

레이더 대역에서 레이더 신호 검출을 위한 스펙트럼 센싱 방식

임창현*, 진은숙*, 김창주*

Spectrum Sensing Techniques for Detection of Radar Signals in Radar Bands

Chang Heon Lim*, Eun Sook Jin*, Chang Joo Kim*

요약

주파수 자원에 대한 수요가 늘어나면서 이미 사용되고 있는 주파수 자원의 이용 효율을 높이려는 다양한 시도가 있어왔다. 이러한 시도 중의 하나가 주파수 공유 개념인데, 이 개념을 구현할 수단으로 인지 무선(cognitive radio) 기술에 대한 관심이 집중하고 있다. 최근 레이더 주파수 대역이 인지 무선을 기반으로 주파수 공유 개념을 적용할 유망한 주파수 대역으로 부상하고 있는데, 이는 레이더 대역은 대역폭이 넓고 이용률이 높지 않다는 특성을 갖고 있어 주파수 공유로 인한 기대 효과가 클 것으로 예상되기 때문이다. 인지 무선 기술을 사용함에 있어서 가장 중요한 기능 중의 하나는 해당 대역에 대한 우선 사용자(primary user) 신호의 존재 여부를 파악하는 스펙트럼 센싱 기술이다. 본 논문에서는 지금까지의 연구 결과를 토대로 레이더 대역 공유에 적합한 스펙트럼 센싱 기술들을 소개하고, 시뮬레이션을 통해 스펙트럼 성능을 비교하고자 한다.

Key Words : spectrum sharing, cognitive radio, spectrum sensing, radar, dynamic spectrum access

ABSTRACT

There has been a lot of research work aiming at enhancing the utilization efficiency of radio spectrum as the demand for frequency resource has been increasing. One of them is the concept of frequency sharing and cognitive radio has been attracting much attention as a means of realizing the frequency sharing concept. Recently, radar bands are emerging as promising candidates for applying the cognitive radio based frequency sharing. This is due to the fact that the radar bands are relatively wide in frequency and found to be underutilized and the gain of employing frequency sharing in them is expected to be significant. An important element of cognitive radio is the functionality of spectrum sensing which detects the presence of a primary user in a radar band. In this paper, based on the existing literature, we introduce spectrum sensing methods which are appropriate for radar signal detection and compare their spectrum sensing performances by simulation.

* 본 연구는 2018년도 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임 [B0718-16-1001, 군 주파수(Military Spectrum) 이용 고도화 기술 개발]

° First and Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-7022-8914)Pukyong National University Department of Electronic Engineering, chlim@pknu.ac.kr, 종신회원

* Radio Resources Research Group, Electronics and Telecommunication Research Institute, esjin@etri.re.kr; cjkim@etri.re.kr, 종신회원
논문번호 : 201809-265-A-RN, Received September 1, 2018; Revised November 16, 2018; Accepted November 26, 2018

1. 서 론

무선 통신 서비스는 그 편의성 때문에 서비스 규모와 종류가 괄목할만한 속도로 성장해왔으며, 앞으로도 꾸준히 성장할 것으로 예상된다. 그런데 무선 통신을 제공하려면 일단 기본적으로 필요한 주파수 자원이 확보되어 있어야 한다. 따라서 무선 통신 서비스가 확대된다는 것은 주파수 자원에 대한 수요 또한 늘어난다는 것을 의미한다.

하지만 주파수 자원이란 것이 필요에 따라 쉽게 확충할 수 있는 자원이 아니기 때문에, 주파수 자원 고갈에 대한 대비를 하지 않는다면 향후에는 늘어나는 주파수 수요를 충족하기 어려운 상황을 맞이할 수도 있다. 이에 지난 수 십년간 이 문제를 해결하기 위한 다양한 방안이 모색되어 왔다.

그 중의 하나로 최근 많은 주목을 받고 있는 방안이 주파수 공유 개념이다. 이 개념은 말 그대로 복수의 통신 시스템이 주파수 자원을 공동으로 사용하는 것을 의미하는 것으로 구체적인 공유 방안에 여러 가지 방식으로 세분화할 수 있다.

인지 무선(cognitive radio) 기술^[1]은 주파수 공유 개념을 구현할 수 있는 기술로서 원래 의미는 개별 통신 시스템 차원에서 주변 전파 환경을 인식하고 그에 맞게 통신 방식 등을 적절하게 제어하는 방식을 가리키는 것이었다. 그러나 최근에는 동적 스펙트럼 접근(dynamic spectrum access)을 실현할 수 있는 유력한 수단으로 널리 인식되어 우선 사용자(primary user)가 사용 권한을 갖고 있는 주파수 대역이 일시적으로 사용되지 않을 때, 이차 사용자(secondary user)로 하여금 해당 대역을 사용할 수 있게 하는 기술로 널리 알려져 있다.

인지 무선을 구성하는 요소 기술로는 여러 가지가 있을 수 있지만, 인지 무선의 역할을 고려할 때 무엇보다 중요한 것은 해당 대역에서 우선 사용자 신호의 존재 여부를 정확하게 파악하는 기술이며, 이를 스펙트럼 센싱^[2]이라고 부른다.

인지 무선 기술을 적용하는 주파수 대역으로는 그간 TV 대역이 많은 관심을 받은 바 있으며 IEEE802.22라는 표준안이 발표된 바 있다^[3]. 최근에는 레이더 대역이 이를 적용할 주파수 대역으로 떠오르고 있다. 레이더 대역은 레이더 시스템이 우선 사용권을 갖고 있는 대역으로 대역폭이 비교적 넓은 반면에 이용 효율이 낮은 것으로 알려져 있다^[4-5]. 그래서 이 대역에 인지 무선 등의 주파수 공유 기술을 적용한다면 주파수 이용 효율이 상당히 개선될 것으로 예상

되고 있다.

2003년 WRC 2003을 통해 처음으로 레이더 대역의 일부를 무선랜이 공유할 수 있도록 허용하는 결정이 내려진 바 있다^[6]. DFS(dynamic frequency selection)^[7-9]는 5GHz 대의 레이더 주파수 대역을 무선랜이 공유하기 위한 기술로서 무선랜은 이를 이용하여 레이더 신호가 발견되지 않는 채널을 검색하여 사용한다. DFS는 무선랜 장치가 레이더 대역의 우선 사용자인 레이더 시스템에 미치는 간섭을 방지하고 레이더 대역 전체를 끌고루 사용하려는 목표를 가지고 있으며, DFS에서 레이더 신호 검출 기능이 적용되는 주파수 대역의 범위는 5250 MHz ~ 5350 MHz 또는 5350 MHz ~ 5470 MHz로 알려져 있다.

DFS에서 사용하는 간단한 레이더 신호 검출 방식으로는 수신 신호 전력을 특정 임계값과 비교하여 레이더 신호를 검출하는 방식이 있다. 이는 무선랜 장치가 레이더 대역을 검사하는 시점에 레이더 신호를 제외한 다른 외부 신호는 존재하지 않는다는 것을 전제로 한 것이었다.

하지만 여러 무선랜 장치가 지역적으로 이웃한 경우에는 이러한 전제가 충족되지 않을 수 있기 때문에 수신 신호 전력만을 고려한 검출 방식은 바람직하지 않다. 그래서 수신 전력의 수준뿐만 아니라 수신 전력의 변화 그리고 펄스의 주기성 등 펄스 레이더 신호의 특징을 활용하여 레이더 신호의 존재 유무를 판단하는 형태로 발전하였다^[10,11]. 이런 방식들은 모두 수신 신호의 전력 수준을 임의의 임계값과 비교하는 형태를 갖고 있으므로 일반적인 스펙트럼 센싱 관점에서 보면 에너지 검파 방식을 기반으로 하고 있다고 분류할 수 있다.

이후 펄스 압축이 포함된 레이더 신호를 검출하기 위하여 정합 필터를 사용하는 레이더 신호 검출 방식이 언급된 바 있으며^[11], 또한 최근 인지 무선 영역에서 다양한 스펙트럼 센싱 방식이 발표된 바 있는데 이를 토대로 레이더 신호를 검출하는 방안이 발표된 바 있다^[12-14].

본 논문에서는 인지 무선을 레이더 대역에 적용하려고 할 때 가장 핵심적인 기술인 레이더 신호 검출에 대한 스펙트럼 센싱 기술들을 소개하고자 한다. 이를 위해 본 논문에서는 1장의 서론에 이어 2장에서는 레이더 신호 특성을 소개하고 3장에서 레이더 신호에 대한 기존의 검출 방식들을 형태별로 기술하고자 한다. 그리고 4장에서는 일반적인 스펙트럼 센싱 기술 중에서 레이더 신호 검출에 적용될 수 있는 기술들을 설명하고자 한다. 또한 5장에서는 시뮬레이션을 통해

레이더 신호에 대한 다양한 스펙트럼 센싱 방식의 스펙트럼 센싱 성능을 비교한 결과를 제시하고, 6장에서 결론을 맺고자 한다.

II. 펄스 레이더 신호 모델링

스펙트럼 센싱은 임의의 주파수 대역에서 우선 사용자 신호의 존재 유무를 파악하려는 기능으로 스펙트럼 센싱에 사용할 수신 신호의 n 번째 샘플을 $r(n)$ 이라고 하면, 스펙트럼 센싱 문제는 다음과 같이 가설 검정(hypothesis testing) 문제로 규정할 수 있다.

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

위 식에서 H_0 , H_1 은 각각 우선 사용자 신호가 존재하지 않는다는 가설과 존재한다는 가설을 가리킨다. 그리고 $w(n)$ 는 n 번째 잡음 샘플을 가리키는 것으로 평균이 0이고 분산이 σ_w^2 인 AWGN으로 설정한다. 또한 $s(n)$ 는 송신된 우선 사용자 신호의 n 번째 샘플을 나타내고, $h(n)$ 은 n 번째 시간에서 페이딩 특성을 표현하는 것이다.

레이더 신호를 검출하는 문제는 식(1)에서 $s(n)$ 이 레이더 펄스가 되는 경우이다. 레이더 송신기는 주어진 방향으로 주기적인 펄스를 내보내고 다시 방위각 방향을 변경하여 주기적인 펄스를 송신하는 형태를 반복적으로 수행하기 때문에 특정 방향으로 송신되는 레이더 신호의 변화를 시간에 따라 표현하면 그림 1에 나타낸 바와 같다.

그림에서 일련의 펄스 주기 간격으로 나타나는 펄스 군을 버스트(burst)라고 한다. 탐색 레이더 등에서는 레이더 송신기가 주기적으로 3600 방위각을 한 바퀴 회전하는 형태로 운영하기 때문에 버스트 또한 주기적으로 발생하며 버스트 주기는 레이더 송신 안테나의 방위각 방향의 회전 주기와 일치한다. 한 개의 레이더 펄스 형태는 펄스 압축(pulse compression) 방

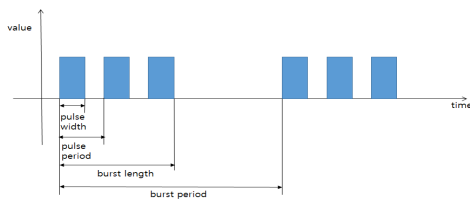


그림 1. 펄스 레이더 신호의 형태
Fig. 1. illustration of a pulse radar signal

식에 따라 결정된다^[15].

III. 기존의 펄스 레이더 신호 검출 방식

가장 처음에 등장한 레이더 신호 검출 방식은 JPT5G에서 제안한 펄스 레이더 신호 검출 방식[16]으로 알려져 있다. 이 방식은 수신 신호에 대하여 $0.1\mu s$ 동안 측정된 수신 신호 전력이 -61 dBm 이상이고, 해당 신호가 레이더 신호가 아니라는 것을 증명할 수 없다면 펄스 레이더 신호가 존재하는 것으로 판단하였다.

이 방식은 전력을 측정하는 기간 중에 레이더 신호 이외의 신호가 존재하지 않는 환경에 적절한 방식이라고 할 수 있다. 검파 임계값이 약간 다르기는 하지만 이와 유사한 방식으로 참고 문헌 [7]과 [9]가 있으며, 경우에 따라서는 검파 임계값이 한 개 이상인 경우가 있는데, 이는 무선랜의 송신 전력이 따라 달라진다. 이는 무선랜의 송신 전력이 따라 레이더에 미치는 영향이 달라질 수 있기 때문에 그 만큼 검파 임계값을 조정하는 것이다.

좀 더 개선된 방식으로 수신 전력 이외에 펄스 레이더 신호의 주기성을 추가로 확인하는 검출 방식^[8,10,17]이 있다. 이 중에서 참고 문헌 [8]은 펄스 폭이 $50ns \sim 100\mu s$ 이고, 펄스 시작점과 끝점을 전후로 $8dB$ 이상의 수신 전력 변화가 있는 신호를 레이더 펄스로 인정한다. 그리고 이들 펄스가 일정 시간 간격으로 반복되어야 한다는 검출 기준을 사용하는데, 수신 전력이 -55 dBm 이상인 펄스가 3개 이거나 수신 전력이 -61 dBm 이상인 펄스를 5개 이상 수신하는 경우에 펄스 레이더 신호가 존재한다고 판정한다. 이런 방식들은 수신 신호의 전력에 덧붙여 다른 특성들을 참고하여 펄스 레이더 신호의 존재 여부를 판정하기 때문에 다수의 무선랜 장치들이 지역적으로 이웃하여 서로 간섭을 줄 수 있는 환경에도 적용할 수 있다.

레이더 시스템의 탐지 거리를 확장하기 위해서는 펄스의 에너지를 높여야 한다. 이를 수행하는 방법은 송신 전력을 높이거나 펄스의 폭을 넓히는 방법이 있다. 전자의 경우는 송신기에서 사용하는 증폭기에 부담이 될 수 있어 후자의 방법을 선호한다. 하지만 펄스의 폭을 넓히면 탐지 거리에 대한 정확도가 낮아질 수 있어 이를 해결하는 방안으로 펄스 압축^[15]이라는 방법을 사용한다. 따라서 펄스 압축을 사용한 레이더 신호인 경우에는 그렇지 않은 방식보다 송신 전력 수준이 낮을 수 있기 때문에 앞서 언급한 수신 전력 기반 방식으로는 레이더 펄스 신호의 검출이 되지 않는

경우가 발생할 수 있다.

이러한 문제점을 해소하는 방안으로 정합 필터(matched filter)^[11]이 제안된 바 있다. 이 방식은 검출하고자 하는 레이더 펄스 신호의 수신 형태를 미리 알고 있는 경우라면 최적의 검출 성능을 발휘할 수 있지만, 수신 형태를 미리 알아야 하기 때문에 레이더 대역에 대한 스펙트럼 센싱 용도로 사용하기는 적합하지 않다.

IV. 펄스 레이더 신호 검출을 위한 스펙트럼 센싱 방식

일반적으로 스펙트럼 센싱 방식^[2]은 크게 3가지 종류로 구분할 수 있다. 첫번째는 감지하고자 하는 신호의 특성을 모두 알고 있는 경우에 사용할 수 있는 방법으로 정합 필터를 사용하는 것이다. 이 방식은 AWGN 환경에서 가장 좋은 검출 성능을 보이는 방식이지만, 스펙트럼 센싱 대상의 종류가 다양할 경우에 해당 방식마다 그에 대한 정합 필터를 구성해야 하기 때문에 구현 부담이 크다는 단점을 갖는다. 그리고 스펙트럼 센싱 환경에서는 신호 대 잡음비가 매우 낮을 수 있기 때문에 우선 사용자의 신호와 동기를 맞추는 것이 어려울 수 있다는 문제점을 갖는다.

두번째로는 통신 신호가 갖는 특성을 활용하는 방식으로 특징 검파(feature detection)라는 방식이다. 대표적인 특징으로는 해당 신호가 갖는 주기성^[18-21]이나 파일럿 심볼 특성^[22] 등이 있다. 일반적으로 디지털 통신 신호는 일종의 주기성(cyclostationarity)를 가지며 이를 이용하여 우선 사용자의 출현 여부 및 종류를 추정할 수 있다. 그러나 이 방식은 주기성의 종류가 많아질 경우에 주기성을 파악하는 센싱 방식의 복잡도가 빠르게 증가한다는 단점을 갖는다.

세번째로는 에너지 검파(energy detection)^[23] 방식이 있는데, 이는 수신 신호의 에너지를 측정하고 이를 임의의 기준값과 비교하여 우선 사용자의 활동 여부를 결정하는 방식이다. 이 방식은 단순히 수신 신호의 에너지를 측정된 값을 활용하는 방식이기 때문에 앞서 언급한 방식에 비해 매우 간단하다는 장점이 있으며, 검출 대상 신호의 특성을 전혀 모르는 경우에도 사용할 수 있다는 장점이 있다. 검출 대상 신호가 IID(independent and identically distributed) 통계 특성을 갖는 경우에는 최적의 검출 방식으로 알려져 있다. 하지만 잡음 전력을 정확히 모르는 경우에는 검파 임계값의 정확도가 떨어져 검출 성능이 상당히 떨어진다는 단점이 있다.

검출하려는 대상이 펄스 레이더 신호인 경우에 고려할 수 있는 기존의 스펙트럼 센싱 방식으로는 기본적으로 에너지 검파 방식이 포함되며 여기에 펄스 레이더 신호의 주기성을 활용하는 자기 상관 기반 방식^[24]과 주기적 정상성^[19-22]을 이용한 방식 그리고 고유값 비율을 활용한 방식을 고려할 수 있다. 지금부터 이들 방식들을 순차적으로 소개하고자 한다.

4.1 자기 상관 기반 스펙트럼 센싱 방식^[23]

펄스 레이더 신호는 일정한 주기로 동일한 형태의 펄스가 반복되는 특징을 갖는다. OFDM 신호인 경우에도 OFDM 심볼을 구성하는 신호 중에서 cyclic prefix에 해당하는 부분이 반복된다는 성질을 갖는데, 이를 활용하여 OFDM 신호의 유무를 판정하는 방법^[23]이 발표된 바 있다. 자기 상관 기반 스펙트럼 센싱 방식은 일정한 시간 간격을 둔 신호 성분 사이의 자기 상관(autocorrelation)을 검정 통계량으로 사용하는 방법으로 주기 신호 특성을 갖는 레이더 신호에도 적용할 수 있다.

[23]의 방식에 따르면 펄스 반복 주기가 N 이고 샘플 길이가 $M+N$ 인 수신 레이더 신호 $r(k)$ 에 대하여 검정 통계량 A_{AC} 은 다음과 같이 정의된다.

$$A_{AC} = \frac{\frac{1}{2M} \sum_{k=0}^{M-1} Re[r(k)r^*(k+N)]}{\hat{\sigma}_r^2} \quad (2)$$

위 식에서 $\hat{\sigma}_r^2$ 는 수신 신호 $r(k)$ 의 평균 전력을 의미한다. [23]의 내용에 따르면 레이더 신호가 존재하지 않는 경우(H_0)에는 검정 통계량 A_{AC} 은 $N(0, \frac{1}{2M})$ 분포를 따르는 것으로 알려져 있다. 따라서 임계값 T 에 따른 오경보 확률(false alarm probability) P_{FA} 는 다음과 같이 나타낼 수 있고

$$P_{FA} = P[A_{AC} > T|H_0] \quad (3)$$

이로부터 임계값 T 는 오경보 확률 P_{FA} 로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T = \frac{1}{\sqrt{2M}} Q^{-1}(P_{FA}) \quad (4)$$

4.2 주기적 정상성(cyclostationarity) 이용한 방식^[18]

어떤 확률 과정이 주기적 정상성을 갖는다는 것은 해당 확률 과정의 평균과 자기 상관 함수가 주기성을 갖는다는 것을 의미한다. 수신 신호 $r(n)$ 에 대한 자기 상관 함수 $R_r(n, \tau) \equiv E[r(n)r(n+\tau)]$ 가 주기 함수이면 다음과 같이 푸리에 급수로 전개할 수 있다.

$$R_r(n, \tau) = \sum_{\alpha \in Q} R_r(\alpha, \tau) e^{j2\pi\alpha n} \quad (5)$$

이때 $R_r(\alpha, \tau)$ 를 cyclic autocorrelation function(CAF)이라고 부르고, 이 값이 0이 되지 않는 α 를 cyclic frequency(CF)라고 하며 그 값들의 집합을 Q 로 정의한다. Q 는 신호마다 다른 형태를 가질 수 있으므로 신호를 구분하거나 신호의 존재 여부를 판단하는데 사용할 수 있다.

주어진 신호 $r(n)$ 의 길이가 M 일 때 CAF 추정값 $\hat{R}_r(\alpha, \tau)$ 는 다음과 같이 정의한다^[21]

$$\begin{aligned} \hat{R}_r(\alpha, \tau) &= M^{-1} \sum_{n=0}^{M-\tau-1} r(n)r^*(n+\tau) e^{-j2\pi\alpha n} \end{aligned} \quad (6)$$

그리고 $\hat{R}_r(\alpha, \tau)$ 에 대한 공분산 행렬을 $\hat{\Sigma}$ 라고 할 때, 검정 통계량 Λ_α 를 다음과 같이 계산하는데, 이는 $\hat{R}_r(\alpha, \tau)$ 성분간의 상관도를 제거하고 분산을 정규화하는 의미를 갖고 있다.

$$\Lambda_\alpha = M \hat{R}_r(\alpha, \tau) \hat{\Sigma}^{-1} \hat{R}_r(\alpha, \tau)^* \quad (7)$$

식(6)로 정의된 검정 통계량 Λ_α 는 통계적으로 χ^2 분포를 갖는 것으로 알려져 있다. 최종적으로 검정 통계량 Λ_α 을 임계값 T 와 비교하여 CF가 α 인 신호가 존재하는지 여부를 판정한다. $\hat{R}_r(n, \tau)$ 가 여러 가지 τ 에 대해서 주기성을 가질 때 $\hat{R}_r(\alpha, \tau)$ 는 그 길이가 τ 가짓수의 2배인 벡터가 된다. 따라서 τ 가짓수가 많은 경우에는 $\hat{\Sigma}$ 행렬의 역행렬 계산에 따른 연산량 부담이 커지기 때문에 주기적 정상성을 이용하는 방법은 다른 스펙트럼 센싱 방법에 비해 계산량이 높아질 수 있음을 알 수 있다. 정리하면 주기적 정상성을

이용한 스펙트럼 센싱 방법은 수신 신호로부터 CF와 CAF를 추정한 후, 출현 가능한 수신 신호의 CF 특성과 일치하는 지를 판단하는 것이다.

4.3 고유값 비율 기반 스펙트럼 센싱 방식^[25]

수신 신호 샘플로부터 자기 상관(autocorrelation) 행렬을 계산하고, 여기에서 도출한 고유값을 토대로 검정 통계량을 정의하는 방식들이 발표된 바 있는데, 그 중에 대표적인 방식이 고유값의 최대값과 최소값의 비율을 검정 통계량으로 하는 방식이다^[25]. 이 방식의 처리 과정을 설명하면 다음과 같다.

수신 신호 샘플을 $\{r(n), n=0, \dots, N-1\}$ 라고 할 때, 수신 신호 $r(n)$ 으로부터 다음과 같은 신호 벡터 $\hat{r}(n)$ 를 구성한다.

$$\hat{r}(n) = [r(n) \ r(n-1) \ \dots \ r(n-L+1)] \quad (8)$$

그리고 신호 벡터 $\hat{r}(n)$ 를 이용하여 다음과 같은 행렬 자기 상관 행렬 R 을 계산한다.

$$R = \frac{1}{N_s} \sum_{n=L}^{L-1+N_s} \hat{r}(n)\hat{r}^\dagger(n) \quad (9)$$

위 식에서 \dagger 는 전치와 켈레 복소수 연산을 의미하며, N_s 는 자기 상관 행렬 R 을 계산하는데 사용되는 신호 벡터 $\hat{r}(n)$ 의 개수이다. 그리고 자기 상관 행렬 R 에 대한 고유값 중에서 최대값과 최소값을 각각 λ_{\max} , λ_{\min} 이라고 할 때, 검정 통계량 Λ_{MME} 를 다음과 같이 정의한다.

$$\Lambda_{MME} \equiv \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} \quad (10)$$

4.4 공분산 행렬 기반 스펙트럼 센싱 방식^[26]

고유값 기반 방식은 공분산 행렬의 고유값을 계산해야 하기 때문에 계산량이 클 수 있다. 이에 대한 대안으로 공분산 행렬의 원소값을 기반으로 한 방식이 제안된 바 있다.

고유값 기반 스펙트럼 센싱 방식에서 정의한 공분산 행렬 R 의 m 행 n 열 원소를 r_{mn} 이라고 표기한다. 이때 행렬 R 의 대각선 원소들의 절대값의 합을 T_2 라고 하고, 행렬 R 의 전체 원소들의 절대값의 합을 T_1 이라 할 때, 공분산 기반 방식이 사용하는 검정 통계량 Λ_{CAV} 를 다음과 같이 정의한다.

$$A_{CAV} \equiv \frac{T_1}{T_2} \quad (11)$$

위 식에서 $T_1 = \sum_{n=1}^L \sum_{m=1}^L |r_{nm}|$, $T_2 = \sum_{n=1}^L |r_{nn}|$ 로 표현할 수 있다.

수신 신호에 잡음만 포함된 경우에는 자기 상관 행렬 R 의 원소 중에서 대각선에 있지 않은 원소의 값이 0에 가까와지기 때문에 A_{CAV} 의 값이 1에 근접할 것이다. 하지만 수신 신호에 신호가 포함된 경우에는 T_1 이 T_2 보다 커지기 때문에 검정 통계량 A_{CAV} 이 1보다 크게 될 것이다. 이러한 차이를 이용하여 우선 사용자 신호의 존재 여부를 판단하는 방식이 공분산 행렬 기반 방식이다. 공분산 행렬 기반 방식은 인접 시간대에 나타나는 수신 신호 샘플간의 통계적 상관도를 활용한 방식인데, 이를 여러 수신 안테나를 통해 수신한 샘플간의 상관도를 활용한 방식으로 확장한 것이 참고 문헌 [27]의 연구 결과이다.

지금까지 펄스 레이더 신호 검출에 적합한 스펙트럼 센싱 방식을 살펴보았다. 이 방식들의 복잡도를 복소 곱셈 계산량 측면에서 비교하면 표 1에 정리한 바와 같다. 표에서 보는 바와 같이 에너지 검파 방식과 자기 상관 기반 방식이 계산량 측면에서 상대적으로 유리함을 확인할 수 있으며, 고유값 기반 방식은 자기 상관 행렬의 크기와 관련된 L 이 커지면 계산량이 빠르게 증가함을 알 수 있다.

반면에 공분산 기반 방식은 고유값을 구하는 과정을 포함하고 있지 않기 때문에 고유값 기반 방식에 비해 계산량 측면에서 유리함을 알 수 있다. 참고로 주기적 정상성 기반 방식에 대한 복소 곱셈 계산량 표현

에서 L_{sw} 는 윈도우 길이를 가리킨다. 개별 스펙트럼 센싱 방식이 정상적으로 동작을 하기 위해서는 사전 정보가 필요할 수 있는데, 표에서 보는 바와 같이 자기 상관 기반 방식과 주기적 정상성 기반 방식은 레이더 펄스 주기에 대한 정보를 필요로 하는 반면 고유값 기반 방식이나 에너지 검파 방식은 그렇지 않음을 알 수 있다.

V. 스펙트럼 센싱 방식 비교

본 절에서는 기존의 스펙트럼 센싱 방식 중에서 에너지 검파, 자기 상관 함수, 주기적 정상성 기반 방식, 고유값 기반 방식, 공분산 기반 방식을 선택하여 레이더 신호 검출 모의 실험을 수행하였다.

성능 평가를 위해 사용하는 레이더 신호는 펄스 폭은 1 μ s, 레이더 펄스 반복 주기(PRI)는 100 μ s로 설정하였으며, 센싱 시간은 1ms로 하고, 샘플링 속도는 5 MHz로 하였다. 관측창의 시작 시점은 펄스 반복 주기 내에서 균일 분포를 갖는 것으로 하였다. 검출에 사용하는 임계값은 목표 오경보 확률이 0.01, 0.05, 0.1 인 세 가지 경우에 대하여 실험적으로 결정하였으며, 배경 잡음 전력의 불확실성은 0 dB, 1 dB, 2 dB 라는 세 가지 경우를 고려하였고, 송신 레이더 신호는 10 Hz의 도플러 주파수 영향을 반영하는 레일리 페이딩 채널을 거쳐 수신되는 것으로 가정하였다.

여기에서 잡음 전력 불확실성이 α dB 라는 것은 측정된 잡음 전력이 \hat{N}_0 dB 일 때 실제 잡음 전력 N_0 dB 가 $[\hat{N}_0 - \alpha, \hat{N}_0 + \alpha]$ 의 범위에서 균일 분포를 갖는다는 것을 의미한다.

그림 2는 잡음 전력의 불확실성에 따라 오경보 확률이 어떻게 달라지는가를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 에너지 검파 방식은 잡음 전력의 불확실성에 따라 많은 영향을 받는다. 하지만 다른 방식들은 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 이는 해당 방식들이 사용하는 검정 통계량이 잡음 전력과 무관하기 때문이다.

한편 그림 3과 그림 4는 각각 SNR이 -6dB 일때와 0 dB일 때 오경보 확률과 검파 확률의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 기본적으로 SNR이 증가하면 동일한 오경보 확률에 대한 검파 확률이 개선됨을 확인할 수 있다. 그리고 앞서도 언급한 바와 같이 에너지 검파 방식은 잡음 전력 불확실성이 존재하는 경우에 오경보 확률이 상당히 증가하기 때문에 결과적으로 오경보 확률 대비 검파 성능이 상

표 1. 여러 가지 검출 방식의 계산량과 검출 대상 신호에 대한 정보 비교
Table 1. Comparison of computational complexities and a priori information for a variety of spectrum sensing schemes

Sensing scheme	Computational complexity	A priori information
Autocorrelation	$2M - N$	pulse period(N)
Cyclostationarity	$M/2 \times \log_2 M + M + 2L_{sw} + 13$ [20]	pulse period(N)
Eigenvalue	$LN_s + O(L^3)$	None
Covariance	$LN_s + 1$	None
Energy	M	None

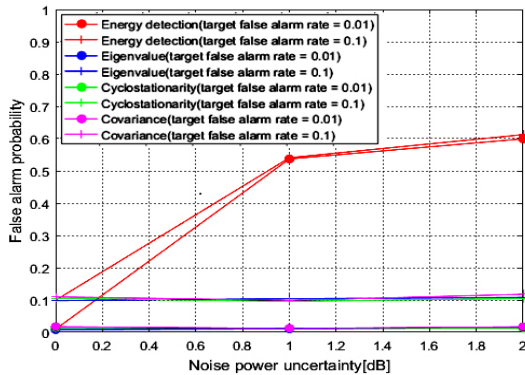


그림 2. 잡음 불확실성에 따른 오경보 확률의 변화
Fig. 2. False alarm probability versus noise power uncertainty

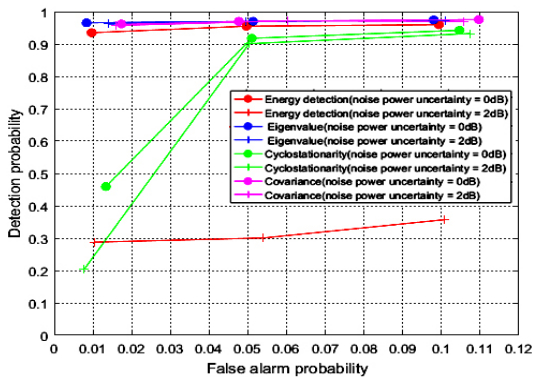


그림 3. SNR=-6dB일때 오경보 확률 대비 검파 확률
Fig. 3. Detection probability versus false alarm probability for SNR=-6dB

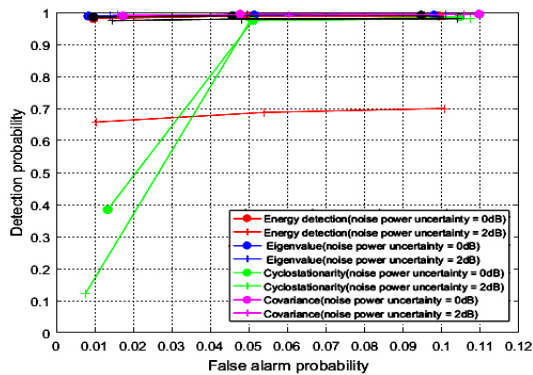


그림 4. SNR=0dB일때 오경보 확률 대비 검파 확률
Fig. 4. Detection probability versus false alarm probability for SNR=0dB

대적으로 상당히 악화됨을 알 수 있다.

스펙트럼 센싱 성능 비교 대상으로 선택한 센싱 알고리즘 중에서는 자기 상관 기반 방식이 가장 우수한

성능을 나타내는데, 이는 펄스 레이더 신호가 주기성을 갖고 있으며 펄스가 있는 시점 이외에는 잡음만 있는 형태여서 레이더 신호 존재 여부에 따른 검정 통계량 분포의 차이가 자기 상관 방식인 경우 가장 크기 때문이다. 하지만 이 방식은 펄스 반복 주기를 알고 있어야 한다는 제약 조건을 갖는다.

전체적으로 볼 때 검출에 필요한 사전 정보가 필요한 경우에는 자기 상관 기반 방식이 가장 우수한 성능을 보이고, 그렇지 않은 경우에 대하여는 고유값 기반 방식, 공분산 기반 방식이 가장 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있다.

VI. 결론

레이더 주파수 대역은 대역폭인 넓은 반면 레이더 시스템이 독점적으로 사용하는 경향이 있는 대역이라 이용률이 높지 않은 것으로 알려져 있다. 이용률을 개선하려는 노력의 일환으로 무선랜이 5GHz의 레이더 대역을 공유하는 방안인 DFS 기술이 제안된 바 있다. 최근 주파수 공유 기술의 하나로 인지 무선 기술이 많은 관심을 모으고 있으며 이를 레이더 주파수 대역을 공유하는 용도로 사용하려는 시도가 진행되고 있다.

주파수 공유 목적으로 인지 무선을 사용함에 있어 가장 핵심적인 요소 기술이 스펙트럼 센싱 기술인데, 본 논문에서 기존의 스펙트럼 센싱 기술 중에서 레이더 신호에 대한 스펙트럼 센싱 기술로 활용될 수 있는 방식들을 소개하고, 시뮬레이션을 통해 스펙트럼 센싱 방식들의 성능을 비교하였다. 이는 향후 레이더 대역에 인지 무선을 도입하는 방안을 모색하는데 많은 도움이 될 것으로 예상된다.

References

- [1] J. Mitola, "Cognitive radio: Making software radio more personal," *IEEE Pers. Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 48-52, Aug. 1999.
- [2] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Commun. Survey Tuts.*, vol. 11, pp. 116-130, Mar. 2009.
- [3] C. R. Stevenson, G. Chouinard, Z. Lei, W. Hu, S. J. Shellhammer, and W. Caldwell, "IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 1, pp.

- 130-138, Jan. 2009.
- [4] A. Martian, C. Vladeanu, I. Marcu, and I. Marghescu, "Evaluation of spectrum occupancy in an urban environment in a cognitive radio context," *Int. J. Advances in Telecommun.*, vol. 3, no. 3, pp. 172-181, 2010.
- [5] F. Paisana, N. Marchetti, and L. A. DaSilva, "Radar, TV and cellular Bands: which spectrum access techniques for which bands?," *IEEE Commun. Surveys & Tuts.*, vol. 16, no. 3, pp. 1193-1220, 2014.
- [6] The Wi-Fi Alliance, "Spectrum sharing in the 5 GHz Band DFS best practices," Tech. Rep., Oct. 2007.
- [7] ETSI EN 301 893 V1.5.1, "Broadband radio access networks (BRAN); 5 GHz high performance RLAN; harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive," Dec. 2008.
- [8] IEEE Std 802.11h-2003, "Spectrum and transmit power management extensions in the 5 GHz band in Europe," Oct. 2003.
- [9] Rec. ITU-R M.1652, *Dynamic frequency selection (DFS) in wireless access systems including radio local area networks for the purpose of protecting the radio determination service in the 5 GHz band*, 2003.
- [10] W. McFarland, C. Zeng, and D. Dhamdhere, "Radar detection and dynamic frequency selection for wireless local area networks," USA: 6,697,013 B2, Feb. 2004.
- [11] J. Sydor and S. Chow, "Draft Canadian analysis for BWAS and RADAR," IEEE 802.RR-02/039r0, Mar. 2002.
- [12] C. H. Lim, "Energy detection based spectrum sensing for radar signals in the presence of noise power uncertainty," *J. KICS*, vol. 42, no. 5, pp. 982-984, 2017.
- [13] C. H. Lim, et al., "Detection of pulse radar signals using the maximum to minimum power ratio," *J. KICS*, vol. 41, no. 12, pp. 1762-1764, 2016.
- [14] C. H. Lim, et al., "Detection of a radar signal using the periodicity of its autocorrelation function," *J. KICS*, vol. 41, no. 7, pp. 732-737, 2016.
- [15] B. R. Mahafza, *Radar systems analysis and design using MATLAB*, CRC Press, 2013.
- [16] V. Hayes, "Report of IEEE 802 rado regulatory group relating to DFS and JPT5G proposal," IEEE 802.RR-02/018A-d2, Jan. 2002.
- [17] M. Wen and L. Hanwen, "Radar detection for 802.11a systems in 5GHz," *Int. Conf. Wireless Commun., Netw. and Mob. Comput.*, pp. 512-514, Sept. 2005.
- [18] A. V. Dandawate and G. B. Giannakis, "Statistical tests for presence of cyclostationarity," *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 42, no. 9, pp. 2355-2369, Sept. 1994.
- [19] J. Lunden, V. Koivunen, A. Huttunen, and H. V. Poor, "Spectrum sensing in cognitive radios based on multiple cyclic frequencies," *Cognitive Radio Oriented Wireless Netw. and Commun.*, pp. 37-43, Aug. 2007.
- [20] A. Al-Habashna, O. A. Dobre, R. Venkatesan, and D. C. Popescu, "Second-order cyclostationarity of mobile WiMAX and LTE OFDM signals and application to spectrum awareness in cognitive radio systems," *IEEE J. Sel. Topics in Sign. Process.*, vol. 6, no. 1, pp. 26-42, Feb. 2012.
- [21] A. Al-Habashna, O. A. Dobre, R. Venkatesan, and D. C. Popescu, "WiMAX signal detection algorithm based on preamble-induced second-order cyclostationarity," *IEEE Global Telecommun. Conf.*, pp. 1-5, Dec. 2010.
- [22] D. Cabric, A. Tkachenko, and R. W. Brodersen, "Spectrum sensing measurements of pilot, energy, and collaborative detection," *MILCOM*, pp. 1-7, 2006.
- [23] H. Urkowitz, "Energy detection of unknown deterministic signals," in *Proc. IEEE*, vol. 55, no. 4, pp. 523-532, Apr. 1967.
- [24] S. Chaudhari, V. Koivunen, and H. V. Poor, "Autocorrelation-based decentralized sequential detection of OFDM signals in cognitive radios," *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 57, no. 7, pp. 2690-2700, Jul. 2009.
- [25] Y. Zeng and Y. C. Liang, "Eigenvalue-based

spectrum sensing algorithms for cognitive radio," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 6, pp. 1784-1793, Jun. 2009.

- [26] Y. Zeng and Y. Liang, "Spectrum-sensing algorithms for cognitive radio based on statistical covariances," *IEEE Trans. Vehicular Technol.*, vol. 58, no. 4, pp. 1804-1815, May 2009.
- [27] D. A. Guimarães and C. H. Lim, "Sliding-window-based detection for spectrum sensing in radar bands," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 7, pp. 1418-1421, Jul. 2018.

임 창 현 (Chang Heon Lim)



1986년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업
1988년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
1993년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
1994년 8월~현재 : 부경대학교 전자공학과 교수

<관심분야> 통신공학, 레이더 신호처리

진 은 속 (Eun Sook Jin)



2000년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 졸업
2002년 2월 : 포항공과대학교 대학원 전자전기공학과 석사
2002년 2월~현재 : 한국전자통신연구원 연구원
<관심분야> 무선통신, 이동통신, Cognitive Radio 등

김 창 주 (Chang Joo Kim)



1976년~1980년 : 한국항공대학교 전자공학과 졸업
1986년~1988년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
1989년~1993년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
1979년 12월~1983년 3월 : ADD 연구원

1983년 3월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원
1994년~1998년 : 한국전자통신연구원 전파신호처리연구실장
1999년~2001년 : 한국전자통신연구원 이동통신모델연구부장
2003년~2010년 : 한국전자통신연구원 전파기술연구부장
<관심분야> 이동통신, 전파기술, Cognitive Radio 기술