

미약신호 검출을 위한 웨이블릿 변환에 기반한 잡음억제 방법 Noise Suppression Method for Weak-Power Signals Using the Wavelet Transform

윤경식 김완진 박병구* 한진우* 김형남
Kyoung-Sik Yoon Wan-Jin Kim Byoung-Goo Park* Jin-Woo Han* Hyoung-Nam Kim

부산대학교 전자전기공학과 영상 및 통신시스템 전공, 부산 609-735

*국방과학연구소

(발표자 연락처: 김형남 hnkim@pusan.ac.kr)

요 약

전자전 구성요소 중 전자전지원 시스템은 적군의 레이더로부터 신호를 수집한 후 분석하여 아군의 전자공격 및 전자방어 시스템에 필요한 정보를 제공하는 중요한 역할을 수행한다. 그러나 시스템간의 상대적 위치와 거리 등의 환경변수에 의해 신호 강도가 미약하고, 적 전자전 장비의 운용정보가 부족하여 신호수집이 원활하게 이루어지지 않는 경우, 전자전지원 시스템의 역할이 크게 제한되므로 효율적인 전자전지원 시스템의 운용을 위해서는 이러한 문제점을 극복해야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 웨이블릿 변환과 주파수 천이 특성을 이용하여 낮은 SNR 환경에서도 효과적으로 미약신호를 수집할 수 있는 방법을 제시한다.

키워드: 전자전, 전자전지원, 신호검출, 웨이블릿 변환

1. 서 론

향후 전쟁의 양상이 정보전, 네트워크 중심전 (Network-centric Warfare)으로 급속하게 전환됨에 따라 전장에서 사용되는 전자장비도 점차적으로 다양화 되고 그 숫자 또한 빠르게 증가하고 있는 추세이다. 이에 따라 적군의 전자장비를 무력화 시키기 위한 전자공격 (Electronic Attack: EA), 적의 전자공격으로부터 아군의 장비를 보호하기 위한 전자보호 (Electronic Protection: EP), 그리고 EA와 EP를 지원하기 위한 전자전 지원 (Electronic Support: ES)으로 구성되는 전자전의 중요성도 크게 부각되고 있다 [1]. 전자전의 구성요소 중에서도 적 장비로부터 방사되는 신호를 수집, 분석하여 아군의 EA와 EP에 필요한 정보를 제공하는 역할을 수행하는 ES는 전자전의 핵심 요소로 인식되고 있으며 [2], 전자전의 원활한 수행을 위해서는 ES시스템의 안정적인 운용이 반드시 보장되어야 한다. 그러나 전장환경 하에서는 다양한 환경요소나 인위적 잡음에 의해 신호 대 잡음비 (Signal to Noise Ratio, SNR)가 낮아지며, 적 장비가 혼재되어 운용되므로 적 장비에 대한 사전정보가 부족할 경우 신호수집을 원활히 수행할 수 없는 문제점이 있다.

이러한 문제점을 극복하기 위하여 많은 연구들이 진행되었으나, 신호수집 성능을 향상시키기 위한 미약신호 검출보다는 신호가 수신되었다는 가정하에 펄스 열분리 및 펄스 간격 추정 등의 연구가 주로 진행되어 왔다 [3,4]. 비록 낮은 SNR에서 신호를 안정적으로 검출

하기 위한 연구도 있었으나 [5], 수신신호의 특성이 알려져 있어야만 사용할 수 있는 문제점이 있어 실제 ES시스템에 적용하여 사용하기에는 무리가 있다. 따라서 ES시스템에서 안정적으로 신호를 수집하기 위해서 신호의 특성이 알려져 있지 않고 SNR이 낮은 경우에도 신호를 검출할 수 있는 방법이 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 여러 분야에서 사용되었던 잡음제거 방법들을 도입하여 새로운 해결책을 모색하였으며 [5-8], 그 중에서도 scaling factor를 조절하여 수신신호의 SNR을 최대화시킬 수 있는 웨이블릿 변환의 특성에 착안하여 잡음을 효과적으로 억제할 수 있는 방법을 제안하였다. 그러나 scaling factor 조절만으로는 다양한 주파수 성분이 포함된 신호를 안정적으로 검출할 수 없는 문제점이 있어, 이를 보완하기 위해 추가적으로 주파수 천이특성을 이용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 웨이블릿 변환과 기존의 잡음제거 방법에 대하여 기술하고, 3장에서는 주파수 천이 특성을 이용한 방법을 제안한다. 4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 성능을 검증한다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

2. 웨이블릿변환을 이용한 레이더 신호 검출

기존에 제안되었던 웨이블릿 변환에 기반한 잡음억제 방법을 설명하기에 앞서 연속 웨이블릿 변환

(Continuous-time wavelet transform, CWT) 과 convolution 의 관계에 대하여 알아볼 필요가 있다. 입력신호 $f(t)$ 를 mother wavelet $\psi(t)$ 를 이용하여 CWT 를 정의하면 다음과 같다 [9].

$$W(s, b) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi^* \left(\frac{t-b}{s} \right) dt. \quad (1)$$

식 (1)에서 s 와 b 는 각각 scaling factor 와 time shift 를 나타낸다. CWT 와 convolution 의 관계는 아래와 같이 나타낼 수 있다 [9].

$$W(s, b) = f(b) * \psi_{s,0}^*(-b). \quad (2)$$

여기서 $\psi_{s,0}(t)$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\psi_{s,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \cdot \psi \left(\frac{t-b}{s} \right). \quad (3)$$

식 (2)에서 보듯이 CWT 는 주어진 s 에 대하여 입력신호 $f(b)$ 를 임펄스 응답이 $\psi_{s,0}^*(-b)$ 인 필터에 통과시키는 것을 의미하므로, 적절한 s 값을 선택하여 사용할 경우 검출하고자 하는 신호를 제외한 다른 신호 성분을 최대한 억제할 수 있음을 의미한다. 다시 말하자면 아래의 식 (4)를 만족하는 s 의 값을 찾을 수 있다면 수신신호의 SNR 을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다..

$$\text{Max}_{s=s_{opt}} \left\{ \frac{\text{power of } [W_{signal}(s, b)]}{\text{power of } [W_{noise}(s, b)]} \right\} \quad (4)$$

일반적으로 수동 레이더 (passive radar)를 이용하여 신호를 수집하는 경우, 신호의 수신은 대부분 적군의 신호원으로부터 상당히 멀리 떨어진 거리에서 이루어지게 된다. 이 경우 아군의 ES 시스템에 수신되는 적 ES 시스템의 신호는 자유공간손실과 같은 요인으로 인해 매우 미약한 신호 강도를 가지므로, 식 (4)와 같이 수신신호의 SNR 을 최대화 시키는 s 를 찾을 수 있다면 신호검출의 성능향상을 기대할 수 있다.

참고문헌 [5]에서는 SNR 이 낮은 상황에서 식 (4)를 만족시키는 최적화된 s 를 전산모의 실험을 통해 구하고 square wave 를 탐지하는 방법이 제안하였으나, 수신되는 신호의 운용주파수, 펄스 폭, PRI(pulse repetition interval)과 같은 사전 지식(prior knowledge)이 요구되어 실제적으로 ES 시스템에 적용하여 사용하기에는 여러 가지 난점이 있었다. 일례로 그림 1(a)와 같이 수신신호의 주파수가 상대적으로 저주파에 있는 경우, [5]에서 제안된 방법을 이용하여 신호를 검출할 수 있으나, 그림 1(b)와 같이 운용주파수가 고주파인 경우에는 s_{opt} 가 지나치게 작아져 잡음성분이 상대적으로 많이 포함

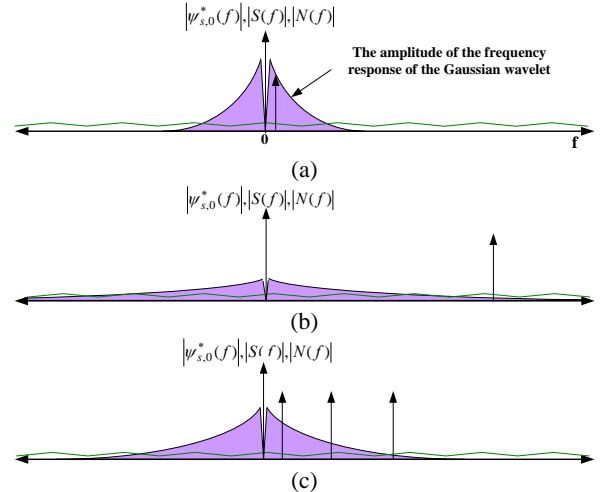


그림 1. 다양한 신호에 가우시안 웨이블릿을 적용했을 때: (a) 입력신호의 주파수 성분이 저주파인 경우. (b) 입력신호의 주파수 성분이 고주파인 경우. (c) 입력신호의 주파수 성분이 여러 개인 경우.

되므로 수신신호의 SNR 향상을 기대하기 어렵다. 또한 그림 1(c)와 같이 수신신호의 주파수 성분이 다양할 경우, 수신신호의 SNR 을 최대화 시키는 s_{opt} 가 모든 주파수 성분을 포함하지 않을 수도 있으므로 신호왜곡이 야기될 수 있다. 이러한 문제는 scaling factor 의 조절만으로는 해결될 수 없는 문제이므로, 본 논문에서는 주파수 천이를 가능하게 하는 요소를 도입함으로써 scaling factor 를 보다 효율적으로 최적화 시킬 수 있는 방법을 제안한다.

3. 주파수 천이와 웨이블릿변환을 이용한 신호검출 방법

2 장 마지막 부분에서 언급한 바와 같이 수신신호의 주파수 특성에 따라 필터의 중심주파수가 유동적으로 변하지 않을 경우, 신호검출을 용이하기 하기 위해서는 수신신호의 SNR 을 최대화 시킬 수 있는 웨이블릿 변환의 특성을 변화시키지 않으면서 필터의 중심주파수를 적절하게 변화시킬 수 있는 방법이 요구된다. 주파수 영역에서 중심주파수의 이동은 시간영역 신호와 다음과 같은 관계에 있다 [10].

$$e^{j2\pi f_0 t} x(t) \xrightarrow{FT} X(j2\pi(f - f_0)) \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 참고문헌 [5]에서 사용된 Gaussian wavelet 에 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \psi_{s,0}^*(-b) &= e^{j2\pi f_0 (b/s)} \left(-\frac{b/s}{4\alpha\sqrt{\pi\alpha}} \right) e^{-\frac{(b/s)^2}{4\alpha}} \\ &= -e^{j2\pi (f_0/s)b} \frac{b/s}{4\alpha\sqrt{\pi\alpha}} e^{-\frac{(b/s)^2}{4\alpha}} \end{aligned} \quad (6)$$

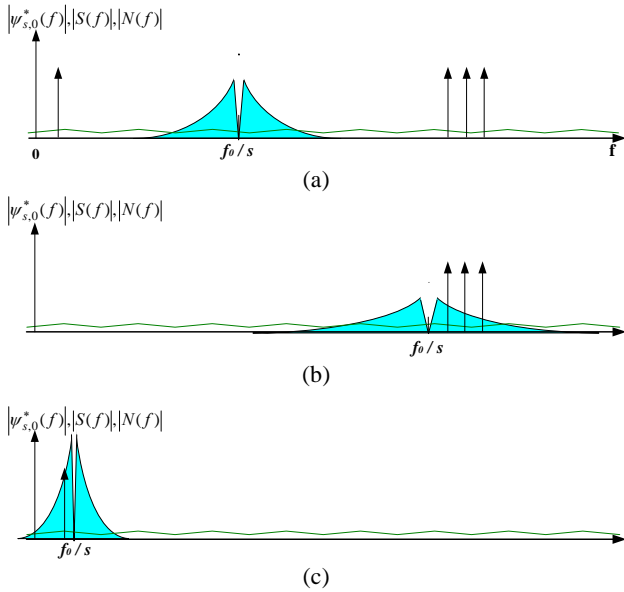


그림 2. scaling factor 에 따른 주파수 응답의 크기: (a) $s = 1$. (b) $s < 1$. (c) $s > 1$.

식 (6)에서 보듯이 $\psi_{s,0}^*$ (-b)로 수신신호를 웨이블릿 변환하게 되면 중심주파수가 f_0/s 만큼 이동하게 되며, f_0 와 s 는 변경 가능한 변수이므로 참고문헌 [5]에 제안된 방법과 달리 다양한 주파수 범위에서 신호검출을 가능케 한다.

제안된 방법을 보다 쉽게 설명하기 위해 제안된 주파수 천이특성을 적용할 경우 $\psi_{s,0}^*$ (-b)의 주파수 응답 $\Psi_{s,0}^*(f)$ 가 어떻게 변화하는지를 그림 2 에 도시하였다. 먼저 $s = 1$ 인 경우 그림 2(a)와 같이 수신신호의 주파수 성분과 필터의 중심주파수간의 거리가 먼 경우 신호의 검출이 어려움을 볼 수 있다. 그러나 그림 2(b)와 같이 1 보다 작은 s 값을 적용하면 필터의 이득은 s 배 만큼 감소하나, 중심주파수와 필터의 대역폭이 s 배 만큼 증가하게 되므로 주파수 천이를 사용하지 않는 기존의 방법보다 신호 검출확률을 높일 수 있다. 그림 2(c)와 같이 s 가 1 보다 커지는 경우는 이득이 s 배 만큼 증가하고 중심주파수와 필터의 대역폭이 s 배 만큼 감소하게 되나 수신신호의 SNR 을 크게 증가시킬 수 있는 장점이 있다. 따라서 이러한 특성을 이용하여 f_0 의 위치와 s 값을 적절하게 선택하면, 수신신호의 대역폭과 강도에 크게 영향을 받지 않고 신호를 검출할 수 있게 된다. 그러나 본 논문의 초점은 f_0 의 최적 값을 설정하는데 있지 않으므로 제안된 방법의 성능은 s 값의 변화에 국한하여 평가한다.

4. 시뮬레이션 결과

제안한 방법의 성능을 검증하기 위하여 다양한 환경에서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션에서 사용된 신호는 실제 상황에서 수신할 수 있는 보편

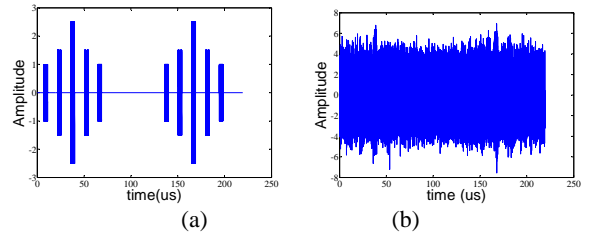


그림 3. 적 장비에서 발생되는 신호: (a) 기본 펄스 열. (b) -10 dB 환경에서 왜곡된 펄스 열.

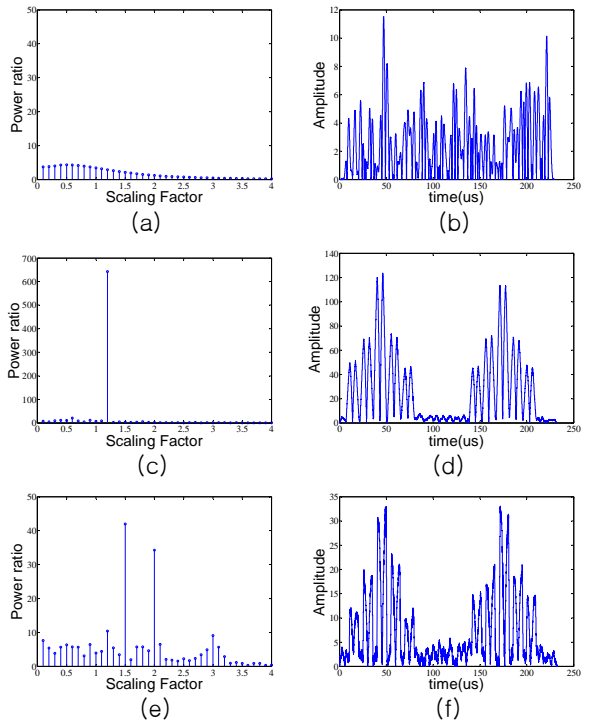


그림 4. 기존 신호검출방법과 제안된 방법을 적용했을 때의 결과: (a) s 의 변화에 따른 파워비 (기존방법). (b) 수신신호의 웨이블릿 변환 결과 (기존방법). (c) s 의 변화에 따른 파워비 (제안된 방법). (d) 수신신호의 웨이블릿 변환 결과 (기존방법). (e) s 의 변화에 따른 파워비 (제안된 방법). (f) 수신신호의 웨이블릿 변환 결과 (제안된 방법).

적인 신호라고 가정하였다. 그리고 3 장 마지막 부분에서 언급한 바와 같이 시뮬레이션의 목적이 s 값의 변화에 따른 제안된 방법의 신호검출 성능을 보는 것이므로 전송채널에 의한 영향과 중심주파수의 초기값 설정에 의한 영향을 배제하고, 순수한 잡음환경만을 고려하였다. 우선 단일 주파수 성분을 가진 신호검출 시뮬레이션을 위해 25 MHz 의 주파수를 가지는 신호를 생성한 후 SNR 이 -10 dB 인 잡음을 더하였으며, 그 결과는 그림 3(a)와 (b)에 도시되어 있다.

그림 4(a)와 (b)는 s 만을 변화시켜 신호를 검출하는 기존의 방법을 적용하였을 때의 결과를 나타내고 있다. 그림 4(a)에서 보듯이 s_{opt} 로 간주할 수 있는 유력한 값이 없으므로, 그림 4(b)와 같이 웨이블릿 변환하여도 원 신호가 제대로 복원되지 못함을 볼 수 있다. 이러한

결과는 2 장에서 설명한 바와 같이 scaling factor 만의 변화만으로는 고주파 성분을 검출하기 어렵기 때문이다. 그림 4(c)와 (d)는 제안된 방법을 적용했을 때의 결과를 나타내고 있으며, 여기서 중심주파수 f_0 의 초기값은 10 MHz 로 설정하였다. 그림 4(c)와 (d)에서 보듯이 SNR 이 -10 dB 인 열악한 환경에서도 s_{opt} 를 찾는 것이 가능하며, 웨이블릿 변환된 결과도 기존방법과 비교하여 펄스 폭(Pulse width, PW)과 펄스도착시간(Time of arrival, TOA), 상대적인 펄스크기(Pulse amplitude, PA)와 같은 신호 고유한 특징이 상대적으로 잘 복원되었음을 알 수 있다. 이러한 성능의 차이는 제안된 방법이 scaling factor 를 변화시킬 때 중심주파수 f_0 도 동시에 변경되도록 알고리즘을 수정하였기 때문이다.

다음으로 제안된 방법의 다중 주파수 성분을 가지는 신호검출 성능을 평가하기 위해 운용주파수가 5, 10, 15, 20 MHz 의 4 가지로 구성된 신호를 생성한 후 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과는 그림 4(e)와 (f)에 도시되어 있다. 그림 4(e)와 (f)에서 보듯이 다중 주파수 성분을 가지는 신호의 경우에도 신호성분을 비교적 잘 검출하고 있음을 확인할 수 있으나, 그림 4(c)와 (d)에서보다는 PW, PA 등의 특징이 잘 복원되지 못함을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 모든 신호의 주파수 성분을 포함하지 않고도 SNR 이 최대가 되는 경우가 발생하기 때문이며, 초기 중심 주파수를 적절하게 선정하거나 mother wavelet 을 교체하여 필터의 형태를 조절함으로써 해결할 수 있다.

5. 결론

ES 시스템은 열악한 환경 하에서도 안정적인 운용이 가능해야 하므로, 이를 위해 우수한 신호수집 성능이 보장되어야 한다. 그러나 신호강도가 약한 경우에는 이를 달성하기 어려우므로, 본 논문에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해 웨이블릿 변환과 주파수 천이 특성을 이용하는 신호검출 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 scaling factor 의 변화에 따라 중심주파수와 대역폭이 유동적으로 변화함으로써 우수한 신호검출 성능을 달성할 수 있었다. 이러한 결과는 ES 시스템의 안정적인 신호수집에 크게 기여할 수 있으므로, ES 시스템의 발전에도 이바지 할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 중심주파수의 초기값 문제나 다중주파수 성분을 포함하는 신호의 검출에 있어서는 다소 미흡한 부분이 있기 때문에 이에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] David L. Adamy, *Introduction to Electronic Warfare Modeling and Simulation*, Artech House, 2003
- [2] Richard G. Wiley, *Electronic Intelligence: The*

analysis of Radar Signals, Artech House, 1992.

- [3] Haina Rong, Weidong Jint, Cuifang Zhang “ Application of support vector machines to pulse repetition interval modulation recognition,” in *Proc. 6th Int. Conf. ITS Telecommunications*, pp. 1187 – 1190, June 2006.
- [4] Visnevski, N. Haykin, S. Krishnamurthy, V. Dilkes, F.A. Lavoie, P. “ Hidden Markov models for radar pulse train analysis in electronic warfare,” *IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 5, pp.597–600, March 2005.
- [5] Jin Tang, Zongkai Yang, Ying Cai, “ Wideband passive radar target detection and parameters estimation using wavelets,” *IEEE Int. Radar Conf.*, vol. 12, pp.815–818, May 2000.
- [6] Ing Yann Soon, Soo Ngee Koh, “ Speech enhancement using 2-D fourier transform,” *IEEE Trans. speech and audio processing*, vol. 11, pp.717–724, November 2003.
- [7] Sudha, S. Suresh, G.R. Sukanesh, R. “ Wavelet Based Image Denoising Using Adaptive Thresholding,” *Int. Conf. Computational Intelligence and Multimedia Applications*, vol. 3, pp.296–300, December 2007.
- [8] Il Kyu Eom, Yoo Shin Kim, “ Wavelet-Based denoising with nearly arbitrarily shaped windows,” *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 11, pp.937–940, December 2004.
- [9] Raghuvveer M.Rao, Ajit S.Bopardikar, *Wavelet transforms: introduction to theory and application*, ADDISON-WESLEY, 1998.
- [10] Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky, S. Hamid Nawab, *Signals & Systems 2nd edition*, Prentice-Hall, Inc, 1997.