

ATSC 신호 검출을 위한 고분해능 사이클로스테이션너리(Cyclostationary) 스펙트럼 센싱

High Resolution Cyclostationary Spectrum Sensing for ATSC Signal Detection

유도식*, 임종태*, 강민홍*, 임선민**

Do-Sik Yoo*, Jong-Tae Lim*, Min-Hong Kang* and Sun-Min Lim**

요 약

본 논문에서는 주파수 사용 효율 증대를 위한 사이클로스테이션너리 특징 검출 (Cyclostationary Feature Detection; CFD)방식의 ATSC 신호 검출 알고리즘을 고려한다. 현재 IEEE 802.22 표준화 기구에 제안된 알고리즘들 중 IEEE 802.22의 권고사항을 충분히 만족시키는 알고리즘으로 사이클로스테이션너리 특징 검출 방식에 기반한 톰슨(Thomson)사의 알고리즘이 있다. 본 논문에서는 톰슨사의 알고리즘보다 계산량이 적으면서 톰슨사의 알고리즘의 성능에 필적할 만한 성능을 갖는 보간법 기반 ATSC 스펙트럼 센싱 알고리즘을 제안한다. 제안하는 보간법 기반 알고리즘은 시간영역에서의 영삽입(Zero-Padding) 방법과 효과적인 센싱 스캔 방법을 사용하여 적은 계산량으로 톰슨사의 성능에 필적하는 성능을 보여준다.

Abstract

In this paper, we consider a cyclostationary-feature-detection based spectrum sensing algorithm for ATSC signal detection. One of the proposed algorithms for IEEE 802.22 standardization organization which meet the requirements of IEEE 802.22 is Thomson's algorithm based on cyclostationary feature detection. We propose an interpolation-based spectrum sensing algorithm for ATSC signal detection, which has less computation complexity than that of Thomson's algorithm and provides no performance loss compared to Thomson's algorithm. By using zero-padding in time domain and effective sensing scanning method, the proposed algorithm requires less computational complexity and shows no performance degradation compared to Thomson's algorithm.

Key words : Cognitive Radio, Spectrum Sensing, ATSC, Signal Detection, Cyclostationary

I. 서 론

근래에 새로이 각광받고 있는 인지 무선 통신 기

술 (Cognitive Radio Technology)은 기존의 통신 기술 환경에 혁명적인 변화를 가져다 줄 기술로 기대되고 있다[1]. 인지 무선 통신 기술이라고 하면 통신이 이

* 홍익대학교 전자전기공학부(School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

**한국전자통신연구원 (Electronics and Telecommunications Research Institute)

· 교신저자 (Corresponding Author) : 임종태

· 투고일자 : 2009년 4월 7일

· 심사(수정)일자 : 2009년 4월 13일 (수정일자 : 2009년 6월 3일)

· 게재일자 : 2009년 6월 30일

루어지고 있는 주변 상황을 감지하여 실시간으로 최적 통신 방식을 결정하는 기술을 말한다. 현재는 비교적 연구 초기단계로서 주로 주파수 사용 현황을 파악하여 유휴 주파수자원을 최적으로 활용하는 방향으로 연구가 진행되고 있다. 특히, 주파수 사용 효율 증대의 요구를 수용하기 위해, 미국의 FCC (Federal Communications Commission)는 인지무선통신기술의 적용 가능성을 매우 적극적으로 모색하면서 다양한 정책적인 대응을 하고 있다 [2]. 이러한 발빠른 대응의 결과로 미국에서는 가까운 시기에 텔레비전 방송 영역에서 인지무선통신이 상용화될 가능성이 열리고 있다.

유휴 주파수를 사용하는 인지무선통신 기술이 가능하기 위해서는 관심 대상 주파수 영역에서 통신이 이루어지고 있는지를 판정할 수 있는 효과적인 알고리즘이 필수적이다. 특히, 디지털 TV 방송과 같이 인가를 받은 사용자가 있는 주파수 대역의 경우에는 인가 받은 서비스를 방해해서는 안 된다는 강력한 제한요건이 있다. 따라서, 방송 수신이 가능한 가장 약한 신호조차도 감지되면 인지무선통신이 허용되지 않게 된다. 또한 숨겨진 터미널 (hidden terminal) 문제가 생길 위험을 감안하기 위해서 추가적으로 일정한 정도의 마진을 두어야 하기 때문에 실질적으로 매우 낮은 신호조차도 검출해 낼 수 있는 알고리즘이 필요한 실정이다.

현재, 인지무선통신 기술의 표준화를 진행하고 있는 IEEE 802.22 표준화 그룹에서는 디지털 TV 신호의 경우, 신호대 잡음비 (Signal to Noise Ratio, SNR)가 -20.8dB일 때 오경보 (False Alarm) 확률과 미검출 (Miss Detection) 확률이 각각 0.1미만이 되도록 해야 한다고 권고하고 있다. 에너지 검출과 같은 기술로는 이러한 조건을 만족시키기 어려우나, 검출대상 신호가 어떤 특정한 성질을 갖는 경우에는 그 특징을 활용하여 위와 같이 까다로운 조건을 만족시키는 기술을 모색할 수가 있다 [3]. 특히, 미국의 디지털 TV 방식인 ATSC (Advanced Television Systems Committee) 방식 [4]의 신호의 경우에는 특정 주파수에 강한 파일럿을 보내도록 하고 있어, 이 신호를 검출하는 알고리즘을 구현하는 방식으로 높은 검출 성능을 얻을 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 러한 협대역 신호 검

출에 우수한 성능을 나타내는 사이클로스테이션너리 특징 검출 (Cyclostationary Feature Detection; CFD) 방식을 이용하고자 한다.

CFD 방식의 스펙트럼 센싱 방식은 이미 여러 연구자들에 의해 연구가 되어 왔으나, IEEE 802.22의 권고사항을 충분히 만족시키는 알고리즘이 개발된 것은 톰슨(Thomson)사와 Rutgers 대학의 공동연구에 의해서였으며 이는 비교적 최근의 일이다 [5]. 이 연구 그룹은 CFD를 디지털 신호처리 기법으로 구현하는 과정에서 많은 성능 열화가 일어난다는 사실을 발견하고 이를 극복하기 위해 특별한 기법을 제안하였다. 그러나, 이들이 제안한 기법은 높은 성능을 보여주고는 있으나 계산량이 많다는 단점이 있다.

톰슨사에서 제안한 기법이 나타내는 성능 향상의 가장 중요한 요인은 주파수 영역에서의 분해능 향상이다. 본 논문은 톰슨사가 제안된 알고리즘보다 훨씬 간단한 방식인 영삽입(Zero-Padding)에 기반한 보간법으로 주파수 영역에서의 분해능을 향상시킴으로써 적은 계산량으로 톰슨사의 알고리즘에 필적하는 성능을 보여주는 센싱방식을 제안한다.

II. 스펙트럼 상관 밀도 (Spectral Correlation Density; SCD)

CFD 방식으로 ATSC 신호를 검출하기 위해서 확률과정 (Random Process) $x(t)$ 의 순환자기상관함수 (Cyclic Auto-correlation Function)을 아래와 같이 정의한다 [6]. 여기서 α 는 순환주파수 (Cyclic frequency)라고 한다.

$$R_x^\alpha(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t + \frac{\tau}{2}) \cdot x(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f_c t} dt \quad (1)$$

이 순환자기상관함수의 푸리에 변환 (Fourier Transform)을 통해 전력스펙트럼밀도함수 (PSD, power spectral density)를 구하고, 이것을 순환 스펙트럼 밀도 함수 (Cyclic Spectrum Density function) 혹은

스펙트럴 상관밀도 함수 (SCD, Spectral Correlation Density function)이라 한다.

본 논문에서는 여러 종류의 스펙트럴 상관밀도 (SCD) 함수 중에 다음의 식으로 정의되는 스펙트럼 스무딩(Spectrally Smoothing)에 의한 SCD 함수를 사용한다.¹⁾

$$S_x^\alpha(f) = \limlim_{F \rightarrow 0, T \rightarrow \infty} \frac{1}{TF} \int_{f_c - \frac{F}{2}}^{f_c + \frac{F}{2}} X_T(t, f + \frac{\alpha}{2}) \cdot X_T^*(t, f - \frac{\alpha}{2}) df \quad (2)$$

이를 구현하는 실제 디지털 시스템에서는 이산신호가 사용되기 때문에 식 (2)를 디지털 시스템에서 구현할 수 있는 형태로 표현해야 한다. 따라서, STFT (Short Time Fourier Transfotm)을 FFT 알고리즘에 의해 표현하면 식 (2)을 아래의 식 (3)으로 표현할 수 있다. 여기서 $F_s = 1/NT_s$ 는 샘플링 주파수이고 $l = F_s/f, \alpha = 2DF_s$ 로 나타낸다.²⁾

$$S_x^\alpha[l] = \frac{1}{(N-1)T_s} \frac{1}{M} \sum_{k=-\frac{(M-1)}{2}}^{\frac{(M-1)}{2}} X[l + D + k] \cdot X^*[l - D + k] \quad (3)$$

위 식을 이용하여 각각의 순화주파수에 대해 SCD를 구하고 $|S_y^\alpha[0]|$ 의 최대값을 통해 신호의 존재 여부를 판단하게 된다.

III. 보간법 기반 검출 알고리즘

3-1 톰슨(Thomson)사의 알고리즘

신호 검출 성능은 주파수 영역에서의 분해능 (resolution)을 높임으로서 향상시킬 수 있다. 인접 주파수 성분 사이의 공간이 $F_s = 1/NT_s$ 로 나타나기

때문에 주파수 영역에서의 분해능을 높이기 위해서는 이산신호 샘플의 개수 N (DFT 사이즈)를 증가시켜야 하는 문제가 발생한다. DFT 사이즈의 증가는 복잡도를 증가시키게 되므로 되도록 작은 DFT 사이즈로 원하는 성능을 갖도록 하는 방법이 고안되어야 한다. 이를 위한 방법으로서 톰슨사에서는 받은 신호 $x(t)$ 가 μ 만큼 다운 컨버전(Down-Conversion)된 신호 $x(t, \mu)$ 를 이용하여 DFT 사이즈를 증가시키지 않으면서 주파수 영역에서의 분해능을 높일 수 있는 방법을 제안하였고, 그 식은 다음과 같다 [5].

$$S_x^\alpha[l] = \frac{1}{(N-1)T_s} \frac{1}{M} \sum_{\mu=-\frac{(M-1)}{2}}^{\frac{(M-1)}{2}} X[l + D, \mu] \cdot X^*[l - D, \mu] \quad (4)$$

$$X[k, \mu] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n, \mu] e^{-j2\pi kn/N}$$

3-2 보간법 기반 알고리즘

톰슨사의 알고리즘은 높은 성능을 보여 주지만 계산량이 많다는 단점을 가지고 있다. 톰슨사의 알고리즘이 계산량이 많은 이유는 무엇보다도 각 α 값에서 신호가 있는지 검출하려 할 때마다 FFT를 새로이 실행하여야 하기 때문이다. 따라서, 우리는 성능은 비슷하지만 계산량은 훨씬 줄어드는 보간법기반 검출 알고리즘을 제안한다. 제안한 보간법 기반 검출 알고리즘은 시간영역에서의 영삽입을 통해 주파수 성분을 보간함으로써 최소의 계산량만을 요구량을 요구한다. 즉 이산 신호 샘플에 영삽입을 통해 샘플 수를 늘리고 영삽입된 신호에 DFT를 적용하여 얻어진 DFT 신호를 이용하여 SCD의 값을 구한다. 이 경우 DFT 신호의 해상도는 영삽입된 샘플의 비율에 따라 증가하게 되고 증가된 해상도에 의해 보다 성능이 높은 SCD에 의한 신호 검출을 하게 된다.

IV. 성능 분석

그림 1은 [5]에 제시된 ATSC 실측 신호 A-L에 대해 보간법을 식 (2)를 이용한 사이클로스테이션너리 (Cyclostationary) 검출기의 성능을 나타낸다. 이 결과

¹⁾ $X_T(t, \lambda) = \int_{t-T/2}^{t+T/2} x(\lambda) e^{-j2\pi \nu \lambda} d\lambda$

²⁾ $X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi kn/N}$

는 사이클로스테이션너리를 이용한 스펙트럼 센싱 기법의 성능의 비교 분석에 기초로 활용된다. 그림에서 평균 성능을 고려한다면 SCD를 이용한 간단한 검출법만으로도 IEEE 802.22의 규정 사항을 만족하고 있다. 하지만, 신호 F나 신호 L만 고려해 본다면 이러한 조건이 만족되고 있지 않하 추가적인 성능향상이 요구된다.

그림 2와 그림 3는 각각 톰슨사에서 제시한 알고리즘과 본 논문에서 제시한 보간법기반의 알고리즘을 사용했을 때의 사이클로스테이션너리 검출기의 성능을 나타낸다.

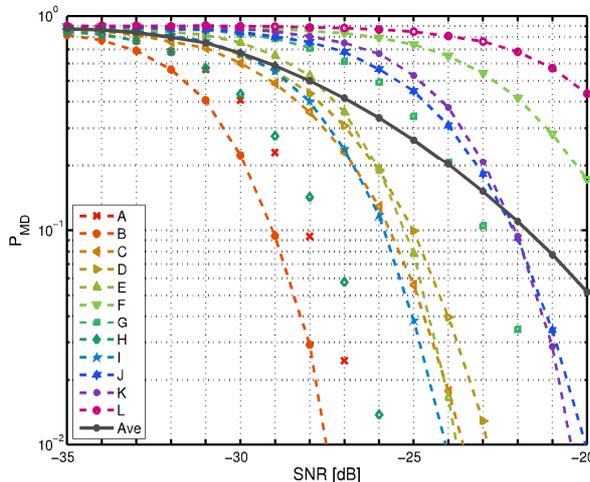


그림 1. SCD를 이용하는 기본 시스템의 성능
Fig. 1. Performance of baseline system

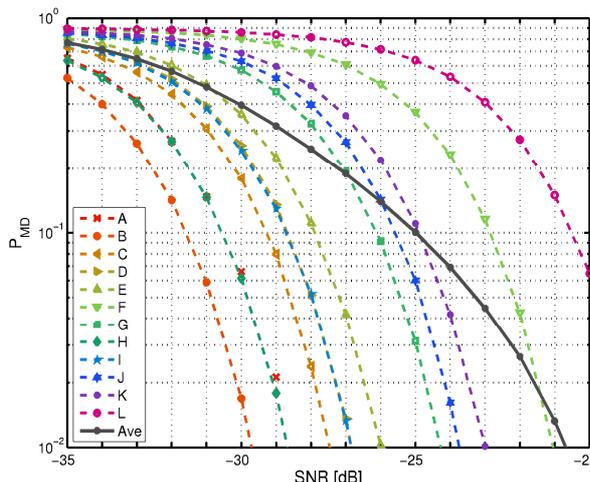


그림 2. 톰슨사의 알고리즘의 성능 (N=2048, M=5)
Fig. 2. Performance of Thomson's method(N=2048, M=5)

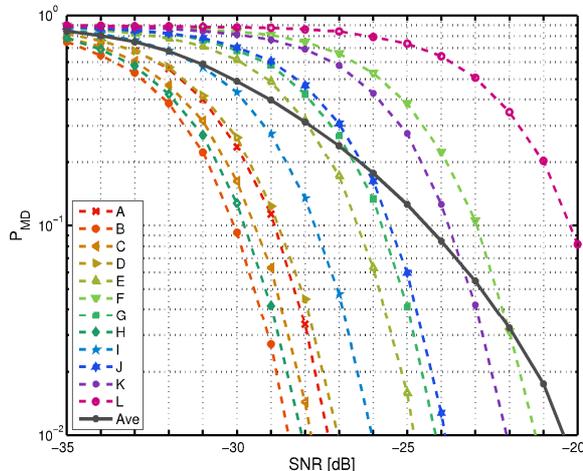
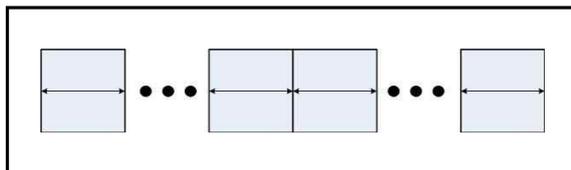


그림 3. 보간법 기반 알고리즘의 성능
Fig. 3. Performance of Interpolation-based algorithm

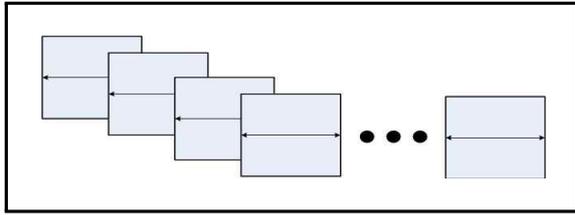
그림 3은 N=2048의 샘플에 시간영역에서 영삽입을 통해 8192개의 샘플을 얻은 뒤 사이클로스테이션너리 검출을 한 결과를 나타낸다. 그림 3,4,5를 비교해보면 보간법을 사용한 알고리즘은 사용하지 않을 때와 비교했을 때 약 2.5dB 정도의 성능 향상을 볼 수 있고, 이것은 톰슨사의 알고리즘과 비교해도 근접한 성능임을 알 수 있다. 표 1은 100,000 패킷을 처리하는데 소요된 시간을 비교한 결과이며, 보간법을 사용한 알고리즘이 톰슨사의 알고리즘에 비해서 약 20% 정도의 계산량만을 필요로 함을 알 수가 있다. 따라서, 우리가 제시한 알고리즘이 톰슨사의 알고리즘과 비슷한 성능을 가지면서 처리속도가 훨씬 더 빠르다는 것을 알 수 있다.

표 1. 시뮬레이션 수행 시간 비교
Table 1. Comparison of simulation time

| 알고리즘 | 시간 (초) (10 ⁵ 패킷당) |
|----------------|---------------------------------|
| 톰슨사의 알고리즘 | 687 |
| 제안한 알고리즘 (k=4) | 131 |



(a) 부분스캔기법
(a) Partly scanning algorithm



(b) 중복 스캔 기법

(b) Overlap scanning algorithm

그림 4. 주파수 영역에서 스펙트럼 센싱 스캔 방법
Fig. 4. Spectrum sensing algorithm in frequency domain

또한, ATSC의 파일럿 신호가 존재하는 특정 주파수의 위치를 비교적 정확히 알 수 있는 경우는 그림 4-(a)와 같이 그 주변으로부터 스캔해 나가는 방법을 통해 계산량을 추가로 감소시킬 수 있다. 즉, 총 N개의 주파수 샘플이 있기는 하지만, 그 중 실제 파일럿 신호가 존재할 가능성이 가장 많은 K개의 주파수 샘플만을 이용하여 먼저 검출을 시도한 뒤 신호가 검출되지 않는 경우에는 주변의 K개의 주파수를 추가로 스캔해 나가는 방식이다. 이런 방법을 통해 얻을 수 있는 계산량 감소 기대치는 실제적인 환경과 파일럿 위치 추정 정보의 정확도 등 다양한 문제와 관련되어 있으나, 직전 신호검출 시도시 신호검출에 성공한 경우라면 또다시 같은 위치에서 신호가 검출될 확률이 높아 상당량의 계산량 감소를 기대할 수 있다. 그림 5은 K=8인 경우의 부분 스캔 기법을 적용한 보간법 기반의 센싱 성능을 나타낸다. 이 경우에 그림 3에서와 같은 보간법을 사용했지만 다소간의 성능저하가 나타나는데 이것은 신호가 K=8 샘플의 가장자리 부분에 걸리기 때문이다. 즉, 신호가 그림 6-(a)의 신호형태 I과 같은 경우라면 비록 가장자리에 걸리더라도 K=8 샘플안에 모든 파일럿 에너지가 포함되지만 신호가 그림 6-(b)의 신호형태II와 같다면 모든 파일럿 에너지가 포함되지 않게 된다는 것이다. 이러한 문제점은 주변주파수를 추가로 스캔해 나갈 때 그림 4-(b)에서처럼 가장자리 부분을 약간씩 중복되게 스캔해 나감으로써 해결할 수 있다. 중복스캔을 하게 되면 신호가 그림 6-(b)의 신호형태II와 같아도 샘플 내에 파일럿의 에너지가 대부분 포함되기 때문이다. 그림 7은 4개의 샘플씩 중복되게 스캔해 나감으로써 부분 스캐닝으로 인한 성능저하를 많이 줄일 수 있음을 보여주고 있다.

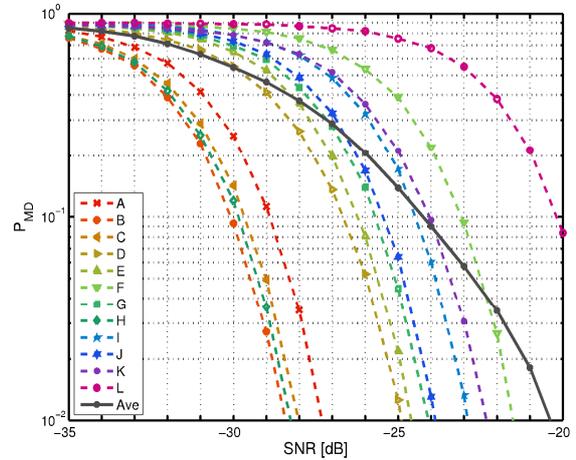
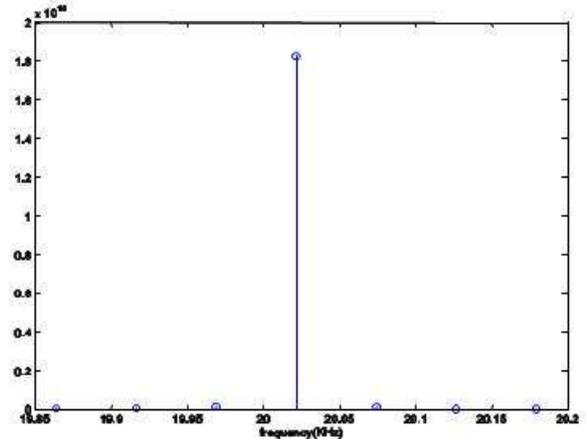
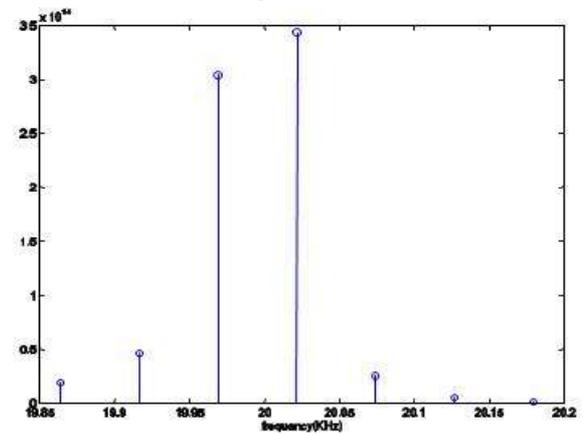


그림 5. 부분 스캔 기법의 성능 (K=8)
Fig. 5. Performance of partly scanning algorithm(K=8)



(a) 신호형태 I
(a) Signal Shape I



(b) 신호형태 II
(b) Signal Shape II
그림 6. 서로 다른 신호 형태
Fig. 6. Signal Shapes

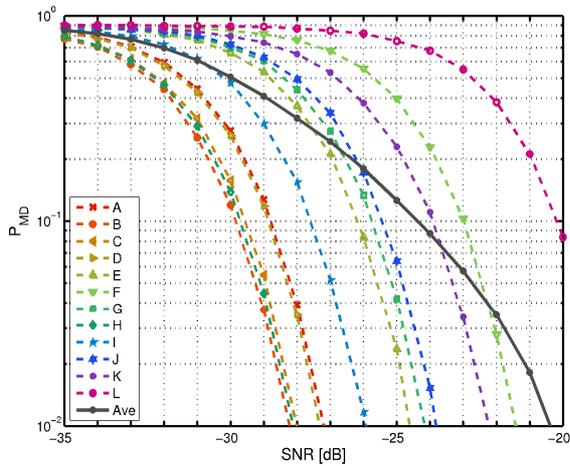


그림 7. 중복 스캔 기법의 성능 (K=8)
 Fig. 7. Performance of overlap scanning algorithm(K=8)

V. 결 론

본 논문에서는 현재까지 알려진 ATSC 신호 검출 알고리즘 중 가장 높은 성능을 나타내는 사이클로스테이션너리 기반의 센싱 방법인 톱슨사의 알고리즘의 성능에 매우 근접하면서도 계산량은 대폭 감소된 보간법 기반 스펙트럼 센싱 기법을 제안하였다. 또한 신호가 존재하는 특정 주파수의 위치 정보에 기반한 중복 부분 스캔 기법을 통해 성능 열화없이 상당량의 계산량을 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT 신성장동력 핵심기술개발 사업의 일환으로 수행하였음

[2005-S-002-04, 스펙트럼 사용효율 개선을 위한 cognitive radio 기술]

참 고 문 헌

[1] J. Mitola III, "Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio," Ph. D. Thesis, *Royal Institute of Technology, Sweden*, May2000.

[2] FCC. ET Docket No. 03-322, Notice of Proposed Rule Making and Order, Dec. 2003.
 [3] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Vuran, and S.Mohanty, "A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks," *IEEE Comm. Magazine*, pp. 40-48, April 2000.
 [4] ATSC Digital Television Standard, Revision E with Amendments No. 1 and No. 2, ANNEX D, ATSC, Sept. 2006
 [5] H.-S. Chen, W. Gao, D. G. Daut, "Spectrum Sensing Using Cyclostationary Properties and Applications to IEEE 802.22 WRAN," *IEEE Globecom 2007*, pp. 3133-3138, Nov. 2007.
 [6] W. A. Gardner, *Statistical Spectral Analysis: A Nonparametric Theory*, Prentice-Hall, 1987.
 [7] W. A. Gardner, *Measurement of Spectral Correlation: IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 8, No. 2, pp. 14-36, April 1991.

유 도 식 (兪堵植)



1990년 8월 : 서울대학교 전기공학과
(공학사)

1994년 2월 : 서울대학교 물리학과 (이
학석사)

2002년 4월 : University of Michigan, 전
기공학과 (공학박사)

2002년 2월 ~ 2003년 10월 미시간대학교 박사후 연구원

2006년 9월 ~ 현재 홍익대학교 전자전기공학부 조교수

관심분야 : 통신이론, 무선통신 시스템 설계, 정보이론,
부호이론, 네트워크 정보이론 등

임 종 태 (林鍾泰)



1989년 2월 서울대학교 전자공학과
(공학사)

1991년 2월 서울대학교 전자공학과
(공학석사)

2001년 8월 The University of Michigan
at Ann arbor (공학박사)

2004년 9월 ~ 2008년 2월 한국항공대학교 항공전자 및
정보통신 공학부 조교수

2008년 3월 ~ 현재 홍익대학교 전자전기공학부 조교수

관심분야 : 디지털 통신 및 방송 시스템

강 민 홍 (姜旻永)



2007년 8월 : 홍익대학교 전자전기공학
부(공학사)

2007년 9월~현재 : 홍익대학교 전자정
보통신공학과

관심분야 : 디지털 통신

임 선 민 (林宣旻)



2000년 2월 : 충남대학교 정보통신공
학과 졸업

2002년 2월 : 충남대학교 정보통신공
학과 석사

2005년 2월: 충남대학교 정보통신공학
과 박사과정 수료

2006년 9월 ~ 현재 : 한국전자통신연

구원 인지무선연구팀

관심분야 : 통신 신호 처리, 인지 무선 시스템