

## 함정용 탐색 레이더를 이용한 대함포적 사격 시 2차 반사 신호 억제에 관한 연구

# A Study on the Suppression of Secondary Reflected Signals during Naval Gun Fire Using Naval Surveillance Radar

조인철 · 이충현 · 신재엽 · 문현욱 · 손성환\*

In-Cheol Cho · Choung-Hyun Lee · Jae-Yup Shin · Hyun-Wook Moon · Sung-Hwan Sohn\*

### 요 약

함정용 탐색 레이더는 표적의 거리, 방위, 고도를 추출해 3차원 항적 정보를 함정 전투체계에 전달하는 역할을 한다. 또한 안테나가 회전하면서 스캔하는 TWS(track while scan) 추적을 이용해 표적에 대한 고해상도 정보를 추출할 수 있다. 이 정보로 레이더 영상인 B-Scope를 획득할 수 있으며 함포사격에 사용된다. 하지만 지면, 연안의 섬이나 산 등의 2차 반사 신호에 의한 강한 클러터가 유입된다면 정상적인 B-Scope가 형성되지 않아 함포사격 시 물기등을 이용한 영점조절과 탄착 확인이 어려울 수 있다. 따라서 본 연구에서는 2차 반사 신호를 제거해 정상적인 B-Scope를 획득하기 위한 방안을 제시하고, 실제 해군에서 운용 중인 함정에 적용하여 검증하였다.

### Abstract

Ship radar systems extract the distance, bearing, and altitude of a target and deliver three-dimensional tracking information to the combat system of the ship. In addition, high-resolution information about the target and B-Scope can be obtained using TWS (track while scan) tracking, and the information is used for naval gun firing. However, the normal B-scope is not formed if strong clutter signals from secondary reflection signals from the ground, coastal islands, or mountains are introduced during tracking. In such cases, it could be difficult to adjust the zero point and check the impact using the water column when firing the artillery. Therefore, in this study, a method is proposed to acquire a normal B-Scope by removing the secondary reflected signal, and the proposed method is verified by applying it to the actual Navy ships.

Key words: B-Scope, TWS, 2<sup>nd</sup> Reflected Signal, Naval Surveillance Radar, PRI

### I. 서 론

함정용 탐색레이더를 이용한 대함 사격 시 탐색레이더는 사격통제 및 물기등 탐지를 위해 대함 비디오 영상을

형성하고, 이 형성된 비디오로부터 탐지된 표적 정보를 이용한 추적을 수행함으로써 함포사격을 지원한다. 이때 표적 신호와 동시에 수신되는 해상 클러터 신호 및 잡음 신호는 적 함정에 대한 표적 신호에 비해 훨씬 작기 때문

\*LIG 넥스원 레이더연구소(Radar R&D Lab, LIG NEX1)

· Manuscript received June 2, 2022 ; Revised October 16, 2022 ; Accepted February 13, 2023. (ID No. 20220602-051)

· Corresponding Author: In-Cheol Cho (e-mail: choinceol@lignex1.com)

에 표적 탐지/추적에 크게 영향을 미치지 않는다. 그러나 매우 큰 신호 세기를 갖는 육상 클러스터 신호가 표적 신호 근처에서 수신될 경우, 대함 비디오로부터 표적 중심 추출 시 표적이 아닌 클러스터 신호를 탐지함으로써 오탐(false alarm)이 발생하고, 탐지/추적 성능을 떨어뜨리게 된다.

보통의 경우, 적 함정은 바다 위에 있기 때문에 표적 신호 근처에서 육상 클러스터 신호가 수신되지 않지만, 그림 1과 같이 원거리에 있는 육상 클러스터 신호가 PRI(pulse repetition interval)에 따른 거리 방향 폴딩(folding)이 발생하여 표적 신호 근처에서 수신될 수 있으며, 이를 2차 반사 신호(2<sup>nd</sup> around echo)라고 한다. 이렇게 육상 클러스터에 의한 2차 반사 신호가 표적 신호 근처에서 수신될 경우, 탐지/추적 성능 저하가 발생하여 대함 사격 시 문제가 발생한다.

일반적으로 레이더에서 기동하는 표적을 탐지/추적할 때 수신되는 육상 클러스터 신호는 표적과 육상 클러스터의 속도 차를 이용한 MTI 필터 또는 도플러 필터를 통한 신호처리로 억제 가능하다<sup>[1]</sup>. 그러나 대함 사격 시 대함 비디오 형성 및 이를 통한 탐지/추적의 경우, 정지한 적 함정도 탐지/추적해야 하기 때문에 속도 차를 이용한 신호처리 기법 적용 시 표적도 삭제되어 적용이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 기존의 신호처리 기법<sup>[2],[3]</sup>을 통한 육상 클러스터 억제 방안을 적용하는 대신 파형의 PRI를 증가시킴으로써 SCR(signal to clutter ratio)을 증가시켜 2차 반사 신호로 수신되는 육상 클러스터에 의한 문제를 해결하였다.

이를 위해 II장에서 대함 사격 시 대함 비디오 형성 및 탐지/추적 과정과 SCR 증가를 위한 PRI 선정 방법에 대

해 설명하고, III장에서는 실 해상 시험을 통해 본 논문에서 제안한 방안에 따른 성능 개선 효과에 대해 검증하였다. 본 논문에서 제시한 방안은 원거리에 큰 클러스터가 존재하고, 정지한 표적도 탐지해야 하는 드론 탐지레이더 및 함정용 탐색레이더의 일부 모드에 대한 파형 설계 시 적용함으로써, 신호처리를 통해 클러스터 억제가 불가능한 상황에서 탐지/추적 성능을 확보하는 데 활용될 수 있다.

## II. 2차 반사 신호 억제 방안

본 장에서는 대함 사격 시 대함 비디오 형성 및 탐지/추적 과정과 본 논문에서 제안한 2차 반사 신호 억제 방안에 대해 설명한다.

### 2-1 대함 비디오 형성 및 탐지/추적

함정용 탐색레이더는 안테나가 회전하면서 스캔한 탐지 정보를 통해 TWS(track-while-scan) 추적을 수행하고, 표적 정보를 함정의 전투체계로 전달한다. 전투체계에서는 이 표적 정보를 운용 콘솔의 지도상에 전시하게 되며, 대함전 발생 시 운용자는 전시된 표적 중 대상 표적을 지정하고 대함 비디오 영상 및 탐지/추적 기능을 셋팅한다. 이에 따라 함정용 탐색레이더는 그림 2와 같이 지정된 표적을 중심으로 특정 영역에 대해 방위각 및 거리에 따른 수신 신호의 크기를 전시하는 B-scope 형태로 대함 비디오 영상을 형성하여 전투체계에 전달해 전시한다. 또한, 이렇게 형성된 대함 비디오에서 표적 주변 잡음 신호의 영향을 최소화하기 위해 특정 임계치를 초과한 수신 신호를 가지고 hitmap을 생성한다. 이렇게 생성된 hitmap에

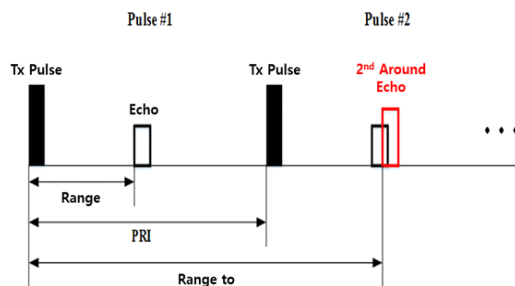


그림 1. 2차 반사 신호  
Fig. 1. 2<sup>nd</sup> around echo.

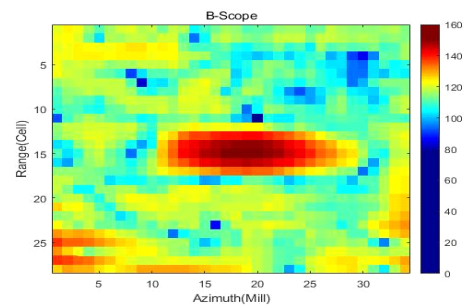


그림 2. B-scope 형태의 대함 비디오 영상  
Fig. 2. The video image for anti-ship as B-scope.

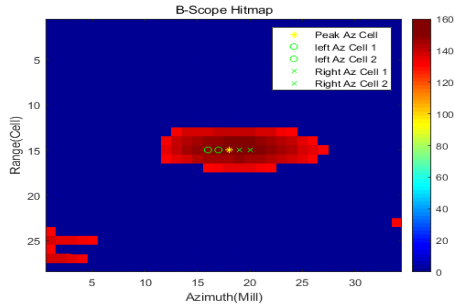


그림 3. B-scope hitmap에서 표적 중심 추출  
Fig. 3. Extraction of the target center from B-scope hitmap.

서 수신 전력이 가장 큰 위치를 찾은 후 방위각 기준 좌우 2셀, 거리 기준 상하 2셀에 있는 신호가 표적 신호로 유효할 경우 이 위치를 표적 중심으로 탐지하게 되며, 이 탐지 정보를 이용해서 추적을 수행하게 된다(그림 3).

## 2-2 2차 반사 신호에 의한 탐지/추적 성능 저하

앞서 설명한 바와 같이 대함 사격 시 대함 비디오 형성 및 탐지/추적 과정을 통해 적 함정에 대한 사격을 지원할 때, 원거리에 있는 육상 클러터 신호가 2차 반사 신호로 유입되면 탐지/추적 성능이 저하된다. 그림 4는 2차 반사 신호가 유입되는 발생 상황을 나타내고, 그림 5는 이때 수신되는 raw 데이터를 나타낸다. 그림 4에서 PRI에 의한 거리 폴딩이 30 km에서 발생한다고 가정할 때, 표적은 15 km, 육상 클러터는 45 km에 있다면, 육상 클러터 신호는 거리 축에서 폴딩되어 표적과 동일한 15 km 부근에서 수신되게 된다. 그림 5는 2차 반사 신호가 유입될 때, 안테나가 회전하면서 방위각별 실제 수신 raw 데이터를 보여주며, 가로축은 송신 펄스를 나타내고, 이는 안테나가 회전하면서 방위각별 수신 데이터가 되며, 세로축은 각 수

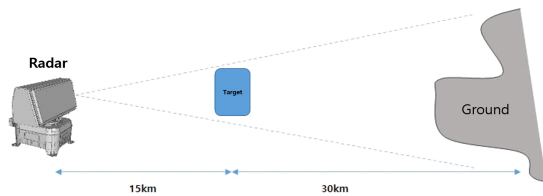


그림 4. 2차 반사 신호 발생 상황  
Fig. 4. The condition for 2<sup>nd</sup> around echo signal.

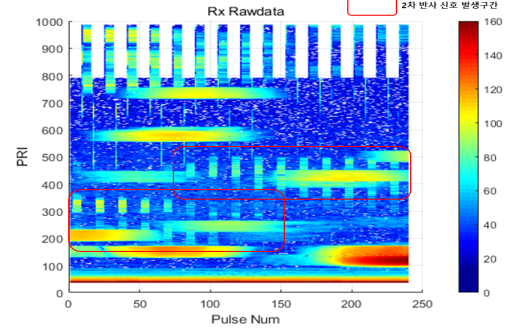


그림 5. 2차 반사 신호가 존재하는 수신 raw 데이터  
Fig. 5. The received raw data when 2<sup>nd</sup> around echo signal exists.

신데이터의 거리 셀을 나타낸다. 이때 송신 펄스의 PRI를 번갈아가면서 송신함에 따라 표적 신호는 방위각 방향으로 동일 거리 셀에서 나타나는 반면, 육상 클러터는 PRI에 따라 폴딩되어 수신되는 거리가 달라짐에 따라 클러터 신호가 방위각별로 동일 거리 셀에 존재하지 않는 특성을 보인다.

그림 6 및 그림 7은 2차 반사 신호가 유입된 대함 비디오 형성 결과 및 hitmap 생성 결과를 보여준다. 그림 6에서 보면, 대함 비디오에서 표적과 2차 반사 신호가 겹쳐서 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이는 그림 7의 hitmap에서도 동일하다. 이렇게 표적과 원거리의 육상 클러터 신호가 특정 영역 내에 동시에 수신되고 SCR이 0 dB보다 작다면, 그림 7에서 보듯이 표적 중심 추출 시 최대 전력 위치가 실 표적이 아닌 육상 클러터에 위치하게

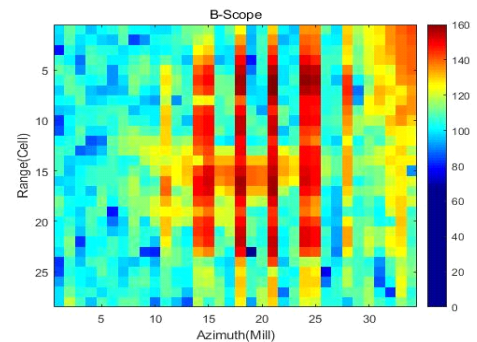


그림 6. 2차 반사 신호 유입 시 대함 비디오 영상  
Fig. 6. The video image for anti-ship when 2<sup>nd</sup> echo signal is inserted.

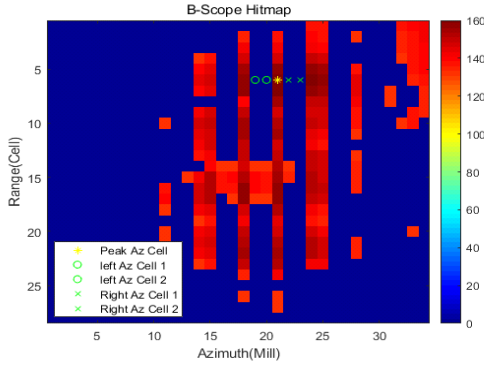


그림 7. 2차 반사 신호 유입 시 표적 중심 추출  
Fig. 7. Extraction of the target center when 2<sup>nd</sup> echo signal is inserted.

된다.

또한, 그림 5처럼 PRI를 교차로 사용할 경우, 방위각 별 육상 클러스터 신호의 거리가 달라져서 방위각 기준 좌우 2셀의 유효성 체크 시 유효하지 않아 미탐지가 발생하여 추적에서 메모리 트랙이 발생하게 되고, 메모리 추적 3회 발생 시 표적을 소실했다고 판단한다. 동일 PRI를 사용할 경우, 탐지는 되지만 클러스터 중심을 표적 중심으로 추출하게 되어, 추적 시 트랙 정보의 오차가 발생하여 탐지/추적 성능이 저하되게 된다.

### 2-3 PRI 선정

원거리에 있는 육상 클러스터에 의한 2차 반사 신호가 유입될 경우 SCR이 0 dB 이상이라면 표적 신호를 탐지하기 때문에 큰 문제가 발생하지 않지만, SCR이 0 dB 이하라면 클러스터를 표적으로 인식하여 미탐지되거나 탐지되더라도 오탐이 되어 탐지/추적 성능이 저하된다. 반면에 일반적으로 레이더에서 기동하는 표적을 탐지/추적할 때 육상 클러스터 신호를 억제하기 위해 속도 차를 이용한 MTI 필터 또는 도플러 필터를 이용한 신호처리 기법을 적용할 수 있지만, 정지한 적 함정도 탐지/추적해야 하는 대함 사격 시 이러한 신호처리 기법을 적용하면 표적도 삭제되기 때문에 적용이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 MTI 필터 또는 도플러 필터 등의 신호처리 기법 적용 대신 PRI를 증가시킨 long PRI를 적용하여 SCR을 개선함으로써, 오탐 확률을 줄이고 탐지/추적 성능을 확보하는 방

안을 제시하고, SCR 개선을 위한 PRI 선정 근거에 대해 설명한다.

지면, 숲, 해상과 같은 2D 산란면을 갖는 클러스터에 대한 SCR은 레이더 공식에 의한 표적 신호의 세기 및 클러스터 신호의 세기 비로 나타나며, 식 (1) 및 식 (2)는 각각 표적과 클러스터에 대한 수신 신호 세기 식을 나타내고, 식 (3)은 이에 의한 SCR을 나타낸다<sup>[4]</sup>.

$$P_{r,target} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_{target}^4 L_s L_a(R_{target})} \quad (1)$$

$$P_{r,dutter} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \phi_3 \theta_3 \sigma^0}{(4\pi)^3 R_{dutter}^2 L_s L_a(R_{dutter}) \sin \delta} \quad (2)$$

$$SCR = \frac{P_{r,target}}{P_{r,dutter}} = \frac{R_{dutter}^2 L_a(R_{dutter}) \sigma \sin \delta}{R_{target}^4 L_a(R_{target}) \phi_3 \theta_3 \sigma^0} \quad (3)$$

여기서  $P_t$ 는 송신 전력,  $G$ 는 안테나 이득,  $\lambda$ 는 파장,  $\sigma$ 는 표적 RCS,  $\sigma^0$  클러스터 반사율(reflectivity),  $L_s$ 는 시스템 손실,  $L_a(R)$ 는 거리  $R$ 에 따른 대기 손실,  $\phi_3$ 는 고각 방향 3 dB 빔폭,  $\theta_3$ 는 방위각 방향 3 dB 빔폭,  $\delta$ 는 지표각(grazing angle)을 나타낸다.

위 식 (3)을 통해 합정용 탐색레이더에서의 SCR을 계산하기 위해 고려한 파라미터를 표 1로 나타냈다. 지표각은 지형 클러스터와의 관계각으로 90°일 때 최소 SCR을 가지므로 이를 고려하였고, 표적 RCS는 소형 선박도 대함전 시 탐지/추적이 가능해야 하므로 이를 고려하여 소형 선박 RCS의 중간값인 6.5 m<sup>2</sup>로 설정하였다<sup>[4]</sup>. X-대역 대기 손실값으로 0.028 dB/km를 적용하였다<sup>[5]</sup>. 클러스터 반사율은 원거리 육상 클러스터가 대부분 낮은 섬 등으로 이루어져 있어 낮은 지형 및 숲에 대한 반사율로 -34 dB를 고려하였다<sup>[6]</sup>. 또한 최대 전시 거리가 30 km인 점을 고려하여 표적 거리 모의는 1~30 km로 설정하였으며, 클러스터 거리는 최소 PRI를 고려하여 표적 거리에 PRI에 의한 폴딩 거리를 더해 설정하였다.

마지막으로 레이더의 최대 전시 거리는 30 km이지만 대함전 시 아군 함정에서 주로 사용하는 함포인 76 mm 함포의 최대 사격 거리는 16.3 km이다<sup>[7]</sup>. 따라서 SCR 계산에 대한 기준 거리는 16.3 km로 설정하였다.

그림 8은 최소 PRI를 기준으로 0.5배 단위로 증가시켰

표 1. SCR 계산을 위한 레이더 시스템 파라미터  
Table 1. The parameters of radar system for calculation of SCR.

Radar system parameter	Value	Note
Freq	X	
Max display range	30 km	
Min PRI	185 usec	Folding range 27.75 km
3 dB BW elevation	3°	
3 dB BW Azimuth	1.8°	
Target RCS	6.5 m <sup>2</sup>	
Clutter reflect ratio	-34 dB	
Atmospheric loss	0.028 dB/km	
Target range	1~30 km	
Ground angle	90°	

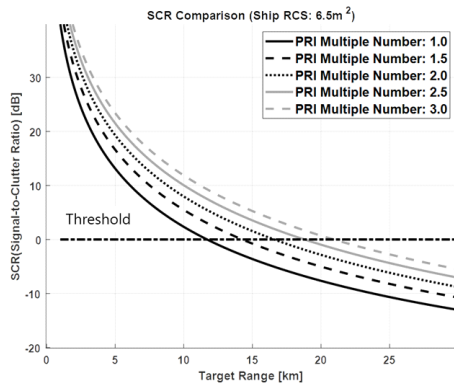


그림 8. PRI 및 표적 거리에 따른 SCR  
Fig. 8. The SCR according to the PRI and the target range.

을 때 표적 거리에 따른 SCR 추이를 나타낸다. 이 결과에서처럼 PRI를 증가시켜가면서 SCR>임계치(0 dB)가 되는 거리를 확인하였으며, 그림 9는 PRI를 0.1배 단위로 증가 시킴에 따라 SCR이 임계치보다 높은 최대 거리를 도식한 그림이다. 앞서 설명한 바와 같이 함포 최대 사격 거리가 16.3 km이므로 이를 기준으로 할 경우 PRI를 2배로 설정했을 때 육상 클러터에 의한 오탐 및 탐지/추적 성능 저하를 방지할 수 있음을 확인할 수 있다.

### III. 검증 시험

본 논문에서 제안한 2차 반사 신호 억제 방안에 대해

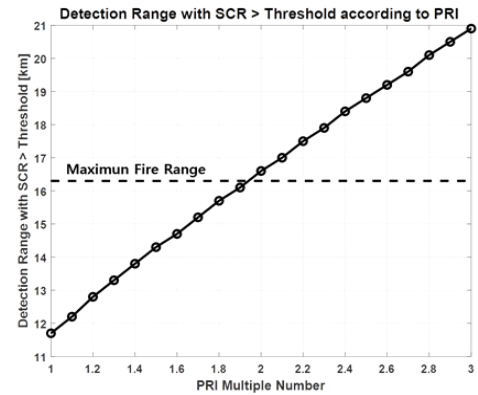


그림 9. PRI에 따른 SCR>임계치인 탐지 거리  
Fig. 9. The detection range with SCR>threshold (0 dB) according to the PRI.

검증하기 위해 그림 10과 같이 시험 시나리오를 설정하였다. 함정용 탐색레이다가 탑재된 자함으로부터 육지는 약 40 km 거리에 바라보도록 하며, PRI에 의한 폴딩 거리를 고려하여 표적은 약 9.5 km 거리에서 남서쪽에서 북동쪽까지의 위치를 왕복하도록 하였다. 이때 북동쪽에서 남서쪽으로 이동할 때는 기존 PRI를 적용하였고, 남서쪽에서 북동쪽으로 이동할 때는 본 논문에서 제안한 long PRI(기존 PRI의 2배)를 적용하였다.

그림 11 및 그림 12는 제안한 2차 신호 억제 방안에 대한 검증 시험 결과를 나타낸다. 그림 11은 기존 PRI 및 long PRI 적용 시 대함 비디오 영상을 나타내며, 기존 PRI 적용 시에는 표적 근처에 클러터가 유입되는 것을 확인

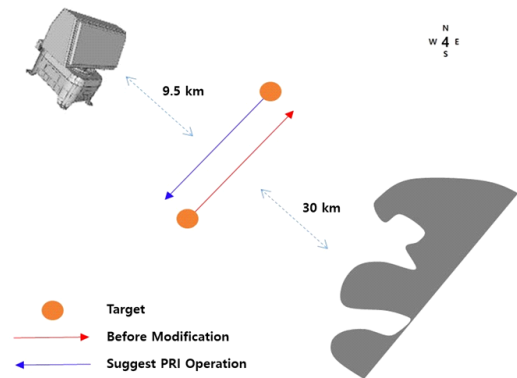
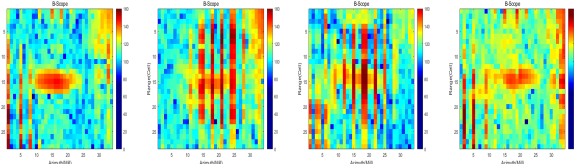
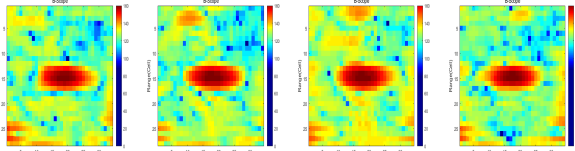


그림 10. 검증 시험 시나리오  
Fig. 10. The scenario for verification of the proposed method.





(a) 기존 PRI 적용 시 대함 비디오 영상  
(a) Before modification B-Scope



(b) Long PRI 적용 시 대함 비디오 영상  
(b) Suggest PRI operation B-Scope

그림 11. 기존 PRI 및 long PRI 적용 시 대함 비디오 영상 비교

Fig. 11. The comparison of anti-ship video between the conventional PRI and the long PRI.

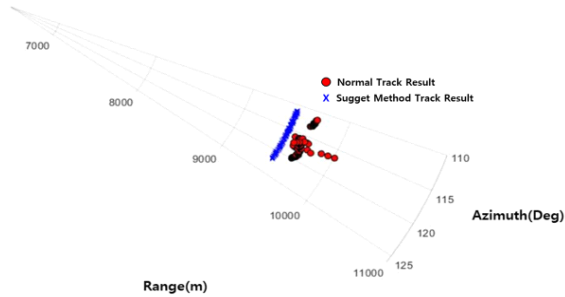


그림 12. 기존 PRI 및 long PRI 적용 시 추적 결과 비교

Fig. 12. The comparison of tracking between the conventional PRI and the long PRI.

할 수 있으며, long PRI 적용 시에는 클러터 없이 표적 영상이 선명하게 나타남을 확인할 수 있다.

그림 12는 기존 PRI 및 long PRI 적용에 따른 추적 결과로 기존 PRI 적용 시 미탐지 및 오탐으로 인해 트랙이 제대로 형성되지 않은 반면, long PRI 적용 시 미탐지 및 오탐 없이 트랙이 형성됨을 확인할 수 있다.

표 2는 육상 클러터에 의한 2차 반사 신호 유입으로 미탐지가 발생하여 메모리 추적 발생 빈도를 나타낸 표로 기존 PRI 적용 시 35.4 %의 미탐지가 발생했으며, long PRI 적용 시 0 % 미탐지로 탐지/추적 성능이 확연히 증가

표 2. 메모리 추적 발생 빈도 비교

Table 2. The comparison of memory track occurrence rate.

Category	Scan count	Memory track count	Ratio
Normal PRI	141	50	35.4 %
Long PRI	141	0	0 %

함을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

표적 탐지 시 다양한 원인으로 클러터 신호가 유입되게 된다. 특히 대함 표적 추적 시 후방에 존재하는 지면 클러터로 인한 2차 반사 신호는 B-Scope 이미지 생성에 영향을 줄 수 있으며, 이는 메모리 추적이 발생하는 주요 원인이 된다. 2차 반사 신호를 억제하기 위해 SCR을 고려한 PRI를 선정하는 방법으로 long PRI를 제안했다. 펄스 개수가 감소하는 대신 기존 PRI를 2배 증가시켜 2차 반사 신호가 폴딩되어 수신되는 부작용을 해결했다. 펄스 개수가 감소했지만 메모리 추적 발생빈도가 감소하였으며, 이는 함정의 생존성 향상과 연결될 수 있다. long PRI를 이용해 2차 반사 신호를 억제할 수 있지만, long PRI보다 더 먼 거리에서 들어오는 3차 반사 신호 억제를 위해 더 긴 PRI를 사용할 경우, 제한된 프레임 타임을 벗어나 탐지 영역을 소실할 수 있는 문제가 발생한다. 프레임 타임을 만족시키기 위해 펄스 수를 더 제한적으로 사용하면 탐지 정확도가 저하될 수 있다.

#### References

- [1] J. G. Kim, H. S. Jang, "A study on optimizing the clutter rejection capability for a high-speed scanning MTI-pulse radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 10, pp. 1077-1083, Sep. 2009.
- [2] H. Rohling, "Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-19, no. 4, pp. 608-621, Jul. 1983.
- [3] G. Trunk, S. Brockett, "Range and velocity ambiguity resolution," in *The Record of the 1993 IEEE National*

*Radar Conference*, Lynnfield, MA, Apr. 1993, pp. 146-149.

[4] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, New York, NY, McGraw-Hill, pp. 53-85, 2005.

[5] P. D. L. Williams, H. D. Cramp, and K. Curtis, "Experimental study of the radar cross-section of maritime targets," *IEE Journal on Electronic Circuits and Systems*, vol. 2, no. 4, pp. 121-136, Jul. 1978.

[6] C. A. Darrah, D. W. Luke, "Site-specific modeling using DMA digital terrain elevation data(DTED), digital feature analysis data(DFAD), and Lincoln laboratory five frequency clutter amplitude data," in *Proceedings of the 1996 IEEE National Radar Conference*, Ann Arbor, MI, May 1996, pp. 178-183.

[7] Hyundai WIA, "76 mm gunnery." Available: [https://www.hyundai-wia.com/business/defense\\_maritime\\_02.asp](https://www.hyundai-wia.com/business/defense_maritime_02.asp)

조 인 철 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1940-4761>



2015년 2월: 서원대학교 컴퓨터교육과 (공학사)

2017년 2월: 인하대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)

2017년 1월~현재: LIG넥스원 레이더연구소 선임연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더

통제

문 현 옥 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1298-2895>



2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)

2007년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)

2016년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)

2014년 3월~현재: LIG 넥스원 레이더연

구소 수석연구원

[주 관심분야] 레이더 성능분석, 전파전파, 무선채널 모델링

이 충 현 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0008-5803-7718>



2012년 8월: 경북대학교 전자공학부 (공학사)

2012년 7월~현재: LIG넥스원 C4ISTAR 생산기술실 레이더기술팀 선임연구원

[주 관심분야] RF, 레이더 신호처리

손 성 환 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-9401-7182>



2004년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)

2006년 2월: 인하대학교 정보통신대학 (공학석사)

2010년 8월: 인하대학교 정보통신대학 (공학박사)

2011년 1월~현재: LIG 넥스원 레이더연

구소 수석연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 통제, 레이더 성능분석

신 재 엽 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7562-7576>



2011년 8월: 영남대학교 전자공학부 (공학사)

2011년 6월~현재: LIG넥스원 C4ISTAR 생산기술실 레이더기술팀 선임연구원

[주 관심분야] RF, RF Power Amplifier, EMC 등