

잡음 전력 불확실성이 존재하는 환경에서 레이더 신호에 대한 에너지 검파 기반 스펙트럼 센싱

임 창 현*

Energy Detection Based Spectrum Sensing for Radar Signals in the Presence of Noise Power Uncertainty

Chang Heon Lim*

요 약

시간 영역에서 펄스 레이더 신호는 송신 펄스가 존재하는 구간과 표적으로부터 반사된 수신 신호가 존재하는 구간으로 구분할 수 있으며, 수신 신호 성분은 송신 펄스에 비해 크기가 매우 작고, 표적으로부터 반사된 성분을 제외하고는 잡음으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 이러한 성질을 이용하여 잡음 전력에 대한 불확실성이 존재하는 환경에서 에너지 검파를 이용하여 레이더 신호를 검출하는 방안을 제시하고자 한다.

Key Words : cognitive radio, spectrum sensing, energy detection, radar, noise power uncertainty

ABSTRACT

In time domain, a radar signal is divided into two segments: one is for a transmitted pulse and the other is for receiving possible returns from radar targets. Also the received signal is relatively weak and consists of background noise except for the reflected signals from radar targets. In this Letter, we present an energy detection based spectrum sensing for a radar signal in the presence of noise power uncertainty exploiting this characteristics.

I. 서 론

최근 TV 대역에 이어 레이더 대역이 인지 무선^[1] 기반 주파수 공유 기술을 적용할 대역으로 많은 관심을 모으고 있다. 이때 핵심 기술 중의 하나는 레이더 신호를 성공적으로 검출하는 기술이다. 최근까지 발표된 레이더 신호 검출 방식은 대부분 에너지 검파 방식에 기반을 두고 있다^[2]. 에너지 검파 방식^[1]은 수신 신호의 전력을 임계값과 비교하여 검출 대상 신호의 존재 여부를 판단하는 기술로서, 구현이 간단하며 다양한 신호를 검출하는데 적용할 수 있으나, 배경 잡음 전력의 불확실성에 따른 검출 성능 저하가 상당한 것으로 알려져 있다.

펄스 레이더 신호는 시간 영역에서 송신 구간과 수신 구간으로 분리되어 있다는 특징이 있다. 그리고 수신 구간에 나타나는 신호의 세기는 송신 신호에 비해 매우 약하며, 레이더 표적에서 반사된 성분 이외에는 잡음 성분으로 구성되는 특성이 있다. 따라서 이차 사용자가 관측한 레이더 신호 샘플 중에서 크기가 작은 것은 잡음 성분일 가능성이 매우 크다. 본 논문에서는 이러한 성질에 착안하여 잡음 전력에 비례하는 성분을 추정하는 방안을 제시하고, 이를 토대로 잡음 전력의 불확실성으로 인한 성능 열화를 개선할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

II. 제안하는 에너지 검파 방식

펄스 레이더 신호가 시간 n 에서 갖는 샘플을 $s(n)$ 이라 하고 잡음 샘플을 $w(n)$ 이라 할 때, 레이더 신호 유무에 따라 이차 사용자가 수신하는 레이더 신호 $x(n)$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x(n) = \begin{cases} w(n) & H_0 \\ h(n)s(n) + w(n) & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

위 식에서 가설 H_0 와 H_1 은 각각 레이더 신호가 존재하지 않는 경우와 존재하는 경우를 나타내며, $w(n)$ 은 분산이 σ^2 인 AWGN으로 가정하고, $h(n)$ 은 페이딩 채널이 시간 n 에서 갖는 이득을 나타낸다. 정확하게 하자면 레이더 표적으로부터 반사된 신호 성분도 수신 신호에 포함해야 있지만, 이는 레이더 펄스 신호

* 이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음

• First Author : Pukyong National University Department of Electronic Engineering, chlim@pknu.ac.kr, 종신회원
 논문번호 : KICS2017-02-037, Received February 6, 2017; Revised March 2, 2017; Accepted March 16, 2017

에 비해 매우 작다고 생각할 수 있기 때문에 식(1)의 수신 신호 모델링에서는 이를 생략한다.

에너지 검파란 수신 신호의 전력 또는 에너지를 측정하고, 이를 임계값과 비교하여 신호의 존재 여부를 판단하는 방식이다. 이때 수신 에너지 E 는 다음과 같이 수신 신호 $\{x(n), n=0, \dots, N-1\}$ 를 사용하여 정의할 수 있다.

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 \quad (2)$$

위 식에서 N 은 에너지 계산에 사용된 수신 신호 샘플의 개수이다.

레이더 신호는 주기적인 펄스로 이루어져 있고, 레이다 펄스의 샘플 절대값은 일반적으로 잡음 샘플 절대값보다 클 확률이 높다. 이에 근거하면 수신 샘플의 크기를 오름차 순으로 정렬했을 때, 작은 값일수록 잡음 샘플일 가능성이 높다. 이런 특성을 활용하여 본 논문에서는 다음과 같이 새로운 통계량 $\hat{\sigma}^2$ 을 정의한다.

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} |x_{(k)}|^2 \quad (3)$$

위 식에서 $x_{(k)}$ 는 $\{x(n), n=0, \dots, N-1\}$ 를 크기에 따라 오름차순으로 정렬했을 때 k 번째 샘플을 가리킨다. 여기서 K 는 $\hat{\sigma}^2$ 를 계산하는데 사용된 수신 신호 샘플의 개수이다. 만약 관측되는 신호 샘플 개수 중에서 잡음으로 인한 샘플 개수가 K 보다 크다면 $\hat{\sigma}^2$ 를 계산하는데 사용된 $x_{(k)}$ 는 모두 잡음 성분일 가능성이 매우 크다. 그러므로 식(3)으로 정의한 $\hat{\sigma}^2$ 는 잡음 샘플 $w(n)$ 의 전력 σ^2 과 비례하는 관계를 가질 것으로 예상된다. 수신 신호가 모두 잡음 샘플로 구성되어 있다면 $|x(n)|^2$ 에 대한 확률 밀도 함수를 $f_{|x(n)|^2}(x)$ 라고 할 때, $f_{|x(n)|^2}(x)$ 는 평균이 σ^2 인 지수 분포를 따르며, $|x_{(k)}|^2$ 의 통계적 분포는 다음과 같은 통계량과 동일하다고 알려져 있다^[3].

$$\sigma^2 \left(\sum_{j=0}^{k-1} \frac{Z_j}{N-j} \right) \quad j=0, \dots, N-1 \quad (4)$$

위 식에서 $\{Z_j, j=0, \dots, N-1\}$ 은 서로 통계적으로 독립이고, 평균값이 1이며 지수 분포를 갖는 확률 변수들이다. 따라서 식(3)의 평균값을 계산하면

$$E \left[\frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} |x_{(k)}|^2 \right] = \frac{\sigma^2}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{j=0}^{N-k} \frac{1}{N-j} \quad (5)$$

가 되어 $\hat{\sigma}^2$ 의 평균이 배경 잡음의 전력 σ^2 과 비례함을 알 수 있다. 또한 K 가 클수록 $\hat{\sigma}^2$ 의 분포가 평균값 대비 밀집되는 경향이 있으므로 해당 레이더 펄스의 듀티 사이클을 고려할 때 가능한 최대값을 사용하는 것이 바람직하다. 이러한 사실을 기반으로 본 논문에서는 다음과 같은 검정 통계량을 제안하고자 한다.

$$\frac{E}{\hat{\sigma}^2} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2}{\frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} |x_{(k)}|^2} \quad (6)$$

식 (6)의 검정 통계량은 수신 전력을 잡음 전력 σ^2 에 비례하는 양으로 정규화하는 형태이기 때문에, 잡음 전력 수준에 관계없이 일정한 오경보 확률을 보장할 것으로 기대할 수 있다.

III. 모의 실험 및 결과

논문에서 제안한 검출 방식의 성능 평가를 위해 다음과 같은 레이더 펄스를 사용하였다. 실험에 사용할 레이더 신호의 펄스 폭은 1 μ s, 레이더 펄스 반복 주기(PRI)는 10 μ s, 레이더 신호의 전체 길이는 100 μ s로 설정하였다. 그림 1은 실험에서 사용할 송신 레이더 신호를 나타낸 것이다. 레이더 신호 검출을 위해 레이더 신호를 관측하는 시간은 50 μ s로 하였으며, 관측 시간의 시작점은 0 ~ 50 μ s 이내의 균일 분포를 갖는 것으로 설정하였다. 이때 샘플링 주파수는 1 MHz를 사용하고, 식(6)에서 $N=500, K=300$ 로 설정하였다. 또한 송신 레이더와 이차 사용자간의 전송 채널은 레일리 페이딩 채널로 가정하였다. 그리고 검출 임계값 λ 는 목표 오경보 확률이 달성되도록 설정하는데, 식(6)의 검정 통계량에 대한 이론적인 임계값을 결정하는 것이 어렵기 때문에, 여기에서는 실험적으로 그 값을 결정하였다.

그림 2는 목표 오경보율이 0.1일 때 본 논문에서 제안한 레이더 신호 검출 방식이 잡음 전력의 불확실성이 존재하는 환경에서 어떠한 오경보 확률을 보이는가를 보여주고 있다. 범례에서 ED는 기존의 에너지 검파 방식을 의미하고, Modified ED는 본 논문에서 제안한 방식을 가리킨다. 그림에서 보는 바와 같이

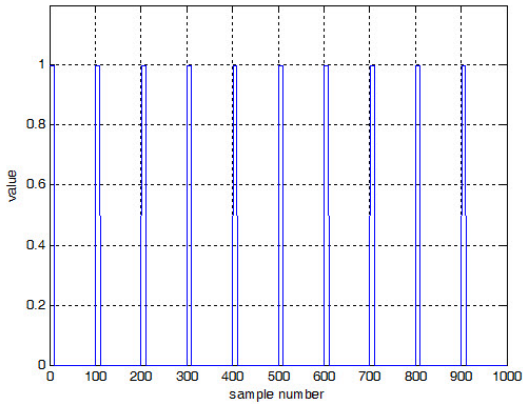


그림 1. 모의 실험에 사용한 송신 레이더 신호
Fig. 1. Pulse radar signal for simulation

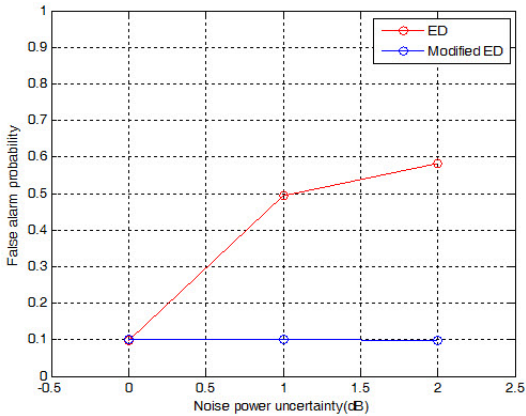


그림 2. 잡음 불확실성에 따른 오경보 확률
Fig. 2. Effects of noise power uncertainty on false alarm probability

제안한 방식은 기존의 에너지 검파 방식과 달리 거의 오경보 확률을 일정하게 유지하고 있음을 보여주고 있다. 이는 식(5)에서 확인한 바와 같이 $\hat{\sigma}$ 의 평균이 잡음 전력 σ^2 에 비례하기 때문이다.

그림 3과 그림 4는 각각 SNR이 -10dB일때와 0 dB일 때 레이더 신호 검출에 대한 오경보 확률과 검파 확률 간의 관계를 비교한 것이다. 범례에서 UNC는 잡음 전력 불확실성을 dB로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 가지 SNR에 대하여 Modified ED방식은 잡음 전력 불확실성에 따른 성능 차이가 별로 없음을 알 수 있다. 그리고 SNR이 증가하면서 Modified ED 방식의 성능이 기존의 ED 방식에 비해 향상되는 것을 볼 수 있는데, 이는 SNR이 향상되면서 잡음 전력 추정에 대한 정확도가 개선되기 때문인 것으로 추정된다.

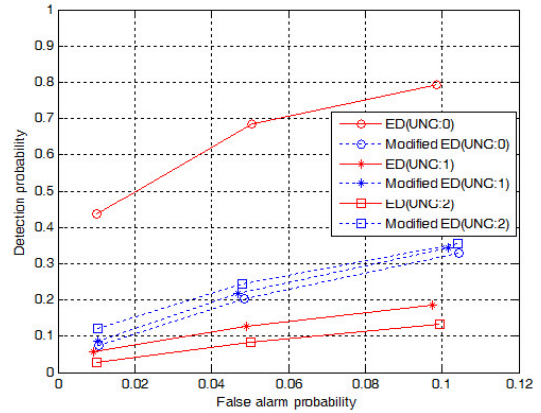


그림 3. SNR=-10dB 일때 레이더 신호 검출 성능
Fig. 3. Performance of radar signal detection when SNR=-10dB

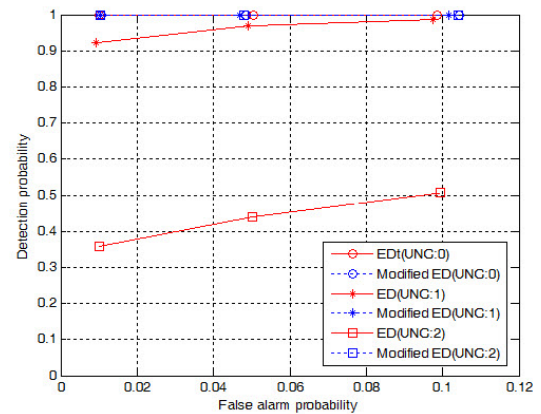


그림 4. SNR=0dB 일때 레이더 신호 검출 성능
Fig. 4. Performance of radar signal detection when SNR=0dB

References

- [1] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 11, no. 1, pp. 116-130, 2009.
- [2] C. H. Lim, H. J. Kim, and C. J. Kim, "Detection of a radar signal using the periodicity of its autocorrelation function," *J. KICS*, vol. 41, no. 7, pp. 732-737, 2016.
- [3] H. A. David and H. N. Nagaraja, *Order Statistics*, John Wiley & Sons, Inc., 2003.