

Multi-Moving Average Filter 기반 저피탐 레이더 신호 검출

정석현, 윤재혁*, 남해운*

한양대학교 에리카, 한양대학교*

{jshyun0905, serp82, hnam}@hanyang.ac.kr

Low Probability of Intercept Radar Signal Detection Using Multi-Moving Average Filter

Sukhyun Jung, Jaehyeok Yoon, Haewoon Nam

Hanyang Univ.

요약

전자전(Electronic Warfare, EW) 기술의 발전에 있어 저피탐(Low Probability of Intercept, LPI) 레이더 신호를 검출하는 것은 필수적인 요소이다. 따라서 본 논문은 Simple Moving Average(SMA) 필터를 이용하여 필터 내의 전력을 측정함으로써 미확인된 저피탐 레이더 신호를 검출하는 방법을 제안하고자 한다. 임계값 설정의 정확도를 높이기 위해 기존 SMA 필터의 연산 방향을 반전시킨 필터를 추가로 사용하였고 그 결과 뛰어난 검출 정확도가 보였다.

I. 서론

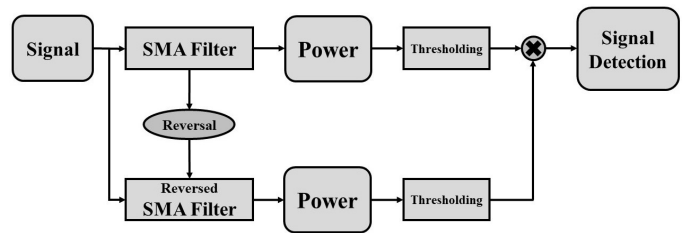
저피탐(Low Probability of Intercept, LPI) 레이더란 RF 출력을 매우 낮게 함으로써 상대방에게 RF 신호가 감지되지 않게 하는 기술을 의미한다[1]. 최근 전자전(Electronic Warfare, EW) 기술이 점진적으로 발전함에 따라 저피탐 능력을 갖춘 레이더들이 증가하고 있다[2]. 따라서 저피탐 레이더 신호를 정확하게 검출할 수 있는 기술이 우리 군의 전자 지원 시스템에서 필수적인 과정으로 요구되는 상황이며, 이에 관하여 Choi-Williams distribution(CWD) 변환과 같은 시간-주파수 분석(Time-Frequency Analysis, TFA)을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다[3]. 하지만 TFA를 이용한 신호 검출 방식은 데이터의 복잡성으로 인해 연산 속도의 한계를 가지기 때문에, 본 논문에서는 TFA를 거치지 않은 원본 I/Q 데이터를 이용할 수 있는 Simple Moving Average(SMA)를 이용한 방식을 제안함으로써 속도 성능을 높이려고 한다.

II. 저피탐 레이더 신호 검출 알고리즘

TFA를 통해 저피탐 레이더 신호를 검출하는 방식에서는 연산에 이용되는 데이터가 2차원의 이미지인 반면, SMA 필터의 경우 1차원의 원본 I/Q 데이터를 입력값으로 가지기 때문에 연산이 간단하므로 속도가 빠르다. 이는 실시간 신호 검출에서 이점을 가지므로, 본 논문에서는 미확인된 저피탐 레이더 신호를 수신하였을 때, SMA에 기반한 일정 기간의 전력 측정(Power Measurement)을 통해 신호를 검출하는 기법을 제안한다. 신호의 존재유무를 판단하는 임계값을 더욱 정확하게 설정하기 위해서 기존 SMA 필터를 변형한 필터를 추가로 사용하였고 [그림 1]을 통해 전반적인 구성을 확인할 수 있다. SMA란 시간 축의 데이터에서 시점 M 에서부터 n 개 시점 이전의 데이터까지의 평균을 낸 것을 의미하며, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$SMA = \frac{P_M + P_{M-1} + \dots + P_{M-(n-1)}}{n} \quad (1)$$

식 (1)에서 P_M 은 시점 M 에서의 데이터이고 n 은 계산에 사용되는 데



[그림 1] 알고리즘 구성도

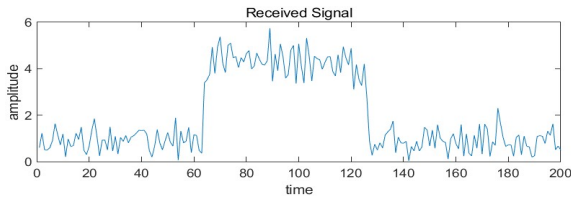
이터의 개수, 즉 SMA 필터의 윈도우 크기이다. 다음으로 이산 시간 신호 $s[t]$ 에 대한 전력 P_s 는 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$P_s = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} s^2[t] \quad (2)$$

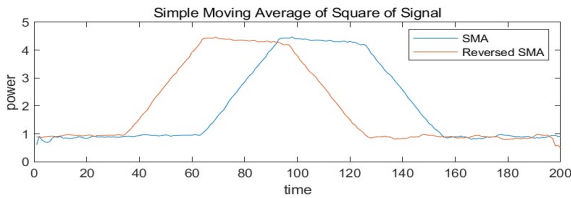
식 (2)를 통해 신호 $s[t]$ 를 제공한 후 시간 T 동안의 평균을 구하면 신호의 전력 P_s 가 된다는 사실을 알 수 있다. 즉, $s^2[t]$ 의 SMA를 구하면 시점 M 에서부터 n 개의 시점 이전까지 구간에서의 전력이 되고 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_s = \frac{1}{n} \sum_{t=M-(n-1)}^M s^2[t] \quad (3)$$

Adaptive White Gaussian Noise(AWGN)의 Power Spectral Density는 $\eta/2$ 의 일정한 값을 가진다[5]. 따라서 SMA 필터 내에 신호가 존재하지 않을 경우 노이즈의 전력에 해당하는 거의 일정한 값을 유지하게 된다. SMA 필터 내에 신호가 존재할 경우 전력이 증가하다가 신호가 사라지게 되면 다시 노이즈의 전력에 해당하는 값까지 감소하게 된다. 최종적으로 SMA 필터를 통해 계산된 전력의 증감을 식별함으로써 신호를 검출한다. [그림 2]의 신호에 필터의 윈도우 크기(n)가 30인 SMA 필터를 적용하게 되면 [그림 3]의 파란 선의 결과가 나타난다. 신호가 나타나는 시점에서부터 전력이 증가하여 노이즈의 전력보다 커지고, 신호의 전력에 도달하게



[그림 2] 시간 축에서의 신호 I/Q 데이터



[그림 3] 시간 축에서의 신호 제곱에 대한 SMA

되면 거의 일정하게 유지되다가, 신호가 사라지는 시점에서부터 전력은 감소한 후 최종적으로 다시 노이즈의 전력에 도달한다. 전력이 노이즈의 전력보다 클 경우에 신호가 존재한다고 가정했을 때 신호가 나타나는 시점은 제대로 측정되었지만, 신호가 사라지는 시점이 실제로 신호가 사라지는 시점에 비해 필터의 윈도우 크기(n)만큼 뒤늦게 측정되었다. 이러한 딜레이는 신호의 실제 펄스 폭보다 윈도우 크기(n)만큼 더 넓은 범위로 신호가 탐지되는 오류를 발생시키기에, 이를 해결하기 위해 SMA의 계산 방향을 반전시킨 Reversed-SMA 필터를 설계하였다. 기존의 SMA 필터에서는 시점 M 에서부터 n 개의 시점 이전까지의 데이터를 이용하여 평균을 구했던 것과 달리, Reversed-SMA 필터의 경우 시점 M 에서부터 n 개의 시점 이후까지의 데이터를 이용하게 되고 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$SMA_r = \frac{P_M + P_{M+1} + \dots + P_{M+(n-1)}}{n} \quad (4)$$

해당 필터를 적용한 결과는 [그림 3]의 빨간 선과 같고 기존 필터를 적용한 결과인 파란 선에 비해 필터의 윈도우 크기(n)만큼 앞당겨진 결과이다. 이후 두 필터에 의한 전력 측정 결과 간의 교차 검증을 통해 저피탐 레이더 신호를 검출하였다.

III. 시뮬레이션

본 논문에서는 10dB부터 -10dB까지 -2dB 간격으로 총 11가지의 Signal-to-Noise Ratio(SNR)를 가지는 18종류의 레이더 신호(Barker, Costas, Frank, LFMD, LFMT, LFMU, NLFM2, NLFM3, NLFMS, P1, P2, P3, P4, Rect, T1, T2, T3, T4)를 16~16000의 펄스 폭과 0~320000의 펄스 간격으로 무작위로 섞은 데이터를 사용하였다. 처음에는 노이즈의 전력 값을 신호의 존재에 대한 임계치로 이용하여 시뮬레이션 하였는데, 노이즈의 무작위성으로 인해 노이즈만 있는 기간을 신호가 포함되어 있다고 식별하는 오류가 발생하게 되었고, 이를 방지하기 위해 조금 높은 값인 1.1배한 값을 임계치로 설정하였으며, 이를 통해 각 I/Q 데이터 샘플이 파형의 한 부분인지 노이즈인지 식별하였다. 그 결과 필터의 윈도우 크기를 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200으로 설정하였을 때 평균 93.63%, 96.11%, 97.79%, 98.65%, 98.43%, 97.17%, 95.16%의 정확도를 보이고 있으며, [표 1]에 나타나 있다. 특히 필터의 윈도우 크기가 50 일 때 93.63%, 3200 일 때 95.16%의 정확도를 보였다. 필터의 윈도우 크기가 너무 작을 경우 전력을 계산하는 데 있어 충분한 양의 데이터를 수집하지 못하기

[표 1] 다양한 필터의 윈도우 크기에 따른 시뮬레이션 정확도

	SMA, SMA _r 필터의 윈도우 크기						
	50	100	200	400	800	1600	3200
정확도 (%)	93.63	96.11	97.79	98.65	98.43	97.17	95.16

때문에 전력 측정 결과가 신호를 단순히 제공한 결과에 비해 크게 달라지는 것이 없기에 성능이 감소한 것으로 보인다. 반면, 필터의 윈도우 크기가 너무 클 경우 윈도우 크기가 신호의 길이보다도 커지게 되어 검출해야 하는 해당 신호 외의 멀리 떨어진 다른 신호에 대한 데이터까지 포함하거나, 해당 신호의 SNR이 낮을 때 신호에 대한 정보가 노이즈의 정보에 전부 묻혀버리기 때문에 성능이 감소한 것으로 보인다.

IV. 결론

본 논문에서는 SMA 필터를 통해 미확인된 저피탐 레이더 신호를 검출하는 기법을 제안하였고, Reversed-SMA 필터를 추가적으로 이용함으로써 신호 검출의 임계값에 대한 정확도를 상승시켰다. 다양한 펄스 폭과 펄스 간격을 가지는 저피탐 레이더로 구성된 동일한 신호 데이터들에 대하여 필터의 윈도우 크기를 바꾸어가며 시뮬레이션을 한 결과 편차가 큰 정확도 분포가 나타났다. 따라서 높은 검출 정확도를 얻기 위해서는 각 신호마다 높은 정확도를 가지는 필터의 윈도우 크기를 채택하여 사용할 수 있어야 하는데, 이를 위해서는 신호의 펄스 폭에 대한 정보가 필요하다. 결론적으로 성능 향상을 위해서는 신호의 펄스 폭에 비례하여 적합한 윈도우 크기를 가지는 필터를 선택적으로 이용할 수 있어야 하고, 이를 위해서 미확인된 신호에 대한 펄스 폭을 예측하는 알고리즘을 개발하는 것이 향후 연구 과제이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2022R1A2C1011862)

참 고 문 헌

- [1] 박태용, 김원주, “저피탐(LPI) 레이더 탐제 플랫폼의 피탐 확률 감소에 관한 연구,” 한국정보통신학회논문지 제18권 제5호, pp. 1243-1248, 2014.
- [2] S. -H. Kong, M. Kim, L. M. Hoang and E. Kim, “Automatic LPI Radar Waveform Recognition Using CNN,” IEEE Access, vol. 6, pp. 4207-4219, 2018.
- [3] Yongjian Liu, Peng Xiao, Hongchao Wu, Weihua Xiao, “LPI radar signal detection based on radial integration of Choi-Williams time-frequency image,” Journal of Systems Engineering and Electronics, pp. 973-981, 2015.
- [4] Seng Hansun, “A new approach of moving average method in time series analysis,” 2013 Conference on New Media Studies (CoNMedia), 2013.
- [5] R. M. Howard, “White noise: A time domain basis,” 2015 International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF), 2015.