

폭우 기상클러터 오픈롯 제거 알고리즘

Algorithm for Removing False Plots in Heavy Weather Clutter

박 종 철¹ · 서 영 광² · 박 지 원^{3*}Jong-Chul Park¹ · Young-Kwang Seo² · Ji-Won Park^{3*}

요 약

본 논문에서는 저고도 항공기 탐지 레이더가 폭우가 내리는 기상환경에서도 안정적으로 운용될 수 있도록 하는 기상 클러터 오픈롯 제거 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 기상클러터에 의해 수신신호가 포화되는 것을 탐지하고, 기상클러터의 시선속도를 추정하여, 수신신호 포화 시 오픈롯이 발생할 속도 범위를 계산한 후, 해당 오픈롯을 제거한다. 제안된 알고리즘을 실제 레이더에 적용하여 폭우가 내리는 기상환경에서 기상클러터 오픈롯을 효과적으로 제거한 결과를 제시한다.

Abstract

In this paper, we propose an algorithm to remove false plots in the weather clutter for a low-altitude aircraft detection radar in heavy rain conditions. The proposed algorithm detected the signal being saturated by the weather clutter and removed the false plot after estimating the radial velocity of the weather clutter and calculating the range of speed of the false plot when the receiving signal was saturated. The proposed algorithm presented the result of the effectively removed false plots in the weather clutter for a real radar in heavy rain circumstances.

Key words: Pulse Train, Weather Clutter, Ground Radar, False Plot

I. 서 론

저고도 항공기 탐지 및 추적 레이더는 기상 및 지상클러터가 존재하는 환경에서도 표적을 탐지 및 추적하기 위해서 거리 및 속도 분해능이 좋은 PT(pulse train) 파형을 사용한다^[1]. PT 파형 사용 시, 시선속도 0 m/s인 클러터의 속도축 null to null 주엽폭은 송신 주파수와 처리 시간(processing time)에 반비례한다. 수신신호가 포화되지 않는 환경에서 클러터 오픈롯의 속도는 클러터의 속도

주엽폭보다 작으며, 해당 속도의 오픈롯은 제거된다^[2]. 본 논문에서는 이 방법을 ZDR(zero Doppler rejection)이라 하며, 클러터의 속도축 주엽폭도 ZDR로 명시한다.

폭우가 내리는 환경에서 수신신호 포화 시, 속도 축에서 높은 파워의 부엽이 다수 발생하고 해당 부엽이 오픈롯이 된다^[3]. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 폭우가 내리는 환경에서 PT 파형 사용 시, 속도축 첫 번째 부엽까지 발생한 오픈롯을 제거한다. 제안한 알고리즘은 기상 클러터에 의해 수신신호가 포화되는 것을 탐지하고, 기상

한화시스템 (Hanwha Systems)

* 국방과학연구소 (Agency for Defense Development)

1: 선임연구원(<https://orcid.org/0009-0009-5655-7688>), 2: 전문연구원(<https://orcid.org/0000-0001-5340-2562>),

3: 선임연구원(<https://orcid.org/0009-0006-6232-9436>)

· Manuscript received November 17, 2023 ; Revised November 27, 2023 ; Accepted December 19, 2023. (ID No. 20231117-098)

· Corresponding Author: Young-Kwang Seo (e-mail: iloverey3153@hanwha.com)

클러터의 시선속도를 추정하여, 수신신호 포화 시 속도축 첫 번째 부엽이 발생한 속도를 계산한 후, 해당 속도 범위의 오프로트를 제거한다. 해당 속도범위와 오프로트를 제거하는 알고리즘은 VDR(variable Doppler rejection)이라 한다. 제안된 알고리즘은 그림 1과 같이 CFAR(constant false alarm rate) 탐지 이후에 적용된다. 그림 2는 제안된 알고리즘의 순서도이며, 4단계로 구성된다. ZDR과 VDR로 기상클러터 오프로트가 제거되는 속도 범위를 비교하면 그림 3과 같다.

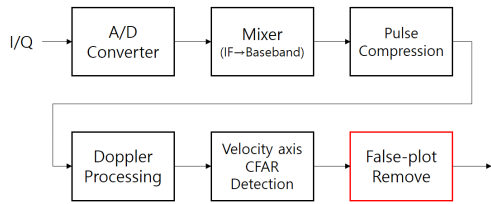


그림 1. 레이다 시스템의 순서도
Fig. 1. Flow chart of radar system.

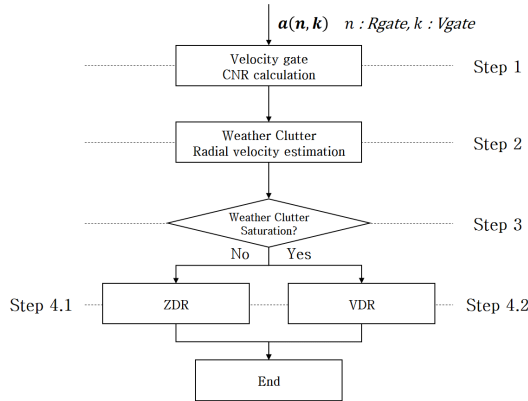


그림 2. 기상클러터 대응 알고리즘 순서도
Fig. 2. Flow chart of anti-weather clutter algorithm.

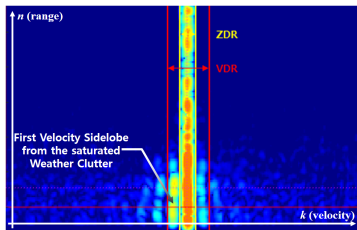


그림 3. ZDR과 VDR의 오프로트 제거 영역 비교
Fig. 3. False-plot rejection region of ZDR and VDR.

- Step 1. 기상클러터 clutter to noise ratio(CNR) 계산
- Step 2. 기상클러터 시선속도 추정
- Step 3. 기상클러터 포화 판단
- Step 4.1. 기상클러터 미포화 시, ZDR 적용
- Step 4.2. 기상클러터 포화 시, VDR 적용

II. 기상클러터 대응 알고리즘

2-1 속도 게이트별 평균 CNR 계산

PT 파형에 대한 펄스압축 및 도플러 처리 결과인 $a(n, k)$ 를 활용하여 속도 게이트별(k) 평균 CNR $\psi(k)$ 는 식 (1)과 같이 계산한다.

$$\psi(k) = \frac{1}{\sigma^2 N_r} \sum_{n=0}^{N_r-1} a^2(n, k) \quad (1)$$

여기서, n 은 거리 게이트, N_r 는 거리 게이트의 개수, 그리고 σ^2 은 사전에 측정된 배경 잡음의 파워이다.

2-2 기상클러터의 시선속도 추정

$\psi(k)$ 의 최대값이 발생한 off-grid 속도 게이트 k_c 를 추정하여 기상클러터의 시선속도를 그림 4와 같이 계산하며, 이를 정리하면 식 (2)~식 (4)와 같다.

$$dk = \frac{\psi(k_0 + 1) - \psi(k_0 - 1)}{-2\psi(k_0 - 1) + 4\psi(k_0) - 2\psi(k_0 + 1)} \quad (2)$$

$$k_c = k_0 + dk. \quad (3)$$

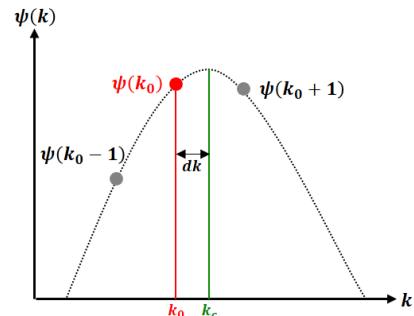


그림 4. Off-grid 속도 게이트 k_c 추정
Fig. 4. Estimation for off-grid velocity gate k_c .

$$v_c = 0.5\lambda \frac{f_{PRF}}{N_{FFT}} (k_c - 0.5N_{FFT}). \quad (4)$$

여기서, k_0 은 $\psi(k)$ 의 최댓값이 발생한 on-grid 속도 게이트, λ 는 파장, v_c 는 기상클러터의 시선속도, f_{PRF} 는 PRF(pulse repetition frequency), 그리고 N_{FFT} 는 PT 파형의 도플러 처리 시 적용된 FFT(fast Fourier transform) 사이즈이다.

2.3 기상클러터의 포화 판단

$\psi(k)$ 와 ADC(analog to digital converter)의 동적 범위 γ 를 활용한 기상클러터의 포화 판단 조건은 식 (5)와 같다.

$$\psi(k_0) > \gamma - \rho. \quad (5)$$

여기서, ρ 는 기상클러터 신호 크기의 변화폭을 의미하며, 본 논문에서는 5 dB로 설정하고, 동적 범위 γ 보다 5 dB 작은 값보다 큰 값을 수신하면, 기상클러터 수신신호가 포화된 것으로 판단한다.

2.4 기상클러터 오프로트 제거

기상클러터에서 발생한 오프로트를 제거하는 속도 범위는 다음과 같다. 식 (6)은 기상클러터 미포화 시 사용되며, 식 (7)은 기상클러터 포화 시 사용된다. 식 (6) 및 식 (7)의 범위를 비교한 예시는 그림 3에서 확인할 수 있다.

$$0.5N_{FFT} - \Delta_{ZDR} \leq k_p \leq 0.5N_{FFT} + \Delta_{ZDR}. \quad (6)$$

$$0.5N_{FFT} - \Delta_{VDR} \leq k_p \leq 0.5N_{FFT} + \Delta_{VDR}. \quad (7)$$

$$\Delta_{VDR} = \Delta_{ZDR} + 3|k_c - 0.5N_{FFT}| + 1.5. \quad (8)$$

여기서, k_p 는 탐지된 플롯의 off-grid 속도 게이트, Δ_{ZDR} 은 PT 사용 시 클러터의 속도축 peak to null 속도 게이트 범위이다. 기상클러터 포화 시 속도축 첫 번째 부엽의 속도 게이트는 기상클러터 시선속도의 약 3배이며, 식 (3)의 추정값으로 식 (8)의 Δ_{VDR} 값을 계산하였다.

III. 실측 시험 결과

본 장에서는 레이다에 기상클러터 오프로트 제거 알고리

표 1. 시험 조건

Table 1. Test condition.

Variable	Value and description
Surveillance area	135°~225°
Frequency band	S
Waveform	Pulse train
Test date	2023.06.01. - Sky clear, 2023.06.29. - Heavy rain.

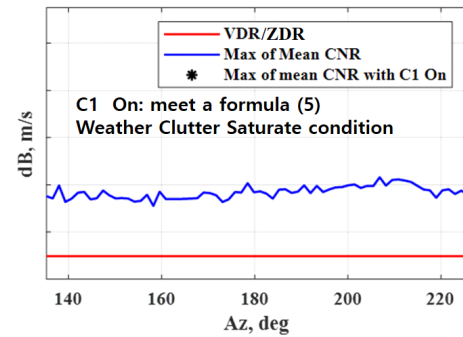


그림 5. (2023.06.01.) CNR 및 ZDR/VDR 범위

Fig. 5. (2023.06.01.) CNR and ZDR/VDR.

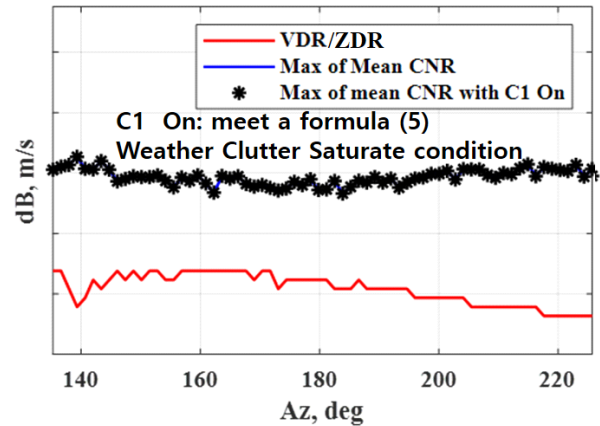


그림 6. (2023.06.29.) CNR 및 ZDR/VDR 범위

Fig. 6. (2023.06.29.) CNR and ZDR/VDR.

즘을 적용한 결과를 소개한다. 맑은 날씨와 폭우가 쏟아지는 날씨에서 시험한 결과를 소개한다.

그림 5 ~ 그림 8은 맑은 날씨와 폭우의 환경에서 수신 신호를 저장하여 분석한 시험 결과이다. 그림 7은 맑은 날씨에서의 Max of Mean CNR 값과 VDR/ZDR의 범위를

IV. 결 론

본 논문에서는 강우 환경에서 기상클러터에 의한 레이더의 성능 저하를 개선하기 위해 기상클러터 포화로 발생하는 오프셋 제거 방법을 제안하였다. 먼저, 기상클러터 환경에서의 CNR 값 계산과 기상클러터의 포화 판단 조건을 설명하고, 시선속도 추정을 통해 도플러 제거 영역을 넓히는 알고리즘을 제안하였다. 그리고 레이더에 제안하는 알고리즘을 적용하여 빔방사 후 수신신호를 저장하여 결과를 분석하였다. 분석결과 포화 기상클러터에 의해 발생한 오프셋을 제거하기 위한 방안으로 오프셋 제거영역을 고정하는 ZDR은 포화 기상클러터로 인해 부엽으로 확산된 오프셋들을 제거하지 못하였다. 하지만 본 논문에서 제안한 VDR은 도플러 제거 영역을 가변하여 약 90개 정도의 오프셋이 추가로 제거됨을 확인하였다. 오타지 플롯들을 제거함으로써 실효적의 탐지 기회는 늘어나 포화 기상클러터의 대응으로써 효과적으로 판단된다.

알고리즘 성능개선을 위해 기상클러터 환경에서 더 많은 시험을 통한 데이터 축적과 분석을 하여 적절한 임계치를 설정하고, 축적한 데이터를 기반으로 VDR 적용 범위를 조절하면, 더 향상된 성능의 기상클러터 탐지와 대응 방안이 될 것으로 기대된다.

References

- [1] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar System*, New York, NY, McGraw Hill, 2001.
- [2] T. H. Kim, J. W. Yi, and Y. J. Byun, "The surface sidelobe clutter and the false alarm probability of target detection for the HPRF waveform of the microwave seeker," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 34, no. 4, pp. 478-483, Apr. 2009.
- [3] C. Alabaster, *Pulse Doppler Radar: Principles, Technology, Application*, Edison, NJ, Scitech, 2012.

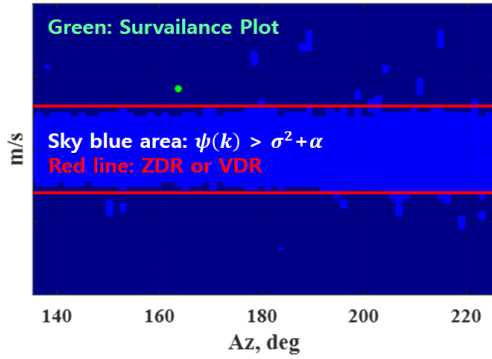


그림 7. (2023.06.01.) ZDR or VDR 범위
Fig. 7. (2023.06.01.) Region of ZDR or VDR.

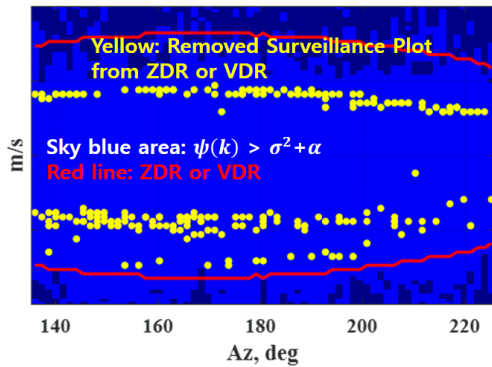


그림 8. (2023.06.29.) ZDR or VDR 범위
Fig. 8. (2023.06.29.) Region of ZDR or VDR.

보여주고 있다. 맑은 날씨에서는 CNR 값이 대체적으로 낮게 분포되어 기상클러터 포화 조건을 만족하지 못하였고, 그에 따라 ZDR을 적용하여 오프셋 제거를 수행하였다. 수행한 결과는 그림 7과 같다.

그림 6은 강우 환경에서의 결과로 그림 5와 비교해 보면 Max of mean CNR 값이 상대적으로 높게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. 그래서 앞서 언급한 기상클러터의 포화 판단조건 식 (5)를 만족하였고, 기상클러터에 의해 수신신호가 포화된 것으로 판단하여 식 (7)을 적용하여 탐지된 오프셋을 제거하였다. 그림 8은 VDR을 적용해서 오프셋을 제거한 결과이다. ZDR을 적용했을 때보다 도플러 제거 영역이 늘어났고, 늘어난 영역에 포함된 오프셋이 제거되었다.