

레이더 영상의 엔트로피를 이용한 표적의 폭발 추정 방법

구 창 우*

Method of Estimating Target Explosion using Entropy of Radar Image

Chang-Woo Gu*

요 약

최근 전술 환경이 다변화하고, 방위산업 기술들이 발달함에 따라 표적들의 기동 속도가 빨라지면서, 재교전을 위해서 표적이 명중하여 파괴되었는지 여부를 확인하는 것은 중요한 이슈가 되었다. 기존에는 레이더의 A-scope의 영상으로 표적의 폭발 유무를 사용자가 육안으로 직접 판단했으나, 신뢰도가 떨어지고 정량적인 근거가 없다는 한계가 있었다. 본 논문에서는 표적의 폭발상황과 비 폭발상황을 묘사한 레이더 수신신호를 생성하여 형성한 거리-도플러 레이더 영상의 엔트로피를 계산하여 비교하였으며, 이를 통해 표적의 폭발을 추정하는 새로운 방법을 제안한다. 제안하는 해석 방법은 단순히 육안에 의존한 영상으로 확인하는 이전 방법보다 보다 정확하고, 정량적으로 표적의 폭발 유무를 추정하는 지표로 활용 될 수 있다.

Abstract

Recently, as the tactical environment has been diversified and defense industry technologies have been developed, highly maneuvering targets have been emerged, and it has become important to acquire information of the target more quickly using radar. In addition, as the maneuvering speed of the targets increased, it became an important issue to check whether the target was hit and destroyed for re-engagement. In the past, the user directly judged the presence or absence of an explosion with the eye using the radar's A-scope image, but there was a limitation in that the reliability was low and there was no quantitative basis. In this paper, calculated and compared the entropy of range-doppler radar images formed by generating radar signals depicting the explosion and non-explosion conditions of the target, and proposes a new method for estimating the explosion of the target. The proposed analysis method can be used as an index for estimating the presence or absence of an explosion of a target more accurately and quantitatively than the previous method that simply confirms the image based on the eye.

Keywords

radar, kill assessment, entropy, signal processing

* 국방과학연구소 연구원
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8238-3126>

• Received: Apr. 14, 2022, Revised: May 11, 2022, Accepted: May 14, 2022
• Corresponding Author: Chang-Woo Gu
Agency for Defense Development, Yuseong P.O.Box 35, Daejeon 34186 Korea,
Tel.: +82-55-540-6719, Email: guchangwoo@add.re.kr

1. 서 론

레이더에 의한 표적의 탐지와 추적은 현대 전장에서 아군의 자원을 보호하고, 적군의 원점을 찾아내기 위한 핵심요소이다[1]. 레이더 기술은 산란원을 이용하여 표적을 식별하는 방법과 거리측면도를 이용하여 표적을 탐지하는 방법, 미세 도플러를 이용한 식별 방법 등 여러 탐지 추적 및 식별 연구가 활발하다[2]-[5]. 이와 더불어 기동 표적들의 속도가 빨라지면서 전장에서는 재교전을 위해서 표적이 명중하여 파괴되었는가를 판단하는 폭발 추정이 매우 중요해졌다[6]. 하지만 기존 레이더를 이용한 식별 연구는 표적의 유형을 확인하는데 초점이 맞춰져 있어 폭발 여부를 추정하는데 적합하지 않았다.

본 논문에서는 레이더 영상의 엔트로피를 이용하여 표적의 폭발 유무를 추정하는 기법을 제안하였다. 실제로 표적을 폭발시켜 시험을 하는 것은 비용과 안전성 측면에서 한계가 있으므로, 시뮬레이션 소프트웨어를 이용하여 다기능위상배열레이더의 수신 신호를 모델링 하였으며, 적군이 다가올 때, 아군이 사출탄을 발사한 상황을 가정하여 레이더 영상을 출력하고, 폭발 시나리오와 비폭발 시나리오로 나누어 영상의 엔트로피 값을 실시간으로 계산하여 두 시나리오의 결과를 분석하였다. 2장에서는 레이더 표적의 반사정도를 나타내는 RCS(Radar Cross Section)모델링, 레이더 수신신호 모델링과 이 신호를 이용한 거리-도플러 영상 형성 방법과 엔트로피의 계산방법에 대하여 서술하였다. 3장에서는 폭발 시나리오와 비폭발 시나리오를 가정하여 레이더 영상의 엔트로피를 비교 분석하였다. 마지막 4장에서는 결론을 기술하고 본 연구의 의의와 한계점에 대하여 기술한다.

II. 신호 모델링 및 신호처리

2.1 RCS 모델링

일반적인 전장 환경을 고려하였을 때, 아군을 향해 날아오는 표적은 저피탐 형상으로 낮은 RCS 값을 갖는다. 하지만 사출탄에 명중되어 폭발하는 경우 여러 파편으로 나누어지면서 저피탐 형상이 틀

어지게 되며, 레이더에서는 다수의 표적으로 인식된다. 신호 모델링을 위하여 아군측에서 사출탄이 날아가며, 폭발 시나리오에서는 표적이 폭발하면서 RCS 값이 커지면서 다수의 산란원이 임의의 속도로 생성되는 상황을 가정하였으며, 비폭발 시나리오에서는 단일 산란원이 일정한 속도로 기동하는 상황을 가정하였다. 표적 신호를 생성하기 위하여 사출탄과 표적의 RCS 값을 확률적으로 모델링한 스월링 모델(Swerling Model)을 적용하였다[7].

$$P(\sigma) = \frac{1}{\sigma_{ave}} \exp\left(\frac{-\sigma}{\sigma_{ave}}\right) \quad (1)$$

$$P(\sigma) = \frac{1}{(\sigma_{ave})^2} \exp\left(\frac{-2\sigma}{\sigma_{ave}}\right) \quad (2)$$

그림 1은 스월링 모델을 나타낸 것으로 식 (1)과 같이 다수의 산란원의 균일한 분포를 가진 경우와 식 (2)와 같이 중앙에 우월 산란원이 존재하고 주변에 작은 산란원이 존재하는 경우로 나누어 근사 모델을 나눌 수 있다[8]. 식 (1)과 (2)를 이용하여 표적과 사출탄의 RCS값을 계산하여 수신신호의 진폭을 도출하였으며, σ_{ave} 는 표적의 평균 RCS 값이다.

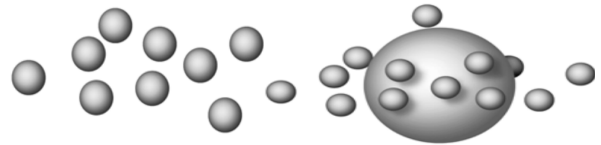


그림 1. 스월링 모델
Fig. 1. Swerling model

2.2 레이더 수신신호 모델링

표적의 수신신호를 모델링하기 위하여, 일반적으로 사용되는 Pulsed Radar에서 SNR(Signal to Noise Ratio)향상을 시키기 위해 사용되는 주파수변조기법인 LFM(Linear Frequency Modulation)을 사용하였다.

$$s(t) = A_0 \exp\left[j2\pi(f_0 - BW/2)t + \frac{K}{2}t^2\right] \quad (3)$$

식 (3)은 선형주파수 변조 기법중 시간에 따라 주파수가 증가하는 형태를 표현한 식이며, A_0 는 레이

더의 진폭, f_0 는 중심주파수 BW 는 대역폭, K 는 주파수 변조비율을 나타내게된다.

$$s(t) = \sqrt{P} \text{rect}(t - t_d) e^{(j2\beta(t-t_d) + j\pi \frac{c}{T_p}(t-t_d)^2)} \quad (4)$$

$$t_d = t + \frac{2R}{c} \quad (5)$$

표적에 반사되어 수신된 신호의 위상은 레이더와 표적의 거리 R 에 따라 수신된 시간 지연을 t_d 라하면 식 (4)와 같이 표현된다. $\text{rect}(t)$ 는 T_p 의 펄스폭을 갖는 펄스펄스 신호를 의미하며, c 는 광속, 레이더 신호의 P 는 수신전력이다. 시간지연 t_d 는 식 (5)와 같다.

2.3 거리-도플러 영상 형성 및 엔트로피 계산

표적에 반사되어 레이더에 수신된 신호를 신호처리 과정을 거쳐서 거리-도플러 영상으로 만들 수 있다. 수신된 신호의 기저대역 변환 및 정합 필터링을 수행한 후, 고속 푸리에변환(FFT)를 수행하여 거리-도플러 영상을 형성할 수 있으며 일반적으로 사용되는 엔트로피 계산식을 이용하면 정량적인 값으로 영상의 무질서함을 표현할 수 있다. $I(m,n)$ 을 거리-도플러 영상의 (m,n) 픽셀에서의 크기를 나타내며, m 과 n 은 각각 형성된 영상에서의 거리축 인덱스와 도플러 축 인덱스를 나타낸다. 이때 영상

의 엔트로피 E 는 아래 식 (6)과 같이 정의된다.

$$E = - \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I(m,n) \ln I(m,n) \quad (6)$$

III. 시뮬레이션 및 분석결과

3.1 시뮬레이션 파라미터 설정

본 논문에서 제안한 방법을 시뮬레이션 소프트웨어로 실험하기 표적과 사출탄의 시작거리를 각각 100km와 99.2km로 설정하여 3.5초 후에 표적과 사출탄이 만나도록 시뮬레이션 파라미터를 설정하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters

Center frequency	3 [GHz]
Bandwidth	10 [MHz]
PulseReptition interval	20 [μs]
Target speed	120 [m/s]
Projectile speed	120 [m/s]
Target initial range	100 [km]
Projectile initial range	99.2 [km]

3.2 시뮬레이션

그림 2는 시뮬레이션 초기 수신 신호를 거리-도플러 영상으로 만든 후 도플러를 식 (7)에 의해 속도로 변환한 영상이다.

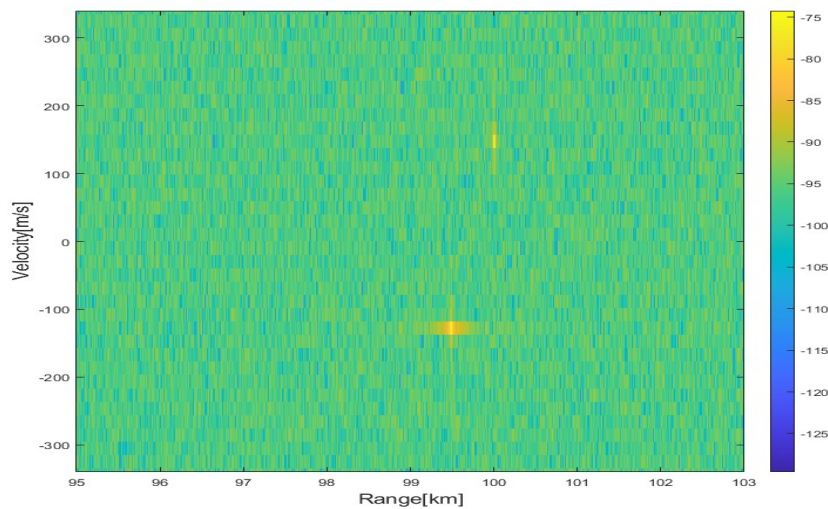


그림 2. 거리-속도 영상
Fig. 2. Range-velocity map

표적은 In-bound 상태로 120m/s로 기동하므로 상단의 노란 점과 같은 신호로 표현되고 있으며, 하단의 노란점으로 표현되는 신호는 Out-bound로 기동하는 사출탄이다.

$$v = f_d \frac{\lambda}{2} \tag{7}$$

식 (7)에서 f_d 는 도플러 주파수, 중심주파수의 λ 는 파장이다. 시뮬레이션 데이터는 거리-속도 축으로 변환하여 정리하였다. 또한, 시간에 따라 0.1초 간격으로 영상의 엔트로피를 계산하여 그래프에 도시하였다.

그림 3은 표적과 사출탄이 만나 폭발하였을 때의 레이더 수신신호를 신호처리한 거리-속도 영상과 엔트로피 계산값이다. 표적과 사출탄이 만나 폭발하면서 파편이 생기며 기존에 1.5×10^{-4} 수준을 유지하던 영상의 엔트로피 값이 3.5초를 기준으로

2×10^{-4} 수준으로 영상의 무질서도 값이 상승했음을 확인 할 수 있다.

그림 4는 표적과 사출탄이 만나 폭발하지 않았을 때의 레이더 수신신호를 신호처리한 거리-속도 영상과 엔트로피 계산값이다. 표적과 사출탄이 만나지 않아 엔트로피 값이 3.5초 이후에도 엔트로피의 변화 없이 꾸준히 값이 유지되는 모습을 확인할 수 있다.

3.3 시뮬레이션 결과 분석

제안한 방법을 토대로 영상의 엔트로피 계산 결과를 확인해보면, 표적의 폭발 유무를 확인하기 위하여 사출탄과 표적의 충돌 예상 시간인 3.5초 TOF(Time of Flight)를 전후로 표적 폭발시에 영상의 무질서도를 의미하는 엔트로피 값이 크게 요동치는 모습을 확인할 수 있으며, 비 폭발 시에는 폭발 이전과 같은 엔트로피 값을 확인할 수 있었다.

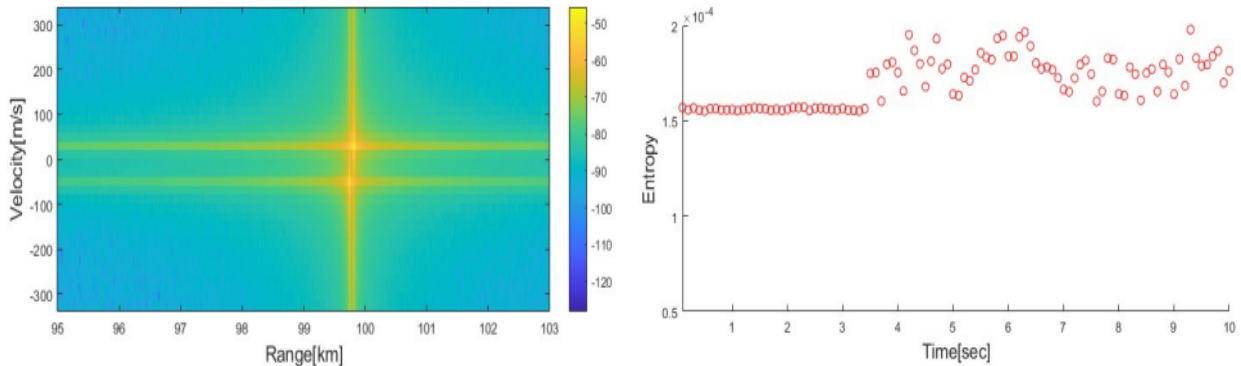


그림 3. 표적 명중 후 폭발 시뮬레이션
Fig. 3. Target explosion simulation

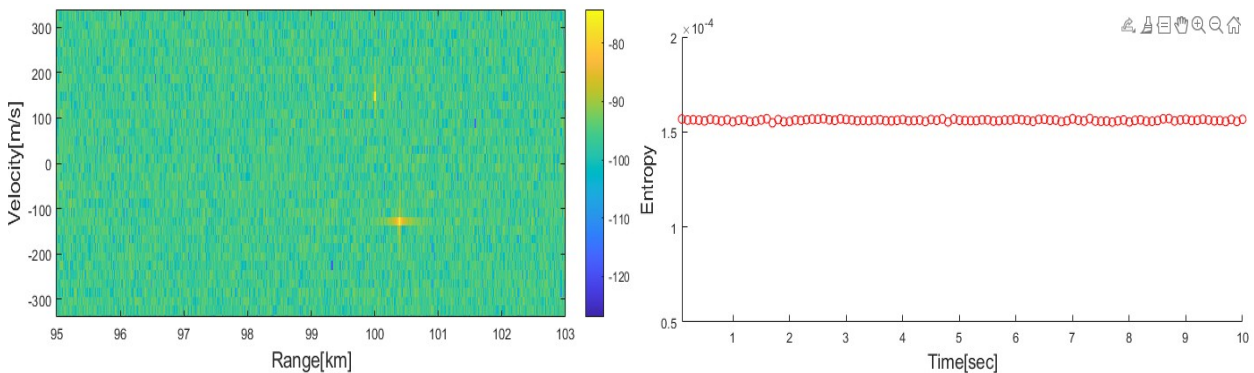


그림 4. 표적 명중 후 비 폭발 시뮬레이션
Fig. 4. Target not explosion simulation

IV. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 레이더 영상의 엔트로피를 활용하여 표적의 폭발 유무를 추정하는 방법을 제안하였다. 이를 위해 레이더의 수신 신호를 모델링하고, 표적의 폭발상황과 비폭발 상황을 가정하여 시뮬레이션하여 레이더 영상을 형성한 후 영상의 엔트로피를 계산하여 비교 분석 하였다. 표적 폭발 시뮬레이션에서 비 폭발시 1.5×10^{-4} , 표적이 폭발하는 경우 2×10^{-4} 수준으로 영상의 엔트로피 값이 상승했음을 확인 할 수 있다.

본 논문에서는 기존에 사람의 육안으로만 의존했던 표적의 폭발 유무를, 레이더 영상의 엔트로피를 이용하여 표적의 폭발 추정 여부를 정량적으로 분석하여 해석 시도했다는 점에서 연구에 의의가 있다고 할 수 있다. 하지만 단순한 송신빔과 수신빔을 이용하여 생성한 레이더 영상으로 엔트로피를 계산했고, 폭발하는 표적에 대한 RCS 변화모델의 신뢰도와 표적의 폭발 여부를 판단하기 위한 최적의 빔 패턴과 파형 설계가 적용되지 않았다는 점에서 한계가 있다. 추후 연구에서 폭발 표적의 물리적인 모델의 RCS 분석과 표적 폭발을 판단하기 위한 빔/파형 설계에 대한 분석이 추가적으로 이루어 진다면 보다 신뢰도 높게 폭발 추정을 판단 하는 지표로 엔트로피가 활용 될 수 있을 것이다.

References

[1] B. Edde, "Radar principles, Technology, applications", NJ: Prentice Hall, 1993.
 [2] C. Alabaster, "Pulse Doppler Radar - Principles, Technology, Applications", NJ : Scitech Publishing, 2012.
 [3] S. J. Lee and I. S. Choi, "Performance Analysis on Radar Target Classification for Waveform Structure, Resonance Frequencies and Three Feature Vector Fusions", Journal of KIIT, Vol. 16, No. 7, pp. 35-41, Jul. 2018.
 [4] V. C. Chen, F. Li, S. Ho, and H. Wechsler, "Micro-Doppler effect in radar: Phenomenon,

model, and simulation study", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 42, no. 1, pp. 2-21, Jan. 2006.

[5] A. R. Persico, C. Clemente, D. Gaglione, C. V. Ilioudis, J. Cao, and L. Pallotta, et al., "On model, algorithms, and experiment for micro-Doppler-based recognition of ballistic targets", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic
 [6] Tae-Il Suh and Eui-Jin Kim, "Development of Gun Fire Control System for the FFX-I Program", Journal of the KIMST, Vol. 16, No. 6, pp. 752-761, Dec. 2013.
 [7] Skolink, "Introduction to Radar System", McGraw-Hill, 2001.
 [8] B. Mahafza, "Radar Systems and Design using MATLAB", Champman & Hall/CRC Press LLC, Jan. 2000.

저자소개

구 창 우 (Chang-Woo Gu)



2016년 8월 : 충남대학교
 전파공학과(공학사)
 2018년 8월 : 포항공과대학교
 전자전기공학과(공학석사)
 2019년 3월 ~ 현재 :
 국방과학연구소 연구원
 관심분야 : 레이더, 레이더

신호처리, RF/초고주파 시스템