** 모델링은 참고문헌 [13]의 **Rund** 모델링을 참조하였다. 표적의 **scatterer** 형상은 그림 2와 같다. 표적과의 거리가 멀 경우, 표적 내부의 **scatterer** 형상은 결과에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 점표적으로 가정이 가능하지만, 표적이 근접한 경우, 다중 **scatterer**의 특성이 상대적으로 크게 나타난다. 이 때 표적이 매우 근접한 상태에서 사선으로 비행하는 경우나 기동하는 경우 등과 같이 **aspect angle**이 급격하게 변화할 경우, **CPI**내에서 **scatterer**간 간섭 특성이 변화하여 **CI** 결과에 악영향을 미칠 수 있다. 본 논문에서는 **worst case** 중 하나로서 표적이 자항공기의 전방 500 m에서 45도의 **aspect angle**, 800 m/s의 속력으로 비행하는 경우 **coherent integration** 결과를 확인하였다. 최대 20 ms까지의 위상 및 크기 변화량을 확인하였으며, **CPI**가 5 ms, 10 ms, 20 ms의 세 가지 경우에 대하여 각각 **FFT** 결과를 확인하였다.

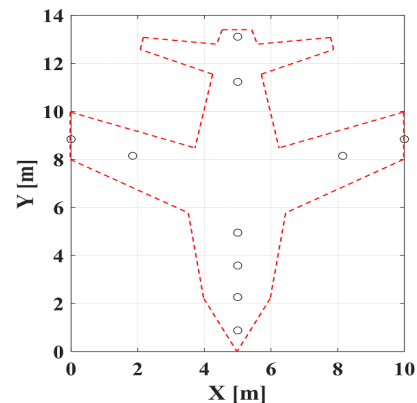


그림 2. 표적 scatterer 모델
Fig. 2. Target scatterer model.

Coherent integration 수행 시에는 Dolph-Chebyshev 80 dB window가 적용된 것을 가정하였다.

그림 3은 표적 기동 시 CPI 내의 기동으로 인한 RCS 및 위상 변화를 나타낸다. 최대 20 ms 내의 짧은 CPI를 시뮬레이션했음에도 불구하고, 근접 표적 추적 모드에서는 대상 표적의 시선거리가 짧고 속도가 빠르기 때문에 aspect angle이 비교적 많이 변화하여 수신 신호의 크기 및 위상 변화가 CI 결과에 영향을 미칠 정도로 발생한다. 그림 4는 이러한 환경에서 FFT를 통해 CI를 수행한 결과 주파수 응답이다. Ideal한 경우(점표적과 같이 Coherence가 유지될 경우) sidelobe가 window 효과에 의하여 -80 dB 수준까지 떨어진다. 반면, CPI가 길어지고 다중 scatterer의 효과가 반영될수록 CI에 의해 에너지가 특정 주파수에 모이지 않고 peak치 또한 표적 속도에 정확히 존재하지 않게 된다. 예시 시나리오에서는 CPI가 5 ms일 경우 sidelobe 수

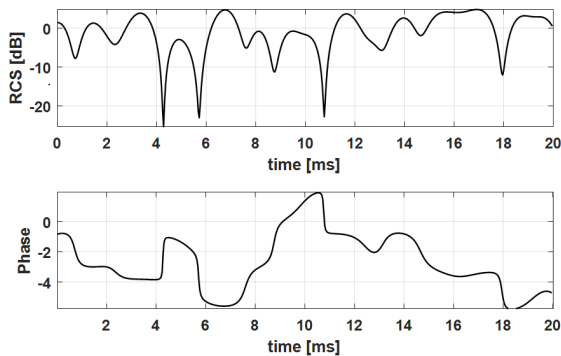


그림 3. CPI 내의 RCS/위상 변화
Fig. 3. RCS/phase change during CPI.

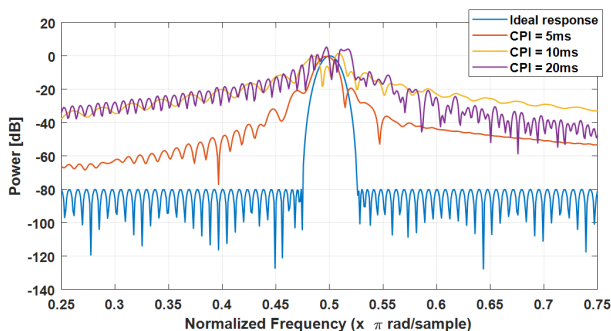


그림 4. Coherent integration (FFT) 결과 주파수 응답
Fig. 4. Frequency response after coherent integration.

준이 ideal response에 비해 높지만 peak가 정상적인 위치에 존재하기 때문에 탐지가 가능할 수 있으나, 10 ms, 20 ms일 경우, peak가 정상적으로 위치하지 않고 sidelobe 수준이 지나치게 높아 도플러 정보를 획득하기 어렵고 오탐지를 유발하는 등의 부작용이 발생할 수 있다. CPI는 레이더 시스템의 에너지 요구량에 따라서 결정되기 때문에, 레이더 시스템 별로 이와 같은 효과가 표적 추적에 영향을 미치지 않는 범위로 설계되어야 한다.

III. 시험 결과

3-1 시험 환경

본 논문에 제시된 항공기 레이더의 근접 표적 추적 모드 설계에 대한 시험은 수송기 탑재 비행시험 환경에서 수행되었다. 비행시험 개념도는 그림 5와 같다. 비행시험을 위해 수송기의 후방 램프도어에 레이더를 설치한다. 수송기가 이륙한 후 램프도어를 열고 후방으로 빔을 방사하였다. 표적으로는 전투기 표적을 사용하였고, 수송기 후방 먼 거리에서부터 수송기보다 빠른 속도로 접근하며 표적이 근접하였을 때 본 논문의 근접 표적 추적 모드를 수행하였다. 표적은 후방 약 600 m 지점까지 직선으로 비행한 후 수송기를 지나쳐 선회하였다.

3-2 수송기 탑재 시험 결과

본 논문에서 설계된 근접 표적 추적 모드에 기반하여 수송기 탑재 시험을 수행한 결과, 신호처리 단계별 결과는 그림 6과 같다. 결과 도시에는 비행 시험 중의 임의의 Burst를 선택하여 사용하였다. 그림에서 cell의 색이 노란색에 가까울수록 전력이 높은 값을 가지며, 파란색에 가까울수록 전력이 낮은 값을 갖는다.

그림 6(a)는 처리하기 전의 입력 데이터를 거리-펄스



그림 5. 수송기 탑재 비행시험 개념도
Fig. 5. Concept of flight test on a cargo aircraft.

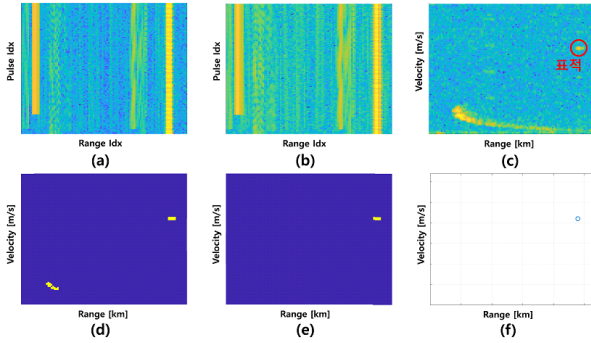


그림 6. 비행시험 데이터 기반 신호처리 단계별 결과
Fig. 6. Step-by-step result on flight test.

영역에서 도시한 것이다. 지표면에 의한 반사 신호는 매우 먼 거리에서부터 수신되기 때문에 거리 모호성으로 인하여 넓은 거리 영역에 클러터 신호가 존재한다. 또한 이 단계에서는 지표면 반사 신호와 표적 신호의 위치가 겹칠 경우 탐지 성능이 악화될 수 있다. 그림 6(b)는 입력 데이터를 펄스 압축 수행한 결과이다. 정합 필터링의 효과로 인해 그림 6(a)와 비교하여 SNR이 확보되고 일부 해상도가 개선되는 결과를 보인다. 그림 6(c)는 펄스 압축 결과를 도플러 처리한 결과이다. 거리 영역 전반에 퍼져있던 클러터 신호들이 표적 신호와 도플러 속도로 분리됨과 동시에 표적 신호들은 속도에 해당하는 도플러 cell에 integration 되어 높은 SNR을 얻게 된다. 표적 신호가 퍼지거나 peak가 왜곡되지 않고 정확한 속도 위치에서 integration이 수행되어 주변 잡음 신호에 비해 두드러지게 높은 전력을 갖는 결과를 보인다. 이는 2-2절에서 설명한 것과 같이 CPI가 Coherence에 악영향을 주지 않는 범위 내에서 설계된 결과이다. 클러터 신호 또한 CI의 결과로 큰 전력을 갖게 되지만, 클러터 신호는 플랫폼의 고도, 진행 속도 및 빔 조향각 등 알려진 기하에 의해 R-D map에 정해진 위치로 나타나기 때문에, 참고문헌 [11]과 같이 표적 신호와 분리되는 PRF를 선택하여 표적 신호를 안정적으로 탐지할 수 있다.

그림 6(d)는 도플러 처리된 R-D map에서 CFAR 탐지를 수행한 결과이다. 노란색으로 표시된 cell이 탐지에 통과한 cell이다. 표적 위치 및 일부 부엽 클러터 위치에서 탐지에 성공한 결과를 확인할 수 있다. 그림 6(e)는 SLB 처

리 결과이다. CFAR 결과에 존재하였던 일부 부엽 클러터에 의한 탐지 cell들은 해당 위치에서 Guard 채널의 안테나 이득이 더 크기 때문에 전력을 비교함으로써 제거되는 결과를 보인다. 그림 6(f)는 CFAR 및 SLB 탐지 결과를 기반으로 거리, 속도값을 추출한 결과를 보인다. 탐지 결과는 여러 개의 R-D cell로 구성되기 때문에 split gate 알고리즘^[4]을 이용하여 정확한 거리, 속도값을 계산하여 plot을 생성한다.

그림 6과 같은 신호처리를 각각 PRI가 다른 4개의 burst에서 수행한다. 만약 1개의 PRI를 사용했을 경우, 간섭 신호가 존재하는 환경이나 클러터 신호의 형상을 정확히 예측하지 못하는 등의 상황에서는 표적이 가려질 위험이 있다. 클러터 환경에서의 M&S 신호를 기반으로 4개의 CPI에서 표적 신호를 처리한 결과는 그림 7과 같다.

그림 7의 왼쪽 아래 경우와 같이 PRI가 이상적으로 선택되지 않을 경우, 클러터 신호의 masking에 의해 표적의 탐지 성능이 저하되거나, 오탐지 plot이 발생하는 등의 상황이 발생할 수 있다. 하지만 제안하는 방법과 같이 4개의 버스트에서 탐지를 수행하는 경우, 일부 PRI에서 탐지 성능 열화가 발생하더라도 확률적으로 4개의 PRI를 사용하기 때문에, PRI마다 표적의 거리-도플러 맵 상 클러터와의 상대적인 위치가 변화되어 masking 등에 의한 성능 열화를 방지할 수 있다. 이는 실제 레이더 운용 상황에서 재밍 신호와 같은 간섭신호가 존재하는 상황에서도 성능 열화를 방지한다.

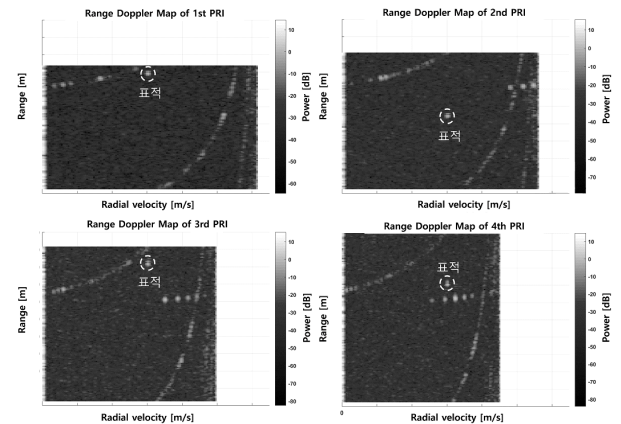


그림 7. 4 burst 거리-도플러 맵 (M&S)
Fig. 7. Range-Doppler map for 4 burst (M&S).

글린트 오차의 영향성을 확인하기 위하여 표적이 접근하는 동안의 모노펄스 각도(방위각) 측정값을 도시한 결과는 그림 8과 같다. 4개의 버스트로부터 측정된 각도 측정값을 각각 도시하였다.

그림 8로부터, II장에서 기술했던 근접 표적에 대한 측정값의 두 가지 특징을 확인할 수 있다. 첫 번째로, 표적과의 거리가 가까울수록 측정값 오차가 커진다는 것이다. 일반적으로는 잡음에 의한 오차는 신호 대 잡음비가 감소할수록 커지기 때문에 거리가 멀어질수록 측정값 오차가 커진다. 반면 그림 8에서는 거리가 가까울수록 측정값 오차가 커지므로, 글린트 오차에 의한 영향성이 지배적이라는 사실을 나타낸다. 두 번째로, 거의 동일한 시간에 연속으로 파형을 송수신했음에도 중심주파수가 다른 경우 오차가 독립적으로 발생한다는 것이다. 이는 주파수에 따라 표적기 내부의 scatterer들이 다르게 간섭을 일으킨 결과로 해석할 수 있다. 따라서 참고문헌 [6]과 같이 네 개의 Burst로부터 얻은 측정값을 사용해서 표적의 각도 정보를 더욱 정확하게 추정할 수 있다.

그림 9는 다양한 방법을 기반으로 4 Burst로부터의 각도 추정값을 종합한 결과를 보인다. Dwell 각도 측정값 θ_m 은 식 (6)과 같이 각 Burst의 각도 측정값 θ_i 의 가중합으로 계산되었으며, 표 1은 각도 추정값 종합에 사용된 가중치 함수 및 RMSE(Root Mean Square Error)를 나타낸다. 이 때 N 은 CPI의 개수(본 논문에서 $N=4$), A_i 는 i 번째 Burst의 신호 진폭, A_{\max} 는 Burst 측정값 중 최대 진폭, $w(\cdot)$ 는 가중치 함수를 나타낸다. 표 1의 RMSE 결과값은 글린트 오차에 의한 영향을 집중해서 확인하기 위해 근거리에서 해당하는 표적 거리 [600 m, 1,200 m] 구간에서

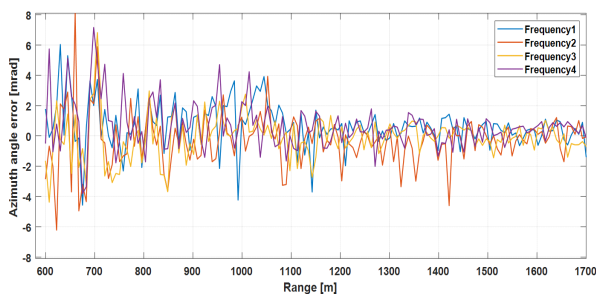


그림 8. 거리에 따른 각도(방위각) 측정값 오차
Fig. 8. Range vs azimuth angle measurement error.

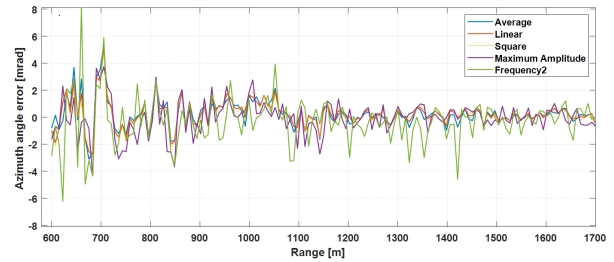


그림 9. 각도(방위각) 측정값 오차의 가중합 결과

Fig. 9. Azimuth measurement error for weighted summation of 4 measurements.

표 1. 가중치 함수 및 각도 측정 오차 RMSE 비교

Table 1. Weight functions and RMSE comparison.

Type	Weight	RMSE [mrad]
Average	$w(A_i) = 1$	1.255
Linear	$w(A_i) = A_i/A_{\max}$	1.204
Square-law	$w(A_i) = (A_i/A_{\max})^2$	1.214
Max. Amp.	$w(A_i) = \delta(A - A_{\max})$	1.496
Frequency #1	-	1.872
Frequency #2	-	2.042
Frequency #3	-	1.636
Frequency #4	-	1.977

계산하였다.

$$\theta_m = \frac{\sum_{i=1}^N w(A_i) \cdot \theta_i}{\sum_{i=1}^N w(A_i)} \quad (6)$$

그림 9에서 4개의 CPI에서 얻은 각도 측정값을 가중합한 결과와 함께 비교를 위하여 그림 8에서 주파수 #2를 사용한 경우(frequency2)의 각도 오차를 같이 도시하였다. 주파수 #2와 같이 특정 단일 주파수를 사용한 경우 측정값이 튀는 경우가 많고, 가중합을 한 경우, 각도가 더욱 안정적으로 0 근처의 오차를 가지며 측정되는 것을 확인할 수 있다.

표 1의 각도 측정 오차 RMSE 결과값을 확인하면, 개별 Burst에 의한 각도 측정 오차에 비하여 4개 Burst에서 얻은 측정값을 기반으로 가중합 계산 시 약 30~40 % 수준

의 RMSE 이득이 존재함을 확인할 수 있다. 이러한 RMSE 이득은 주파수 기민성을 이용한 주파수 개수에 따라서 증가하므로, 레이더 시스템의 정확도 요구량에 따라 주파수 개수를 설정하여야 한다.

참고문헌 [6]에 따르면 신호 반사 전력과 글린트 오차의 크기는 서로 음의 상관관계를 갖는다. 이에 따라 참고문헌 [6]의 시뮬레이션 환경 기반 가중치 함수 비교 결과에서는 최대 진폭 선택(Max. Amp.) 방식이 가장 정확한 측정치를 갖는 것을 보였다. 한편, 본 시험과 같은 실제 레이더 운용 상황에서는 글린트 오차뿐만 아니라, 잡음에 의한 오차 등이 포함되어 오차 성분을 구성하기 때문에 진폭 비례(linear) 혹은 전력 비례(square-law)로 가중치 함수를 구성하는 것이 가장 좋은 결과를 보였다. 다만 통계적으로 더욱 정확한 가중치 함수 비교를 위해서는 더 다양한 시나리오 및 측정치 오차 계산 결과로부터 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

IV. 결 론

본 논문에서는 항공기 탑재 레이더의 근접 표적 추적 모드의 신호처리 설계 고려사항에 대하여 기술하였다. 근거리 표적은 글린트 오차에 의한 영향성이 크게 나타나기 때문에, 이를 줄이기 위해 PRI가 서로 다른 다수의 CPI에서 얻은 측정값의 가중합을 이용하여 글린트 오차에 의한 영향성을 최소화 하는 방법을 사용하였다. 또한 근접 표적 추적 모드에서는 표적의 기동이 많고 거리가 가까워 CPI 내에 aspect angle이 변할 수 있으므로 파형설계시 이를 고려하여 CPI를 선정해야 함을 제시하였다. 비행시험으로 본 논문의 설계를 검증한 결과 Integration이 적절하게 수행되었고 가중합을 통해 글린트 오차에 의한 측정값 오차를 줄이는 결과를 확인하였다.

References

[1] R. H. Delano, "A theory of target glint or angular scintillation in radar tracking," *Proceedings of the IRE*, vol. 41, no. 12, pp. 1778-1784, Dec. 1953.
[2] D. K. Barton, *Radar System Analysis and Modeling*,

London, Artech House, 2004.
[3] L. L. Campbell, "Air-to-air radar modes for the CP-140 maritime patrol aircraft," M.S. thesis, Ottawa, ON, Carleton University, 1994.
[4] C. Alabaster, *Pulse Doppler Radar: Principles, Technology, Applications*, vol. 2, Edison, NJ, SciTech, 2012.
[5] T. H. Kim, S. H. Ryu, J. H. Shin, H. W. Jeon, S. H. Jang, and S. J. Kim, "Design of signal processing for target detection and tracking based on high pulse repetition frequency waveforms in airborne active electronically scanned array radars," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 12, pp. 951-963, Dec. 2019.
[6] J. M. Loomis, E. R. Graf, "Frequency-agility processing to reduce radar glint pointing error," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-10, no. 6, pp. 811-820, Nov. 1974.
[7] G. Lind, "Reduction of radar tracking errors with frequency agility," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-4, no. 3, pp. 410-416, May. 1968.
[8] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, New York, NY, McGraw-Hill, 2008.
[9] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, New York, NY, McGraw-Hill, 2014.
[10] E. J. Hughes, C. M. Alabaster, "Medium PRF radar PRF optimisation using evolutionary algorithms," in *Proceedings of the 2003 IEEE Radar Conference*, Jun. 2003, pp. 192-197.
[11] 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.
[12] M. A. Richards, J. Scheer, and W. A. Holm, *Principles of Modern Radar*, Raleigh, NC, SciTech, 2010.
[13] A. Wessling, *Radar Target Modelling Based on RCS Measurements*, Linköping, Linköping University, 2010.

박 성 영 [국방과학연구소/연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1510-2475>



2014년 2월: 한국과학기술원 전기및전자
공학부 (공학사)

2016년 2월: 한국과학기술원 전기및전자
공학부 (공학석사)

2016년 2월~현재: 국방과학연구소 연구
원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 항공기

레이더, 능동 위상 배열 레이더