

스펙트럼 센싱을 위한 순환 주기도표와 FAM 기반의 신호 탐지 성능 분석

김지현¹, 박근호¹, 서영광¹, 서원기², 김형남¹
 부산대학교 전자공학과¹, (주)넥스윌²

hnkim@pusan.ac.kr

Performance Analysis of Cyclic-Periodogram and FAM based Signal Detections for Spectrum Sensing

Ji-Hyeon Kim¹, Geun-Ho Park¹, Young-Kwang Seo¹, Won-Gi Seo², Hyoung-Nam Kim¹
 Pusan National University¹, Nextwill²

요약

인지 무선 (Cognitive Radio) 환경에서는 우선 사용자의 스펙트럼 사용 현황을 파악하는 스펙트럼 센싱이 핵심적인 기술이라고 할 수 있다. 스펙트럼 센싱 방식 중에는 순환정상 특징 검출 방식 기반 방법 중 구현이 가장 간단한 순환 주기도표 (cyclic periodogram) 방법이 존재한다. 이 방법은 각 고속 푸리에 변환 (fast Fourier transform, FFT)의 주파수 bin에서의 검출 결과를 도출한다. 순환 주기도표 방법보다 성능이 우수한 FAM (FFT Accumulation Method) 방법은 시간 영역에서 윈도우를 적용하고 평균하여 검출을 수행하여 우수한 탐지 성능을 보일 수 있지만 연산량이 많다는 단점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 우선 사용자의 신호를 빠르고 정확하게 탐지하기 위해 탐지 성능 측면에서 순환 주기도표 방법과 FAM 방법의 비교함으로써 두 방법의 성능 차이를 도출하고자 한다. 모의실험을 통해 순환 주기도표와 FAM 방법의 우선 사용자 신호의 검출 성능을 비교 및 분석한다.

I. 서론

정보통신 시스템에서 사용자의 고속화 및 광대역 멀티미디어 서비스의 요구로 한정된 주파수 자원에 대한 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 상황을 해결하기 위한 대안 기술 중 하나로 각광 받고 있는 인지 무선 (cognitive radio) 기술은 스펙트럼 환경을 측정하여 사용하지 않는 주파수 대역을 선정하고 기존의 전파 환경과 양립하면서 전파 혼신 없이 주파수를 공동 사용하는 기술을 말한다[1].

이와 같은 인지무선 기술에서 스펙트럼 센싱 단계는 외부의 통신환경 정보를 획득하는 것으로서, 스펙트럼을 할당 받은 우선 사용자 (primary user)의 스펙트럼 사용 현황을 판단하는 핵심 기술이라 할 수 있다. 스펙트럼 센싱 방식 중 순환정상 특징 검출 방식 (cyclostationary feature detection)은 대부분의 통신 신호 구조에서 평균 및 자기상관과 같은 통계적 특성이 시간의 함수로 주기적으로 변하는 특징을 바탕으로 신호 탐지를 수행한다 [2]. 순환정상 특징 검출 방식 중에는 구현이 가장 간단한 방법인 순환 주기도표 (cyclic periodogram)와 연산량이 많이 요구되지만 스펙트럼 추정 성능 측면에서 우수한 FAM 방법이 존재한다[3]. 이러한 방법들에 대한 비교를 위해서는 우선 사용자의 신호가 존재하는 스펙트럼을 빠르고 정확하게 추정함에 있어서 연산량과 탐지 성능의 두 가지 측면에서 각 알고리즘을 평가해야 한다.

이를 위해 본 논문에서는 모의실험을 통해 ROC (receiver operating characteristic) 곡선으로부터 순환 주기도표와 FAM의 탐지 성능을 비교 및 분석하고, FAM의 탐지 성능이 우수함을 보인다.

II. 순환정상 특징 검출 방식을 이용한 우선 사용자 신호 검출 알고리즘

대부분의 디지털 통신 신호는 통계적 특성이 주기적인 순환정상 특성을 가지므로 순환정상 특징 검출방식을 이용하여 우선 사용자의 신호 탐지를 수행할 수 있다. 랜덤 프로세스 $x(t)$ 가 순환정상 특성을 가진다고 할 때, 평균과 자기 상관이 일정한 값인 T_0 의 주기를 가지게 되며, 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$M_x(t+T_0) = M_x(t), \quad (1)$$

$$R_x\left(t+\frac{\tau}{2}, t-\frac{\tau}{2}\right) = R_x\left(t+T_0+\frac{\tau}{2}, t+T_0-\frac{\tau}{2}\right). \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 $R_x\left(t+\frac{\tau}{2}, t-\frac{\tau}{2}\right) = E\left[x\left(t+\frac{\tau}{2}\right)x^*\left(t-\frac{\tau}{2}\right)\right]$, $M_x(t) = E[x(t)]$ 를 나타낸다. 이 때, 자기상관이 주기적이므로 식 (3)과 같이 푸리에 급수 (Fourier series)로 표현할 수 있다.

$$R_x\left(t+\frac{\tau}{2}, t-\frac{\tau}{2}\right) = \sum_{\alpha} R_x^{\alpha}(\tau) e^{j2\pi\alpha t}, \quad \alpha = \frac{n}{T_0}. \quad (3)$$

여기서, α 는 순환 주파수 (cyclic frequency)를 의미하며 $R_x^{\alpha}(\tau)$ 는 순환 자기상관함수 (cyclic autocorrelation function, CAF)를 나타낸다.

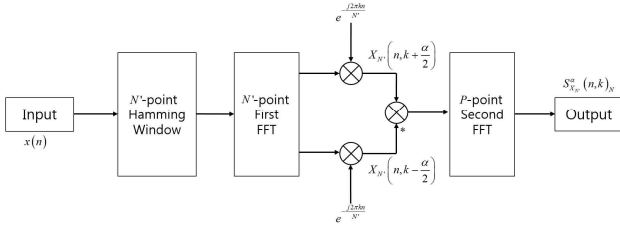


그림 1. FAM 방법의 블록 다이어그램.

순환 자기상관함수를 푸리에 변환함으로써, 순환 스펙트럼 상관함수 (spectral correlation function, SCF)를 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$S_x^\alpha(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x^\alpha(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau. \quad (4)$$

순환정상 특징 검출 방식은 식 (4)의 순환 스펙트럼 상관함수를 미리 결정한 임계 값 γ 와 비교하여 다음과 같은 이진 가설 검정 (binary hypothesis test)을 통해 검출 확률을 구할 수 있다.

$$\begin{cases} |S_x^\alpha(f)| \leq \gamma : H_0, \\ |S_x^\alpha(f)| > \gamma : H_1. \end{cases} \quad (5)$$

식 (5)에서 H_0 는 잡음 신호만 존재하는 가설이며, H_1 은 우선 사용자 신호가 존재하는 가설을 의미한다.

SCF 를 추정하는 가장 간단한 방법인 순환 주기도표 방법은 신호의 k 번째 고속 푸리에 변환 bin 의 주기도표 값과 미리 결정한 임계 값을 비교한다[4]. 수신 신호를 $x(t)$ 라 하면, 순환 주파수 α 에 따른 로그 스케일의 순환 주기도표는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_x^\alpha(f_k) = \begin{cases} 10\log_{10}\left(\frac{1}{T} X_T\left(f - \frac{\alpha}{2}\right) X_T^*\left(f + \frac{\alpha}{2}\right)\right), & \alpha \neq 0, \\ 10\log_{10}\left(\frac{1}{T} |X_T(f_k)|\right), & \alpha = 0. \end{cases} \quad (6)$$

여기서, $X_T(f_k)$ 는 관측 시간 T 동안의 수신 신호 $x(t)$ 의 FFT 결과를 의미한다. 순환 주기도표를 이용한 검출 확률은 아래와 같은 가설 검정을 통해 구할 수 있다.

$$\begin{cases} P_x^\alpha(f_k) \leq \gamma : H_0 \text{ at } k\text{th FFT bin,} \\ P_x^\alpha(f_k) > \gamma : H_1 \text{ at } k\text{th FFT bin.} \end{cases} \quad (7)$$

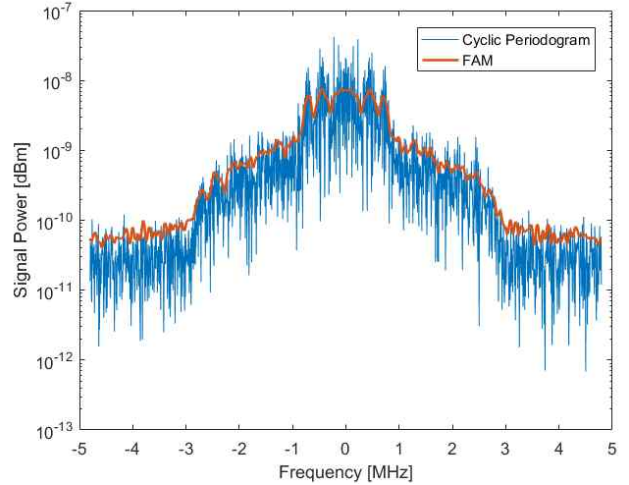


그림 2. 순환 주기도표와 FAM 방법에 따른 신호의 파워 스펙트럼 비교 ($\alpha = 1$ MHz).

FAM (FFT accumulation method) 방법[5]은 유한한 관측 시간 T 에서 N 개의 샘플을 사용하여 순환 주기도표의 시간평균을 함으로써 더 정확한 SCF 를 추정할 수 있으며, FAM 방법의 블록 다이어그램은 그림 1 에서 나타낸 것과 같다. FAM 방법을 사용하여 추정된 SCF 는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{X_{N'}}^\alpha(n, k)_N = \frac{1}{P} \sum_{l=0}^{P-1} \left[\frac{1}{N'} X_{N'}\left(n + lK, k + \frac{\alpha}{2}\right) X_{N'}^*\left(n + lK, k - \frac{\alpha}{2}\right) \right]. \quad (8)$$

위의 식에서 N' 은 윈도우 내의 FFT 샘플의 개수이며, l 은 윈도우의 개수, $X_{N'}(n, k)$ 는 이산신호 $x(n)$ 의 N' 샘플만큼의 FFT 결과 중 k 번째 bin 를 의미한다.

샘플 블록의 개수인 $K = N'/J$ 이고, $(1 - \frac{1}{J})N'$ 의 샘플이 중첩된다. 이 때, J 는 중첩 계수이며, J 가 1 이면 중첩은 일어나지 않는다. 순환 주파수 α 에 따른 로그 스케일의 FAM 기반 SCF 추정 결과와 이를 이용한 검출 확률은 각각 다음 식과 같은 가설 검정을 통해 구할 수 있다.

$$F_{X_{N'}}^\alpha(n, k)_N = 10\log_{10}\left(|S_{X_{N'}}^\alpha(n, k)_N|\right). \quad (9)$$

$$\begin{cases} F_{X_{N'}}^\alpha(n, k)_N \leq \gamma : H_0 \text{ at } k\text{th FFT bin,} \\ F_{X_{N'}}^\alpha(n, k)_N > \gamma : H_1 \text{ at } k\text{th FFT bin.} \end{cases} \quad (10)$$

III. 모의실험

모의실험에서는 임계 값과 오경보 확률에 따른 우선 사용자 신호의 검출 확률을 분석한다. 대역이 제한된 이진 위상 편이 변조 (binary phase shift keying, BPSK) 신호를 모의 실험의 우선 사용자 신호로 선택하였다. 펄스 정형 필터 (pulse shaping filter)인 SRRC (squared-root-raised-cosine) 필터를 사용하였고, 롤-오프 계수를 1 로 설정하였다. BPSK 신호는 9.6 MHz 로 샘플링하였고 관측 시간은 0.16 ms, 기저대역에서의

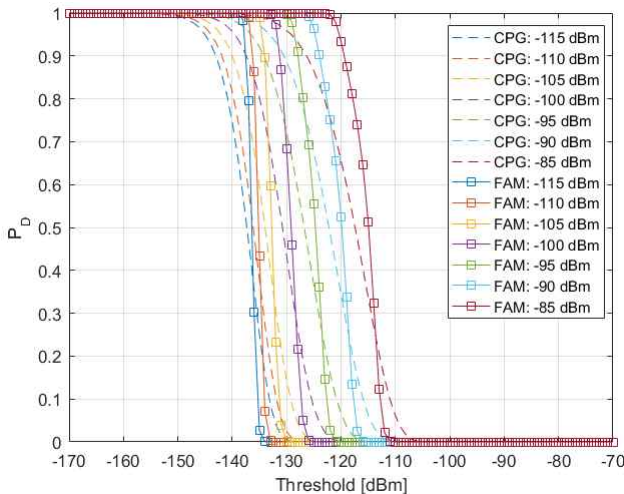


그림 3. 임계 값에 따른 순환 주기도표와 FAM 방법의 검출 확률 비교.

대역폭이 1 MHz 인 신호를 고려하였다. 또한, 1 Hz 당 잡음 전력은 -174 dBm/Hz 이므로 주기도표의 주파수 대역 잡음 레벨은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-174 + 10 \log_{10} \left(\frac{f_s}{N} \right). \quad (11)$$

식 (11)에서 N 은 FFT 샘플의 개수이며, f_s 은 샘플링 주파수이다. 또한, 순환 주파수는 $\alpha = 1$ MHz 를 사용하여 순환 주기도표와 FAM 을 유도하였다.

그림 2 는 순환 주기도표 방법과 FAM 방법을 통해 얻어진 우선 사용자 신호의 파워 스펙트럼을 나타낸다. 그림 2 에서 나타낸 것과 같이, 잡음 레벨은 FAM 방법에서 훨씬 낮은 분산을 보인다. 잡음 분산이 낮으면 임계 값 대비 신호의 검출 확률이 높아지므로 FAM 방법은 오경보 확률을 줄일 수 있다. 그림 3 은 임계 값에 따라 식 (7)로부터 구해진 신호의 검출 확률을 순환 주기도표와 FAM 방법을 비교하였다. 그림 3 에서 보면, -115 dBm 에서 -85 dBm 까지의 신호 전력에 대해 FAM 방법이 순환 주기도표 방법보다 검출 확률이 높은 것을 확인할 수 있다. 그림 4 는 오경보 확률에 따라 두 방법의 검출 확률을 비교하기 위해 ROC (receiver operating characteristic) 곡선을 나타낸다. 그림 4 에서 확인할 수 있듯이, 순환 주기도표 방법보다 FAM 방법의 성능이 더 우수한 것을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 순환정상 특징 검출 방식을 기반으로 하여 순환 주기도표와 FAM 방법에 따른 우선 사용자 신호의 탐지 성능을 비교 및 분석하였다. 모의실험을 통해 FAM 방법이 순환 주기도표 방법보다 탐지 성능이 우수하다는 것을 확인하였다. 시간 윈도우를 적용한 신호의 SCF 를 구하고 평균함으로써 주파수 대역에서의 잡음 레벨 분산을 줄일 수 있기 때문에 오경보 확률이 감소하고 검출 확률이 증가한다. 그러나, FAM 은 순환 주기도표 방법보다 연산량이 많아 수행 속도가 느리다는 단점이 있다. 본 연구 결과를 바탕으로 향후에는 FAM 방법에 사용되는 여러 파라미터의 변화에 따른 성능 비교를 수행하고 연산량 대비 탐지 성능을 최적화하는 연구를 수행할 예정이다.

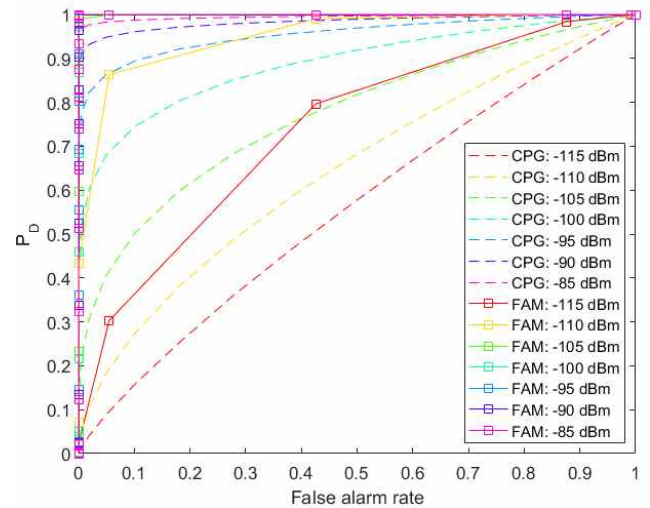


그림 4. 오경보 확률에 따른 순환 주기도표와 FAM 방법의 검출 확률 비교 (ROC 곡선).

참고 문헌

- [1] 김재명, "Cognitive Radio 기술의 구조 및 응용", 한국통신학회지(정보와통신), 24(9), pp. 31-41, 2007. 9.
- [2] V.Prithviraj, "Cyclostationary Analysis Method of Spectrum Sensing for Cognitive Radio", *IEEE International Conference on Wireless VITAE*, Mar. 2011.
- [3] Mohammed I.M. Alfaqawi, "Wireless distributed computing for cyclostationary feature detection", *Digital Communications and Networks*, vol. 2, pp. 47-56, Feb. 2016.
- [4] A. Napolitano, "Cyclic Statistic Estimators With uncertain Cycle Frequencies", *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 63, no. 1, pp. 649-675, Jan. 2017.
- [5] Deepa Bhargavi, "Performance Comparison of Energy, Matched-Filter and Cyclostationarity-Based Spectrum Sensing", *IEEE International Workshop on SPAWC*, Jun. 2010.