논문 17-42-03-11 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '17-03 Vol.42 No.03
https://doi.org/10.7840/kics.2017.42.3.639

전자전 미약신호 환경에서 미상 위협 신호원의 검출 성능 향상을 위한 가중 에너지 검출 기법

김 동 규◆, 김 요 한*, 이 유 리*, 장 충 수**, 김 형 남°

Weighted Energy Detector for Detecting Uunknown Threat Signals in Electronic Warfare System in Weak Power Signal Environment

Dong-Gyu Kim◆, Yo-Han Kim*, Yu-Ri Lee*, Chungsu Jang**, Hyoung-Nam Kim°

요 약

위협의 핵심정보 추출을 위해 활용되는 전자전 지원시스템은 경로손실 등의 환경 상 제약으로 인해 수신신호의 전력이 낮은 미약신호 환경 하에서 운용될 수 있다. 이러한 상황에서 위협신호를 신속하고 정확하게 검출하기 위해서는 기존의 단일 샘플 에너지 검출 기법이 아닌 수신 신호의 전체 에너지를 최대한 활용함으로써 검출 성능을 향상시키는 기법이 요구된다. 하지만 신호원에 대한 사전정보가 존재하지 않는 전자전 환경에서 신호의 전체 에너지를 활용하기 위해서는 모든 신호원의 길이를 고려할 수 있도록 크기가 다양한 다수의 윈도우를 가지는 검출기를 설계해야 하므로 연산량이 과도하게 증가하는 문제점이 존재한다. 이러한 문제를 현실적으로 해결하기 위해 적은 수의 대표 윈도우를 사용하여 윈도우의 수를 줄이는 방법이 활용되지만 결과적으로 하나의 윈도우가 일정 구간의 미상신호를 고려해야 하므로 수신되는 신호의 길이와 검출기의 윈도우 크기의 불일치로 인해 검출 성능이 저하되는 문제점이 여전히 존재한다. 따라서 본 논문에서는 수신신호의 길이와 검출기의 윈도우 길이가 일치하지 않을 경우의 성능 저하를 분석하고, 성능향상이 가능한 상황인 수신신호의 길이가 검출기의 윈도우 길이보다 작은 경우에는 검출성능을 향상시킬 수 있고, 이외의 상황에는 기존의 에너지 검출기의 성능과 유사한 가중에너지 검출기를 제안하고 그 성능을 분석한다.

Key Words : Electronic warfare, Energy detection, Weak power environment

ABSTRACT

Electronic warfare systems for extracting information of the threat signals can be employed under the circumstance where the power of the received signal is weak. To precisely and rapidly detect the threat signals, it is required to use methods exploiting whole energy of the received signals instead of conventional methods using a single received signal input. To utilize the whole energy, numerous sizes of windows need to be implemented in a detector for dealing with all possible unknown length of the received signal because it is assumed that there is no preliminary information of the uncooperative signals. However, this grid search method

※ 본 논문은 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다. (과제명: 미약신호 탐지 기술 연구, 계약번호 UD150003ED)
※ 본 논문은 BK21플러스, IT기반 융합산업 창의인력양성사업단에 의하여 지원되었음.
◆ First Author : Pusan National University Department of Electrical and Computer Engineering, dkcspl@pusan.ac.kr, 학생회원
° Corresponding Author : Pusan National University Department of Electronics Engineering, hnkim@pusan.ac.kr, 종신회원
* Pusan National University Department of Electrical and Computer Engineering, leeyuri@pusan.ac.kr, 학생회원
** Agency for Defense Development, The 2nd R&D Institute - 2nd Directorate – 1 Team, csjang@add.re.kr
논문번호 : KICS2016-08-191, Received August 11, 2016; Revised November 9, 2016; Accepted November 14, 2016

requires too large computational complexity to be practically implemented. In order to resolve this complexity problem, an approach that reduces the number of windows by selecting the smaller number of representative windows can be considered. However, each representative window in this approach needs to cover a certain amount of interval divided from the considering range. Consequently, the discordance between the length of the received signal and the window sizes results in degradation of the detection performance. Therefore, we propose the weighted energy detector which results in improved detection performance comparing with the conventional energy detector under circumstance where the window size is smaller than the length of the received signal. In addition, it is shown that the proposed method exhibits the same performance under other circumstances.

Ⅰ. 서 론

전자전에서 기민한 전략 수립을 통해 아군의 전략적 우위를 확보하기 위해서는, 전자전 지원 시스템을 통하여 위협 신호원의 제원 및 위치 등의 핵심정보를 추출하는 과정이 요구된다. 이러한 핵심정보 추출을 성공적으로 수행하기 위해서는 위협으로부터 방사되는 통신 또는 레이더 신호를 신속하고 정확하게 탐지하는 것이 필수적으로 선행되어야 한다[1,2].

전자전 환경에서 위협이 방사하는 신호는 펄스압축, 주파수 도약 등의 피탐확률을 줄이는 다양한 방법의 변조방식이 사용되고 있지만[3][4], 아군의 수신기에서는 변조방식, 주파수등과 같은 신호형태에 대한 사전정보가 대부분 주어지지 않는 상황이다. 신호에 대한 사전 정보가 없는 환경에서 신호를 검출하기 위해서는 기본적으로 Neyman-Pearson 이론을 기준으로 고정된 오경보율(false alarm rate)에 대하여 최대 검출성능을 가지는 최적(optimal) 검출기에 미상 파라미터를 추정하여 대입하는 GLRT(generalized likelihood ratio test) 방법을 사용하며, 최종적으로 에너지 검출기로 귀결된다[5].

기존의 전자전 지원 시스템의 신호 검출 기법은 에너지 검출기를 기반으로 수행되어 왔으며, 가장 기본적으로 수신기에서 순차적으로 획득되는 하나의 샘플의 에너지를 사전에 설정된 오경보 확률로부터 도출되는 임계값과 지속적으로 비교하여, 임계값을 상회하는 순간에 신호가 존재하는 것으로 판단하는 방법을 사용한다[6-8]. 하지만, 기술의 발달로 인해 피탐확률을 줄이는 다양한 방법의 변조방식이 활용되고 있고, 신속한 신호 정보의 획득을 위해서는 아군의 전자전 시스템이 위협 레이더에 비해 긴 탐지 거리가 요구되므로, 경로손실로 인한 수신 신호의 세기가 미약한 신호 환경에서 신호탐지를 수행해야 하는 어려움을 가지고 있다. 따라서 기존의 한 샘플에 대한 에너지만을 활용하는 기법은 미약신호 환경에서의 검출 성능이 저하되는 문제점이 존재하므로, 최근에는 이를 해결하기 위해 수신 신호 전체의 에너지를 최대한 활용하는 방법이 연구되고 있다[9].

수신된 에너지를 모두 활용하기 위해서는 수신 신호의 길이에 대한 정보가 필요하지만, 광범위한 전투종심에 수많은 감시정찰 및 정밀 타격 전력들이 분산 운용되어 대규모 작전 형태를 띄는 현대전에서는 각 작전요소들의 운용목적에 따라 정보전달을 위한 지속파 통신 신호부터, 위치추정을 위한 짧은 펄스형 레이더 신호(short pulse), 그리고 속도추정에 필요한 도플러 정보를 짧은 펄스형 신호에 비해 획득하기 용이한 긴 펄스형 레이더 신호(long pulse)에 이르기까지 다양한 길이의 신호를 선택적으로 활용하고 있다[10]. 이러한 각 위협 작전요소들의 신호길이에 대한 다양성은 사전정보가 경미한 전자전 지원 시스템에서 수신 신호 전체의 에너지 정보를 활용하는 것을 방해하는 요소이므로, 검출기를 설계하는 과정에서 미상 위협신호의 길이에 대한 고려가 필수적으로 요구된다.

수신 신호의 형태에 대한 정보가 존재하지 않을 경우, 이론적으로 최대 검출 성능을 가지는 에너지 검출기는 수신 신호의 길이에 대한 정보를 보유하고 있다는 가정을 포함하고 있다[5]. 하지만, 실제적인 전자전 환경에서는 상기한 다양한 길이의 신호가 수신되므로, 검출기가 고려하는 신호길이와 실제로 수신되는 신호길이가 일치하지 않는 상황에서는 검출 성능의 열화가 발생한다. 이러한 문제는 다수의 에너지 검출기를 병렬적으로 수행하여 검출 성능을 향상시키는 방법을 활용하여 해결할 수 있으나, 고려하는 신호길이가 수백 ns에서 수백 μs에 이르는 다양한 신호에 대한 모든 길이의 에너지 검출기를 병렬적으로 구현할 경우, 연산량이 급격하게 증가하는 문제점이 발생한다. 이러한 연산량의 증가 문제를 해결하기 위해 참고문헌 [9]는 100 ns에서 1 μs 구간 1 μs에서 10 μs 구간 및 10 μs에서 100 μs 구간을 나누어 대표적인 길이를 설정하여 적은 수의 에너지 검출기를 병렬적으로 사용하는

방법을 제안하였다. 하지만 대표적인 소수의 윈도우를 설정하여 검출을 수행하더라도 여전히 일정구간에 대해서 하나의 대표 윈도우 길이를 가지는 에너지 검출기를 사용하므로 실제로 수신되는 신호길이와 완벽하게 일치하지 않는 상황이 발생하여 검출 성능이 저하되는 문제점이 존재한다.

따라서 본 논문에서는 고려하는 일정구간에 대해서 하나의 윈도우 길이를 가지는 에너지 검출기를 사용할 때, 검출기의 윈도우 길이와 실제 신호의 길이가 일치하는 최적 검출 상황에 비해 일치하지 않을 경우의 성능이 열화되는 현상을 정량적으로 분석한다. 여기서 발생하는 성능 열화를 분석하면, 수신신호의 길이에 비해 검출기의 윈도우 길이가 긴 경우, 신호에 비해 잡음이 많이 포함되는 문제점이 있고, 윈도우 길이가 짧은 경우, 전체 신호를 전부 고려하지 못하게 되므로 이러한 현상으로 인해 성능 열화를 유발하게 된다. 따라서 본 논문에서는 최종적으로 수신되는 잡음의 효과를 줄임으로써 윈도우 길이가 실제 신호의 길이보다 긴 경우에 검출 성능을 향상시킬 수 있도록 에너지 검출기에 가중치를 부여하는 가중 에너지 검출기를 제안하고 그 성능을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II장에서 에너지 검출기의 윈도우 길이와 실제 수신신호의 길이가 일치하지 않을 경우의 성능 열화를 분석한다. III장에서는 본 논문에서 제안하는 가중 에너지 검출기에 대해 상세히 설명하고, IV장에서 모의 실험결과를 바탕으로 제안한 가중 에너지 검출기와 기존 에너지 검출기 및 최적 성능을 비교한다. 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

Ⅱ. 단일 에너지 검출기의 성능 열화 분석

본 장에서는 에너지 검출기의 윈도우 길이가 실제 수신되는 신호의 길이와 일치하지 않을 경우 발생하는 성능 열화를 분석한다. 이 때, 대부분의 레이더에서 활용되는 신호의 경우 주파수 변조, 위상 변조 등을 사용하고 진폭변조를 활용하지 않으므로 신호의 파워는 일정한 것으로 가정하였으며 분석의 편의를 위해서 2 μs부터 16 μs까지의 범위에서 길이가 두 배가 되는 신호인 2 μs, 4 μs, 8 μs, 그리고 16 μs 총 4가지 신호원에 대하여 모의실험을 수행하였다.

신호원 검출은 기본적으로 가설(hypotheses) 설정, 검정통계치(test statistics) 설정, 임계값(threshold) 설정 및 가설검정(test & decision) 순서로 이루어지는데, 전자전에서 신호원의 유무에 대한 두 가지 가설 모델은 식 (1)과 같이 설정된다[5].

$$\begin{aligned} H_0 &: x[n] = w[n], & n = 0,1,...,N-1 \\ H_1 &: x[n] = s[n] + w[n], & n = 0,1,...,N-1 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, N은 수집한 샘플의 개수, H_0는 가우시안 잡음 $w[n] \sim N(0,\sigma^2)$만 존재하는 경우의 가설, H_1은 잡음환경에 경로감쇠가 포함된 위협의 송신신호 $s[n]$이 존재하는 가설을 나타낸다. 수신 신호의 정보가 없는 상황에서 가설로부터 검정통계치를 설정하기 위해서는, Neyman-Pearson 이론으로 유도되는 식 (2)와 같은 우도비 검정(likelihood ratio test)에 MLE(maximum likelihood estimation) 기법으로 추정된 위협의 송신신호 $\hat{s}[n]$을 대입하여 도출하며, 최종적으로 식 (3)과 같이 정의되는 검증통계치를 사용하는 에너지 검출기로 귀결된다[5].

$$L(x) = \frac{p(x;H_1)}{p(x;H_0)} \underset{<}{\overset{>}{}} \gamma \tag{2}$$

$$T(x[n]) = \sum_{n=0}^{N-1} |x[n]|^2 \tag{3}$$

여기서 $p(x;H_i),\ i=0,1$는 각 가설을 만족시키는 $x[n]$이 수신될 확률을 나타내며, γ는 임계값으로 설계자가 설정하는 오경보율(false alarm rate)에 의해 결정된다.

그림 1(a)는 에너지 검출기의 윈도우 길이와 실제 수신되는 신호의 길이가 일치하는 경우의 SNR(signal to noise ratio) 대비 검출확률을 도시한 것으로, 샘플링주파수는 150 MHz, 오경보율은 10^{-3}, 각 SNR에 대한 시행 횟수는 100,000회로 설정하였다. 그림으로부터 길이가 두 배가 되는 경우에 이론적인 에너지 검출기의 성능향상 수치인[5] 1.5 dB 만큼 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 그림 1(b), 1(c), 1(d)는 에너지 검출기의 윈도우 길이가 실제 수신되는 신호의 길이와 일치하지 않는 경우의 검출성능을 도시한 것으로서 각각 2 μs, 4 μs, 16 μs의 윈도우를 사용하였으며 다른 모의실험 환경은 그림 1(a)와 동일하다. 그림 1(b)에서 2 μs의 윈도우를 사용한 결과를 살펴보면, 길이가 일치하는 2 μs 신호원에 대해서는 그림 2(a)와 동일한 검출성능을 가지지만, 신호원이 2 μs보다 긴 경우에는 윈도우 길이가 2 μs로 고정되어 있기 때문에, 더 긴 길이의 신호를 고려하지 못하게 되어 검출

성능이 2 μs 신호원에 대한 검출 성능과 동일한 것을 확인할 수 있다. 반면에 그림 1(d)의 에너지 검출기의 윈도우 길이가 16 μs인 경우에는 16 μs 신호원에 대해서는 그림 1(a)와 동일한 검출성능을 가지지만 신호원이 16 μs보다 짧은 경우에는, 신호원의 길이와 일치하는 윈도우 길이를 사용한 방법에 비해 잡음이 포함되는 구간이 많아지게 되므로, 검출 성능이 열화되는 것을 알 수 있다. 마지막으로 그림 1(c)는 4 μs의 윈도우를 사용한 것으로, 4 μs이상의 길이를 가지는 신호원에 대해서는 4 μs의 신호원에 대한 검출 성능과 동일한 성능을 가지고, 4 μs이하의 신호에 대해서는 잡음에 의한 성능 열화가 발생하고 4 μs 이상의 신호에 대해서는 신호전체를 고려하지 못하여 성능 열화가 발생하므로 그림 1(b)와 그림 1(d)의 현상이 복합적으로 일어나는 것을 확인할 수 있다.

그림 1은 전자전 지원 시스템의 수신기 관점에서 동일한 SNR에 대하여 검출성능을 도시한 것이다. 하지만 실제 전자전 환경의 위협신호는 피탐확률을 줄이기 위해서 동일한 에너지를 긴 시간동안 송신하므로, 실질적인 환경에서의 검출성능을 확인하기 위해서는 식 (4)로 정의되는 ENR(energy to noise ratio) 대비 검출확률 또한 함께 분석해야 한다.

$$ENR = \frac{E_s}{\sigma^2} = \left(\sum_{n=0}^{N-1} |s[n]|^2 \right) / \sigma^2 \qquad (4)$$

여기서 E_s는 수신신호의 에너지이다.

그림 2는 그림 1의 각 하위그림과 동일한 환경에서, SNR 대신에 ENR을 사용하여 검출성능을 도시한 것으로, 동일한 ENR에서는 길이가 두 배 늘어남에 따라 SNR이 3 dB 감소하게 된다. 따라서, 그림 2(a)로부터

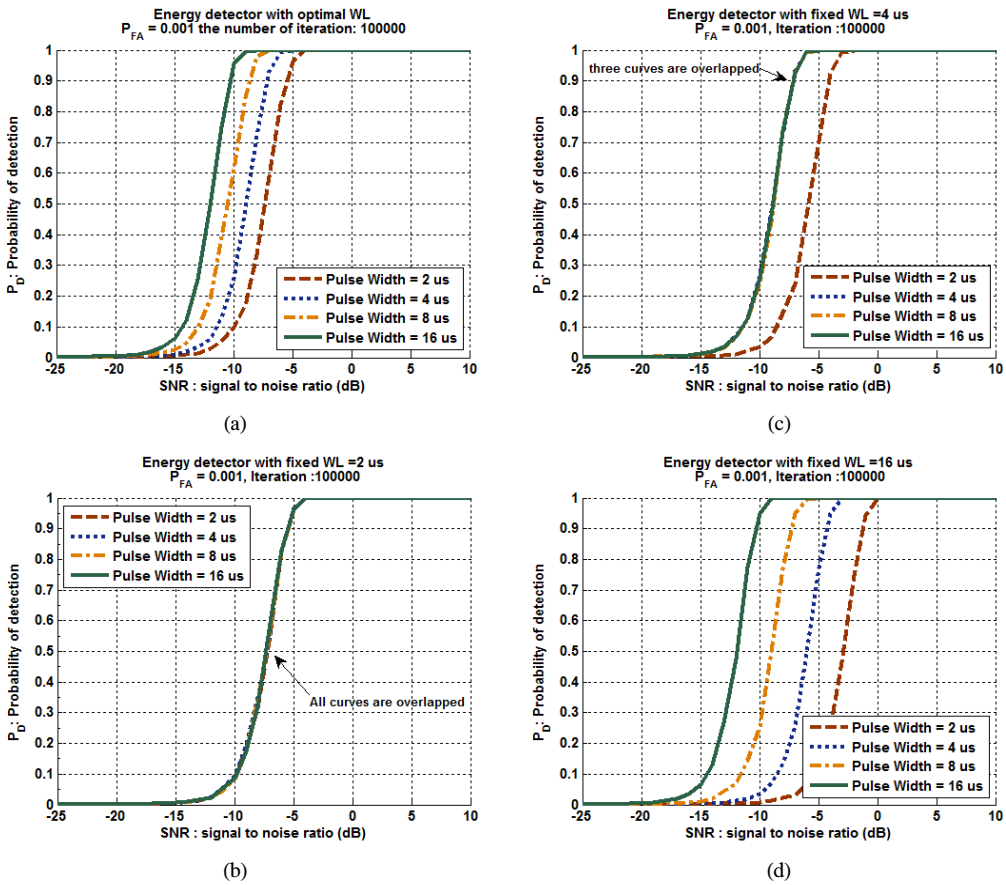

그림 1. 수신신호 길이(pulse width, PW) 및 윈도우 길이(window length, WL)에 따른 SNR(signal to noise ratio) 대비 검출 성능 (a) 수신신호 및 윈도우 길이가 일치 (b) 윈도우 길이: 2 μs (c) 윈도우 길이: 4 μs (d) 윈도우 길이: 16 μs

Fig. 1. Detection performance versus SNR according to pulse width of the received signal and window length of energy detector (a) pulse width and window length are equal (b) window length: 2 μs (c) window length: 4 μs (d) window length: 16 μs

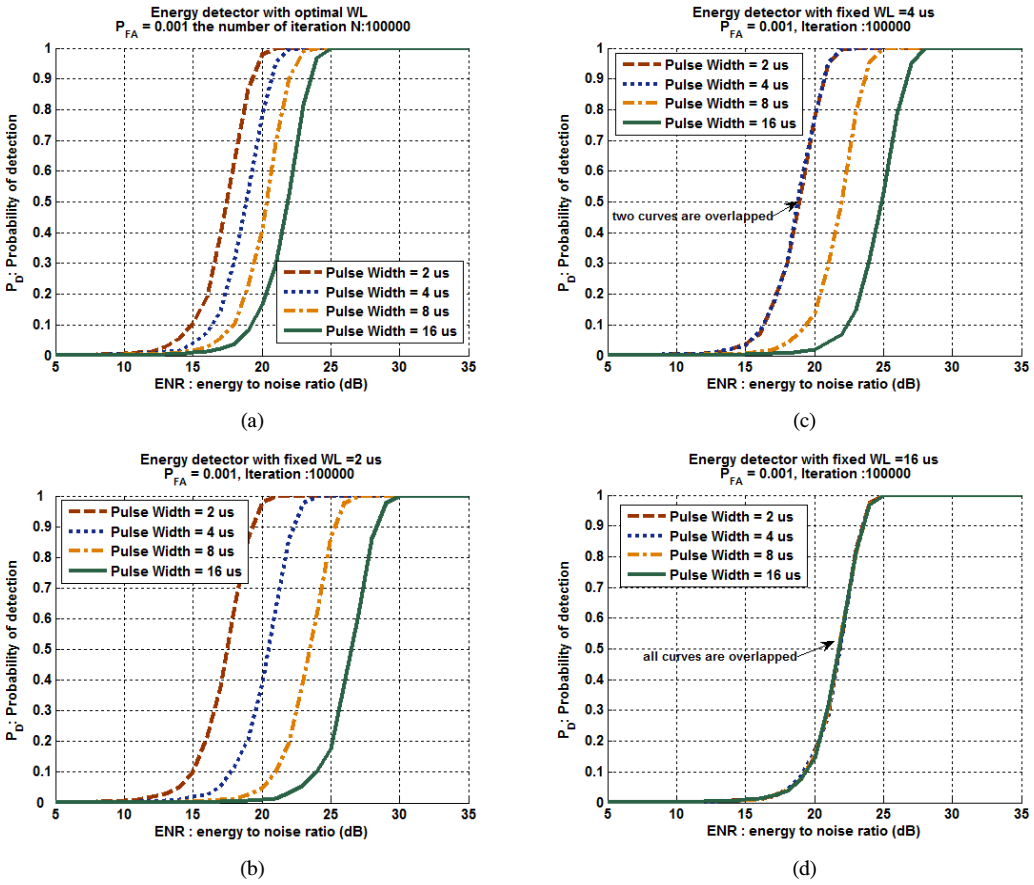

그림 2. 수신신호 길이(pulse width, PW) 및 윈도우 길이(window length, WL)에 따른 ENR(energy to noise ratio) 대비 검출 성능 (a) 수신신호 및 윈도우 길이가 일치 (b) 윈도우 길이: 2 μs (c) 윈도우 길이: 4 μs (d) 윈도우 길이: 16 μs
Fig. 2. Detection performance versus ENR according to pulse width of the received signal and window length of energy detector (a) pulse width and window length are equal (b) window length: 2 μs (c) window length: 4 μs (d) window length: 16 μs

기준이 되는 1 μs에서 그림 1(a)에 비해 각각 3 dB, 6 dB, 9 dB, 12 dB 씩 줄어들어 최종적으로 길이가 두 배로 늘어나면 성능은 1.5 dB 저하되는 것을 확인할 수 있다.

그림 2(b), 2(c) 및 2(d)를 보면, ENR 기준으로 바꿔어서 길이가 길어질수록 신호의 파워가 줄어드는 특성이외에는 다른 사항이 모두 변함이 없으므로 그림 1의 결과 분석과 동일한 현상이 발생한다. 따라서 그림 1(b), 1(c) 및 1(d)가 그림 1(a)에 비해 저하되는 성능의 수치와 동일하게 그림 2(a)에 비해 성능이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

Ⅲ. 가중 에너지 검출기

본 장에서는 2장에서 기술한 에너지 검출기의 윈도우 길이가 실제 수신신호의 길이와 일치하지 않을 경우의 성능 분석을 기반으로 검출 성능을 향상시키기 위한 가중 에너지 검출기법을 제안한다.

에너지 검출기의 윈도우 길이가 실제 수신신호의 길이보다 작을 경우에는, 실제 수신신호의 에너지를 검출기가 고려하지 못하므로 추가적인 성능 향상을 기대하기 어렵다. 하지만 윈도우 길이가 실제 수신신호의 길이보다 큰 경우에는, 에너지 검출기의 총 윈도우 길이 중에서 짧은 구간에 큰 가중치를 곱해주고, 긴 구간에 작은 가중치를 곱해줌으로써, 상대적으로 신호가 많이 포함되는 구간의 에너지 정보를 증가시킬 수 있다. 동일한 현상을 시간에 따른 에너지 검출기의 출력 관점에서 분석해보면, 그림 3(a)와 같이 신호와 윈도우 길이가 일치하는 경우에는 출력값이 증가하다 최대첨두(peak)지점이 발생하며, 여기서 검출 성능이 최대가 된다. 하지만 3(b)의 경우와 같이 신호의 길이에 비해 윈도우 길이가 상대적으로 긴 경우,

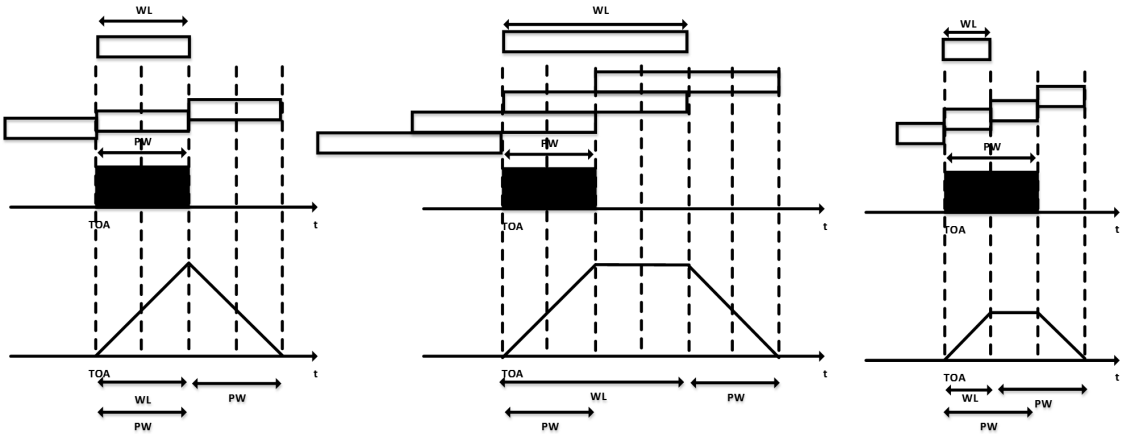

그림 3. 수신신호 길이(pulse width, PW) 및 윈도우 길이(window length, WL)에 시간 대비 에너지 검출기의 출력 (a) WL = PW (b) WL > PW (c) WL < PW
Fig. 3. Output of the energy detector versus time index according to pulse width of the received signal and window length of energy detector (a) WL = PW (b) WL > PW (c) WL < PW

3(a)의 최대값과 동일한 출력값을 유지하는 구간이 생기고, 이 구간의 출력은 긴 윈도우 길이로 인해 3(a)에 비교하여 잡음을 많이 포함하게 되므로 성능 열화가 발생한다. 마지막으로 3(c) 는 윈도우 길이가 실제 신호보다 짧기 때문에 포함하는 잡음이 줄어들지만 3(a)에서 발생하는 최대지점까지 도달하지 못하는 문제점이 발생하므로, 실제 신호가 가지는 최대 성능을 도출하지 못한다.

제안하는 가중에너지 검출기는 그림 3(b)의 상황에서 잡음이 존재하는 구간의 정보를 줄이고 신호가 존재하는 구간의 정보를 높이기 위해 가중치를 곱해주는 구조로 최대값이 유지되는 구간을 최대첨두(peak) 지점이 생기도록 변경하기 위하여 최대 가중치 구간을 고려하는 최소의 윈도우 길이로 설정한다. 이러한 가중에너지 검출기의 검증통계치는 식 (5)와 같이 정의되며, 곱하게 되는 가중치 α_n은 그림 4로 나타낼 수 있다.

$$T_{WED}(x[n]) = \sum_{n=0}^{N-1} \alpha_n |x[n]|^2, \qquad \sum_{n=0}^{N-1} \alpha_n = N$$

$$\alpha_n = \begin{cases} \dfrac{2Nn}{(N+m)i}, & 0 \le n \le i-1 \\ \dfrac{2N}{N+m}, & i \le n \le i+m-1 \\ \dfrac{2N}{N+m} - \dfrac{2N(n-(i+m-1))}{(N+m)(N-m-i)}, & i+m \le n \le N-1 \end{cases} \tag{5}$$

여기서, m은 그림 4에서 확인할 수 있는 바와 같이 최대 가중치구간의 샘플 개수이며, i는 최대 가중치구간의 시작지점, α_n은 가중치로 N개의 가중치 총합을 N으로 정규화 시켜줌으로써, 기존의 에너지 검출기와 동일한 잡음을 포함하도록 설정할 수 있다.

그림 5는 그림 3(b)와 같이 수신신호의 길이가 윈도우보다 짧은 상황에서 잡음이 동일하게 정규화된 에너지 검출기 및 가중에너지 검출기에 대하여 신호만 존재하는 경우의 시간에 따른 각 검출기의 출력값을 도시한 것이다. 여기서, 에너지 검출기의 최대지점을 1로 정규화 하였으며, 에너지 검출기의 윈도우 길이는 16 μs, 사다리꼴 형태의 가중 에너지 검출기 구조에서 아랫변은 16 μs, 윗변은 2 μs로 설정하였다. 그림 5(d)로부터 수신신호의 길이와 검출기의 윈도우

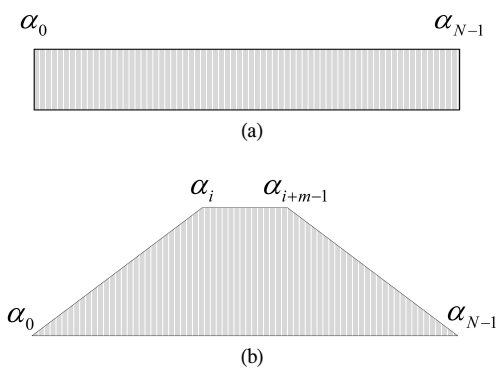

그림 4. 기존 에너지 검출기(a)와 가중 에너지 검출기(b)의 가중치.
Fig. 4. Weighting of the conventional energy detector(a) and weighted energy detector(b).

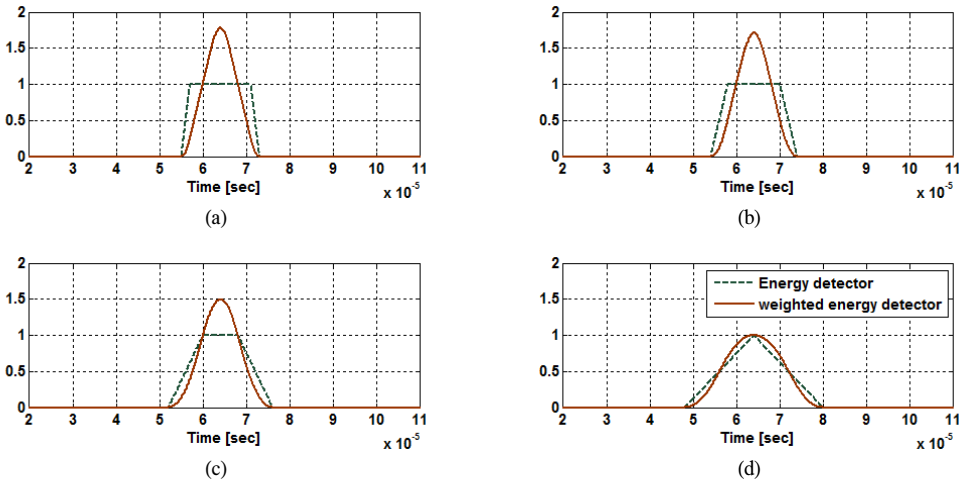

그림 5. 시간에 따른 에너지 검출기와 가중에너지 검출기의 출력: 수신신호의 길이 (a) 2 μs (b) 4 μs (c) 8 μs (d) 16 μs.
Fig. 5. Output of the energy detector and weighted energy detector corresponding to time: length of the received signal (a) 2 μs (b) 4 μs (c) 8 μs (d) 16 μs.

길이가 동일한 경우, 최대지점이 동일하므로 최종 검출 성능이 유사할 것으로 예상할 수 있고, 그림 5(d)수신신호의 길이가 짧은 경우, 가중에너지 검출기의 출력값의 최대지점은 기존 에너지 검출기의 출력값이 유지되는 구간에 비해 더 큰 값을 가지는 것을 확인할 수 있으므로 검출 성능의 향상을 기대할 수 있다.

Ⅳ. 모의실험 결과

본 장에서는 모의실험을 통해 제안하는 가중에너지 검출기의 성능이 기존 에너지 검출기의 성능에 비해 향상되는 것을 정량적으로 분석하여 증명한다.

그림 6은 SNR 및 ENR 대비 기존 에너지 검출기와 가중에너지 검출기의 검출 성능을 나타낸 것으로, 오경보율은 10-3, 각 SNR 및 ENR에 대한 시행 횟수는 100,000회, 샘플링 주파수는 150 MHz, 수신신호는 10 MHz의 주파수를 가지는 구형파(sinusoid)를 사용하였다. 여기서 에너지 검출기와 가중에너지 검출기의 아랫변의 길이는 (a) 4 μs, (b) 8 μs, (c) 16 μs를 사용하였고, 가중에너지 검출기의 윗변의 길이는 2 μs를 사용하였다. 또한, 그림 6(d), 6(e), 6(f)는 각각 6(a), 6(b), 6(c)와 동일한 환경에서 ENR 대비 검출 성능을 도시한 것이다. 그림 6(a)에서 확인할 수 있듯이, 3장에서 설명한 바와 동일하게 기존 에너지 검출기가 8 μs, 16 μs 신호에 대한 검출 성능이 4 μs의 검출성능과 일치하며, 가중에너지 검출기 또한 윈도우 길이보다 긴 신호에 대해서는 검출 성능이 기존 에너지 검출기와 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 반면에 수신신호 길이가 윈도우 길이보다 짧은 2 μs인 경우에는 검출 성능이 약 1 dB 향상되는 것을 알 수 있다. 그림 6(b) 및 그림 6(c) 또한 그림 6(a)의 경우와 동일한 결과를 도출할 수 있으며, 2-8 μs(윗변-아랫변) 윈도우 길이를 사용할 경우 에너지 검출기에 비해 검출 성능이 약 1.5 dB(수신신호 길이: 2 μs) 및 1 dB (수신신호 길이: 4 μs) 향상되고, 2-16 μs 윈도우 길이를 사용할 경우 검출 성능이 약 2 dB(수신신호 길이: 2μs), 1.8 dB(수신신호 길이: 4μs), 및 1 dB(수신신호 길이:8μs)가 향상됨을 알 수 있다. 그림 6(d), 6(e), 6(f)는 기준이 SNR이 아닌 ENR로 변경된 것 이외에는 각각 6(a), 6(b), 6(c)와 동일한 환경이므로, 에너지 검출기에 비교되는 성능 향상의 정도는 동일하며, 전체적으로 수신신호의 길이가 길 경우, ENR 대비 성능이 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 전자전 상황의 미약 신호 환경에서 미상 신호원을 검출하기 위하여 에너지 검출기를 사용할 때, 수신신호의 길이에 대한 사전정보의 미확보로부터 야기되는 검출 성능의 열화를 분석하고, 이러한 열화가 일어나는 요건 중에서, 검출기의 윈도우 길이에 비해 수신신호의 길이가 짧은 경우의 성능을 향상시키기 위하여 가중에너지 검출기를 제안하고, 성능 향상 정도를 분석하였다. 이러한 가중에너지 검출기는 에너지 검출기와 유사한 연산량을 가지면서도, 검출 확률이 높아지므로 추후 전자전 환경에 실용적으로

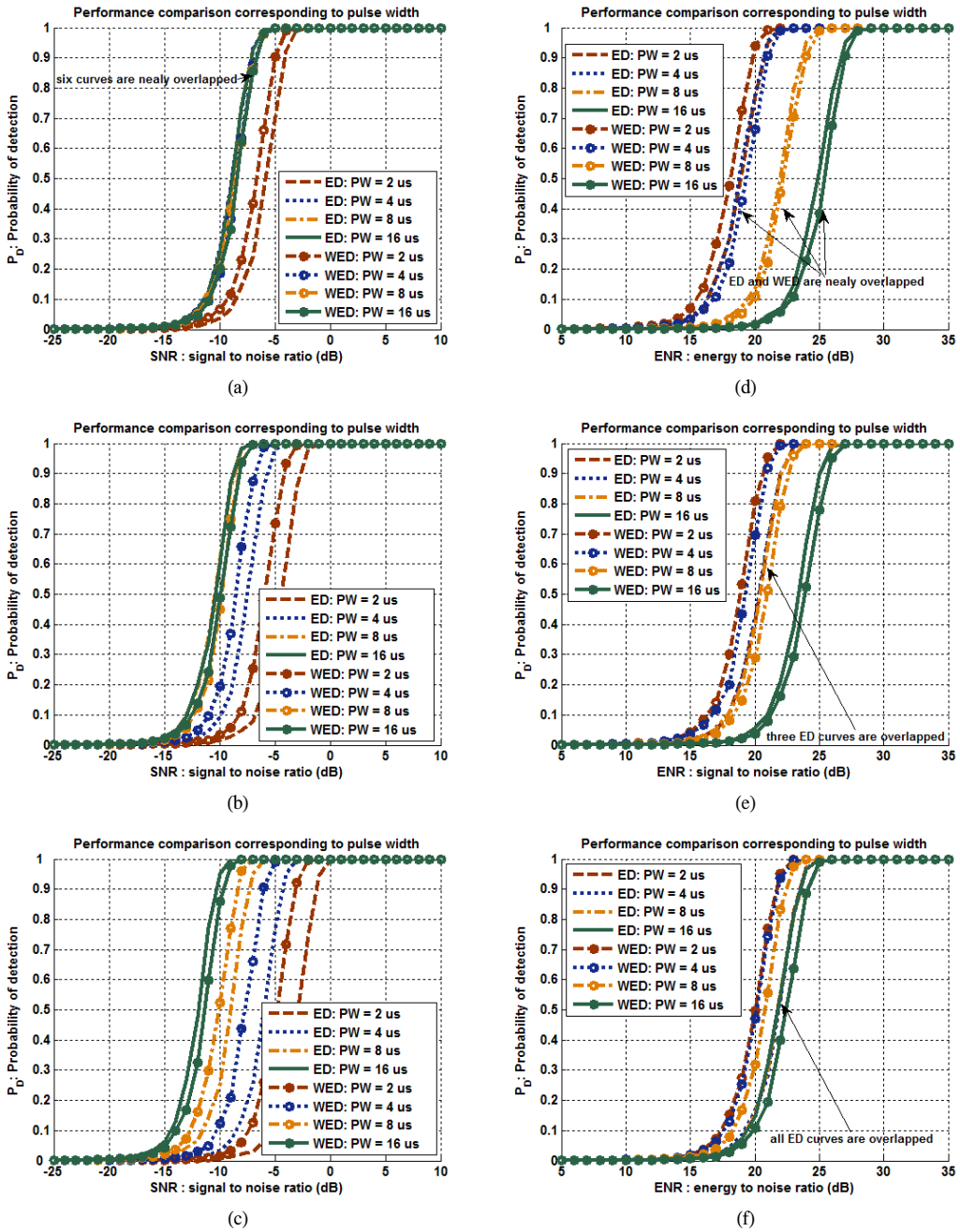

그림 6. 수신신호 길이(PW, pulse width) 및 윈도우 길이(WL, window length)에 따른 SNR(a, b, c) 및 ENR(d, e, f)대비 검출 성능: (a, d) 윈도우 길이: 2-4 μs (윗변-아랫변) (b, e) 윈도우 길이: 2-8 μs, (c, f) 윈도우 길이: 2-16 μs(가중에너지 검출기(weighted energy detector, WED)의 아랫변은 에너지 검출기(energy detector, ED)의 길이와 일치).

Fig. 6. Detection performance versus SNR(a, b, c) and ENR(d, e, f) according to pulse width of the received signal and window length of energy detector: (a, d) window length: 2-4 μs(top line-bottom line) (b, e) window length: 2-8 μs (c, f) window length: 2-16 μs (The bottom line of the weighted energy detector is identical to the window length of the energy detector).

활용될 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 본 논문에서는 가중에너지 검출기의 윈도우 길이를 몇 가지로 나눈 경우만을 정확도 측면에서 분석하였으므로 구간 내의 평균적인 검출 성능 향상을 위한 최적 윈도우 길

이에 대한 성능 분석 및 연산량에 대한 연구가 필요하며 잡음의 확률분포가 정상(stationary)적인 특성을 가지지 않을 경우 성능이 열화될 수 있으므로 이에 대한 고려 또한 필요할 것으로 판단된다.

References

[1] L. R. Paradowski, “Microwave emitter position location : Present and future,” in *Proc. Microwaves and Radar*, vol. 4, pp. 97-116, 1998.

[2] Y. S. Lee, J. S. Kim, E. G. Kim, and J. S. Lim, “Identification algorithm for up/down sliding PRIs of unidentified RADAR pulses with enhanced electronic protection,” *J. KICS*, vol. 41, no. 6, Jun. 2016, *J. Commun. Networks (JCN)*, vol. 13, no. 6, pp. 10-16, Dec. 2011.

[3] A. Denk, “Detection and jamming low probability of intercept(LPI) RADAR,” Naval Postgraduate School, Monterey CA, 2006.

[4] Philip E. Pace, *Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar*, 2003 : Artech House Remote Sensing.

[5] S. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory*, 1993 : Prentice-Hall.

[6] B. M. Albaker and N. A. Rahim, “Detection and parameters interception of a radar pulse signal based on interrupt driven algorithm,” *Scientific Res. and Essays*, vol. 6, no. 6, Mar. 2011.

[7] B. M. Albaker and N. A. Rahim, “Signal acquisition and parameter estimation of radio frequency pulse radar using novel method,” *IETE J. Res.*, vol. 55, no. 3, Jul. 2011.

[8] G. R. Deeba Lakshmi, R. Gopalakrishnan, and Manjunath R. Kounte, “Detection and extraction of radio frequency and pulse parameters in radar warning receivers,” *ERCICA*, 2013.

[9] J. Tsui, *Special design topics in digital wideband receivers,* Artech House, 2010.

[10] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing,* McGraw-Hill, 2005.

김 동 규 (Dong-Gyu Kim)

2011년 2월 : 부산대학교 전자전기통신공학부 학사 졸업

2011년 2월~현재 : 부산대학교 전자전기컴퓨터공학과 석박통합과정

<관심분야> 통신 및 신호처리, 레이더 및 소나 시스템, 전자전 신호처리

김 요 한 (Yo-Han Kim)

2014년 2월 : 부산대학교 전자전기공학부 졸업

2016년 2월 : 부산대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사 졸업

2017년 2월~현재 : LIG Nex1 연구원

<관심분야> 통신 및 신호처리, 레이더 및 소나 시스템, 전자전 신호처리

이 유 리 (Yu-Ri Lee)

2010년 2월 : 부산대학교 전자전기통신공학부 학사 졸업

2012년 2월 : 부산대학교 전자전기공학과 석사 졸업

2012년 2월~현재 : 부산대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야> 부채널 공격, 디지털 방송신호처리, 전자전 신호처리, 생체신호처리

장 충 수 (Chungsu Jang)

2012년 10월~현재 : 국방과학연구소 선임연구원

김 형 남 (Hyoung-Nam Kim)

1993년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 학사 졸업
1995년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 석사 졸업
2000년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 박사 졸업
2000년 3월 : 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부 박사 후 연구원
2000년 5월~2003년 2월 : 한국전자통신연구원 무선방송연구소 선임 연구원
2003년 3월~2007년 2월 : 부산대학교 전자전기통신공학부 조교수
2007년 3월~2012년 2월 : 부산대학교 전자전기공학부 부교수
2009년 2월~2010년 2월 : Johns Hopkins Univ. Visiting Scholar
2015년 9월~2016년 8월 : Univ. of Southampton Visiting Professor
2012년 3월~현재 : 부산대학교 전자공학과 교수
<관심분야> 적응신호처리, 레이더 및 소나 신호처리, 디지털 방송 신호처리, 생체 신호처리