

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.1.105>

IIBC 2015-1-13

자동 반복 프로토콜을 적용한 하이브리드 협력 공유 기법

Method for Hybrid Cooperative Sharing applied Automatic Request Protocol

공형윤*

Hyung-Yun Kong*

요 약 인지 통신 네트워크에서 1차 송신단과 수신단 사이의 신호 대 잡음 비가 높을 경우 1차 네트워크의 수신 품질이 우수함으로 네트워크 간 지속적인 협력을 요구하지 않는다. 그러므로 협력을 필요로 하는 2차 시스템(보조)에게 스펙트럼을 제공하지 않는다. 본 논문에서는 간섭이 존재하지 않을 때 스펙트럼 공유의 빈도를 연구하였다. 또한 인지 네트워크의 1차 시스템은 2차 시스템(보조)으로 인해 신호 대 잡음 비가 낮아지게 되며 이로 인한 스펙트럼 공유의 빈도의 증가에 초점을 맞추었다. 모의실험 및 이론적 결과를 바탕으로 기존의 기법에 비해 제안된 기법 스펙트럼 효율 향상을 증명한다.

Abstract In cognitive radio networks, when the signal-to-noise ratio (SNR) of the link between a primary transmitter and receiver is sufficiently high, the primary transmission does not frequently demand cooperation because direct transmission of the primary communication is usually successful. Therefore, there are few opportunities for a secondary transmitter to cooperate with the primary user system in exchange for an opportunity to share the spectrum. This article proposes a scheme in which the secondary system can deliberately degrade the SNR of the primary transmission, making it so that the primary system needs cooperation from the secondary nodes, and thereby increases opportunities for spectrum sharing.

Key Words : Cognitive Radio, Spectrum Sharing, Optimal Transmitting Power

1. 서 론

일반적인 무선 주파수 대역은 특정 무선 서비스를 위해 사용되며 허가되지 않은 서비스는 주파수 사용에 제한을 받는다. 스펙트럼 접근에 관련된 기존의 기법은 무선 스펙트럼 자원의 단편화 및 스펙트럼 활용 효율의 저하로 인해 현재 환경에서는 적합하지 않다. 스펙트럼이 부족한 현재의 무선 환경에서는 새로운 기술 개발이 필요하였으며^[1], 현재 스펙트럼 활용률이 낮은 구간을 찾는

인지 통신에 대한 연구가 활발하다^[2]. 인지 통신은 언더레이 스펙트럼 공유 모델, 오버레이 스펙트럼 공유 모델 중 하나를 기반으로 한다^[3-6]. 본 논문에서는 언더레이 스펙트럼 공유 모델을 적용하였으며 기존의 연구에서는 언더레이 스펙트럼 공유 모델에서 협력 및 공유 기법에 초점을 맞추었다^[7-11]. 이 기법에서 2차 전송으로 인한 간섭이 1차 수신기의 허용 범위일 경우 1차 전송은 2차 노드를 돕는다. 스펙트럼 공유의 동작으로 인해 1차 전송의 횟수가 줄어들게 되지만 시스템 간 충돌을 완화시킬 수

*정회원, 울산대학교 전기전자정보시스템공학부
접수일자 : 2014년 9월 24일, 수정완료 : 2014년 12월 25일
게재확정일자 : 2015년 2월 13일

Received: 24 September, 2014 / Revised: 25 December, 2014

Accepted: 13 February, 2015

*Corresponding Author: hkong@mail.ulsan.ac.kr

School of Electrical Engineering, University of Ulsan, Korea

있다. 또한 협력을 통해 1차, 2차 시스템은 스펙트럼 공유의 수준을 유동적으로 변경할 수 있다. 1차 사용자는 협력에 의존하여 2차 사용자에게 공유되는 스펙트럼의 양을 결정할 수 있지만 2차 사용자는 스펙트럼 공유의 수요에 의존하여 1차 사용자의 협력 수준을 결정할 수 있다^[9-12]. 협력 공유 기법에서는 전력 할당 인자를 통해 협력 공유의 수준을 제어하는 방식이 제안되었다^[11]. 그러나 협력 공유 기법은 동일한 신호를 전송하기 위해 두 개의 시간 슬롯을 사용함으로써 비효율적이다.

따라서 본 논문에서는 두 가지 공유 모델을 사용하는 하이브리드 공유 모델을 제안한다. 첫째로 협력을 하지 않는 공유 모델, 둘째로 협력을 하는 공유 모델이다. 첫 번째 시간 슬롯에서 1차 송신기와 2차 송신기는 동시에 자신의 신호를 전송하는 비협력적인 공유를 허용한다. 협력 공유 슬롯에 대한 요청의 평균 수, 나크 메시지의 평균 횟수는 적절한 비율이 되도록 2차 사용자의 간섭을 조정한다. 따라서 협력의 빈도가 높아진다. 그러므로 첫 번째 시간 슬롯에서 의도적으로 비협력 스펙트럼 공유를 허가함으로써 열화를 보상할 수 있다. 협력 시간 슬롯에서 [11]에서 제안된 협력 공유 모델을 적용한다. 본 논문에서 협력과 공유가 발생하는 시간 슬롯은 협력 공유 시간 슬롯(두 번째 시간 슬롯)이라고 한다. 또한 열화를 보상하며 협력 공유 비를 최대화하기 위해 첫 번째 시간 슬롯동안 사용할 수 있는 최적의 2차 전송 전력을 선택하는 것을 시행한다. 프레임 오류율, 스펙트럼 효율 및 평균 송신 전력의 관점에서 시스템의 성능을 연구한다.

II장에서는 협력 스펙트럼 공유 모델을 제시하고 표기법을 설정하며 III장에서는 협력 공유 비의 최적화 문제를 공식화하며 2차 시스템의 송신 전력을 선택하기 위해 3가지 방법을 제안한다. IV장에서는 복호 및 스펙트럼 효율을 고려하여 시스템의 기본 성능에 대한 설명을 하며 V장에서는 모의실험 결과를 분석하며 결론을 끝으로 마무리한다.

II. 시스템 모델

본 논문의 시스템 모델은 그림 1과 같이 구성되어 있으며 1차 송신단과 수신단은 T_p , D_p , 2차 송신단은 R_i , R_A , 2차 수신단은 D_s 이다. 1차 패킷에 대한 전송 시간은 두 시간 슬롯으로 나누어져 있으며 첫 번째 시간 슬롯과

공유를 위한 두 번째 시간 슬롯으로 구성된다. 첫 번째 시간 슬롯에서 1차 신호는 T_p 에서 D_p , R_A 로 전송된 뒤 복호하며, 그와 동시에 R_i 는 자신의 신호를 D_s 로 전송한다.

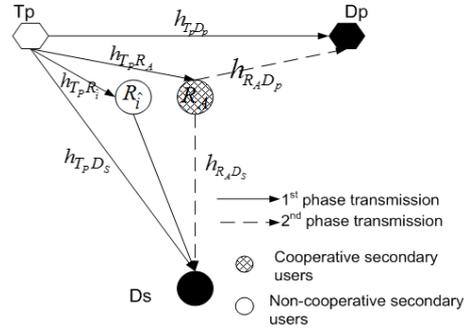


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model

동일한 시간에 자신의 메시지를 전송하는 R_i 과 T_p 는 두 시스템 사이에 어떠한 협력을 포함하지 않으며 비협력 공유 기법을 표현한다. D_p 는 1차 신호가 성공적으로 복호될 경우 아크 메시지로 응답한다. 또한 1차 신호의 재전송을 하기 위해 2차 사용자가 필요하다는 것을 나크 메시지를 통해 응답한다. 다중 2차 송신기로부터의 협력은 공간 다이버시티의 사용을 가능하게하며 스펙트럼 공유로 열화를 보상한다. 첫 번째 시간 슬롯에서 노드 R_A 가 1차 신호를 정확하게 복호한다면 중계기와 같이 동작하여 1차 신호를 D_p 로 전송한다. 그러나 어떠한 2차 사용자도 1차 신호를 복호하지 못할 경우 T_p 는 D_p 로 1차 신호를 재전송한다.

1차 시스템으로부터 협력이 요구될 경우 특정한 2차 사용자는 중계기처럼 활용된다. 그러나 도움에 대한 비용을 지불해야 하며 이것은 중계기가 자신의 메시지를 전송하기 위해 스펙트럼을 사용하는 것을 의미한다. 협력 공유 기법은 이러한 방식으로 동작하게 된다. 노드 R_A 는 $0 \leq \alpha \leq 1$ 인 조건에서 1차 신호의 전력을 $(1-\alpha)E_p$ 로 2차 신호의 전력을 αE_p 로 구성한 뒤 신호를 중첩하여 협력 공유 전송을 수행한다[11]. 이러한 복합 신호는 협력 공유 시간 슬롯에서 D_p 와 D_s 로 전송된다. 또한 2차 사용자가 협력을 사용할 수 없을 경우, 즉 2차 사용자가 첫 번째 시간 슬롯에서 1차 신호를 복호하지 못할 경우 T_p 는 $\alpha=1$ 의 전송 전력으로 재전송하며 이 경우 2차 전송은 제한된다.

본 논문에서 정의되는 확률 $\bar{P}_{FER, D_p}^{(1)}$, $\bar{P}_{FER, R_A}^{(1)}$ 은 노드 D_p , R_A 의 프레임 오류율이다. 나크 메시지는 2차 송신단으로부터 협력에 대한 요구로 사용되며 나크 메시지가 전송되었을 때 협력 기법을 통해 스펙트럼이 공유된다. 따라서 스펙트럼 공유의 작동원리가 본 논문에서 제시된 협력 공유인 경우, D_p 가 1차 신호를 복호하기 때문에 직접 통신의 신호 대 잡음 비가 충분히 높을 때 약간의 스펙트럼 공유가 발생된다.

본 논문에서 제시된 스펙트럼 공유 기법은 1차 링크의 높은 신호 대 잡음 비의 조건에서 수행되는 것으로 가정한다. 실제로 1차 송신단과 수신단이 가까이 위치했을 경우 1차 연결에서 높은 신호 대 잡음 비가 발생된다. 첫 번째 시간 슬롯에서 D_p 와 R_i 는 다음과 같은 신호를 수신한다.

$$y_j^{(1)}(l) = \sqrt{E_p} h_{T_{pj}}^{(1)} x_p(l) + \sqrt{E_{s1}} h_{R_{ij}}^{(1)} x_{s1}^{(1)}(l) + n_j^{(1)}(l) \quad (1)$$

위 식 (1)에서 x_p 는 1차 메시지이며 E_p 의 전력으로 전송한다. 또한 x_{s1} 은 2차 메시지이며 E_{s1} 의 전송 전력으로 노드 R_i 에서 전송한다. 또한 x_p 와 x_{s1} 은 G_1, G_2 의 코드 생성기로 구성된 컨벌루션 코드이며 BPSK 모듈레이션을 사용한다고 가정하며 l 은 l -th 표본을 의미한다. 윗첨자에 표시된 '1'은 첫 번째 시간 슬롯에서 전송되는 것을 말한다. 심볼 j 는 1차 수신단 D_p 와 2차 사용자 R_A 에 의존되는 값으로 $j \in \{D_p, R_A\}$ 로 정의된다. h_{ij} 는 채널 계수로서 i 는 송신단 j 는 수신단을 의미하며 g_{ij} 는 $g_{ij} = h_{ij}^2$ 로 표현된다. 본 논문에서 모든 채널은 레일리 페이딩 채널을 따르며 잡음 모델은 평균이 0 분산이 σ^2 인 가우시안 잡음 모델이다. i 에서 j 까지의 평균 전력 이득은 $\Omega_{ij} = \frac{1}{d_{ij}^v}$ 로 표현할 수 있으며 여기서 d_{ij} 는 노드 사이의 거리, v 는 경로 손실 지수이다. 또한 수식의 단순화를 위해 $d_{R, D_p} = d_{R, D_p}$, $\Omega_S = \frac{1}{d_{R, D_p}^v}$ 한다. 1차 링크의 평균 전력 이득은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Omega_P = \frac{1}{d_{T, D_p}^v} \hat{P}_{FER, D_p}^{(1)}(g_1, E_{s1}, E_p) \quad (2)$$

$$= \min \left(1, B \sum_{d=d_f}^{\infty} a(d) \left(\frac{1}{2} \right)^d \times \sum_{k=0}^d \binom{d}{k} \left(\frac{\sqrt{d E_p} \theta_{T, D_p}}{\sigma} - \frac{(d-2k) g_{R, D_p} \sqrt{E_{s1}}}{\sigma \sqrt{d}} \right) \right)$$

III. 협력 공유 비의 최대화

협력 공유 비는 2차 사용자 R_A 가 중계기처럼 협력, 스펙트럼 공유를 구성하도록 선택될 때의 확률로 정의된다. 노드 R_A 는 1차 사용자의 프레임 오류율을 만족할 경우 스펙트럼 사용량을 향상시킬 수 있다. 따라서 협력 공유 비는 다음과 같이 주어진다.

$$k_{CS} = \lim_{N_C \rightarrow \infty} \frac{N_{CS}}{N_i} = \bar{P}_{FER, D_p}^{(1)} (1 - \bar{P}_{FER, R_A}^{(1)}) \quad (3)$$

위 식 (3)에서 N_i 는 첫 번째 시간 슬롯 동안 전송되는 1차 신호의 수를 의미하며 N_{CS} 는 요구되는 협력 공유 슬롯 수를 의미한다. 노드 D_p 와 R_A 의 평균 프레임 오류율은 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{P}_{FER, D_p}^{(1)} = E_g \left\{ \bar{P}_{FER, D_p}^{(1)}(g_1, E_{s1}, E_p) \right\} \quad (4)$$

$$\bar{P}_{FER, R_A}^{(1)} = E_g \left\{ \bar{P}_{FER, R_A}^{(1)}(g_2, E_{s1}, E_p) \right\}$$

위 식 (4)는 첫 번째 시간 슬롯의 순간적인 프레임 오류율 채널 상태 정보를 표현한 것이다. 또한 $E_X\{\cdot\}$ 은 X 에 대한 확률 변수를 의미하며 E_{s1} 은 k_{CS} 의 최대값을 기반으로 선택된 1차 시스템의 채널 상태 정보를 나타낸다.

1. 제한이 없는 협력 공유 비

최적의 비협력 공유 전력은 $E_{S1, \max}$ 로 표현하며 다음과 같이 정의된다.

$$E_{S1, \max} = \operatorname{argmax} \left\{ \bar{P}_{FER, D_p}^{(1)}(g_1, E_{s1}, E_p) \right\} \quad (5)$$

최적의 비협력 공유 전력은 노드 D_p , R_A 에서 평균 프레임 오류율의 추정 상한치를 통해 얻을 수 있다. 부록 A에서 노드 D_p 의 상한 프레임 오류율에 대해 계산하였으며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{\hat{P}}_{FER, D_p}^{(1)} = E_g \left\{ \hat{P}_{FER, D_p}^{(1)}(g_1, E_{s1}, E_p) \right\} \quad (6)$$

위 식 (6)에서 $\bar{\hat{P}}_{FER, D_p}^{(1)}$ 는 식 (2)를 활용하여 얻을 수 있으며 $\hat{P}_{FER, D_p}^{(1)}$ 은 평균 값을 의미한다. 이와 동일하게

R_A 를 얻을 수 있다. 또한 [15]에서 컨벌루션 부호기를 사용하기 위한 전송의 프레임 오류 확률의 상한은 헤밍 거리 d 를 사용함으로써 얻을 수 있으며 프레임 오류율의 닫힌계를 나타낸다. 따라서 추정치 $d \leq d_{\max}$ 에 의해 프레임 오류율의 이론적인 상한은 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$E_q \left\{ P_{FER, D_p}^{(1)}(g_1, E_{S1}, E_p) \right\} \approx E_q \left\{ \hat{P}_{FER, D_p}^{(1)}(g_1, E_{S1}, E_p) \right\}_{d \leq d_{\max}} \quad (7)$$

위 식 (7)과 동일한 과정으로 R_A 에 관한 식을 얻을 수 있다.

IV. 1차 시스템의 복호 성능

2차 수신단은 두 번째 시간 슬롯에서 협력이 이루어지지 않았을 경우 두 사용자에 대한 다른 메시지를 분리하여 복호한다. 따라서 첫 번째 시간 슬롯동안 2차 사용자의 연산 성능은 전력 할당 인자 α 에 의존된다. 본 논문에서 첫 번째 시간 슬롯동안 2차 시스템의 전송에 의해 발생하는 1차 시스템의 성능 저하와 협력 공유 기법을 통한 1차 시스템의 복호 성능에 초점을 맞추었다.

1. 비협력 공유

제안하는 프로토콜은 첫 번째 시간 슬롯에서 자신의 메시지를 성공적으로 복호할 경우 1차 수신단의 전송이 종료되는 것을 의미한다. 이 경우 1차 신호의 신호 대 잡음 비는 γ_{NC} 로 표현되며 다음과 같다.

$$\gamma_{D_p}^{(1)} = \frac{E_A |h_{T_p D_A}^{(1)}|^2}{E_{S1} |h_{R, D_A}^{(1)}|^2 + \sigma^2} \quad (8)$$

또한 주어진 시간 슬롯에서 1차 수신단의 프레임 오류율은 식 (5), (6)에 표현하였다.

2. 협력 공유

협력 공유 기법을 사용하는 두 번째 시간 슬롯에서 수신되는 메시지는 다음과 같다.

$$y_{D_p}^{(2)} = \sqrt{(1-\alpha)E_P} h_{R, D_p}^{(2)} x_{S2} + \sqrt{\alpha E_P} h_{R, D_p}^{(2)} x_p + n_{D_p}^{(2)} \quad (9)$$

1차 시스템은 복호 후 전송 기법을 사용하며 수신단에 서는 최대 비 결합 기법을 사용하며 결합되는 신호는 다음과 같다.

$$y_{D_p, \Sigma, co}^{(2)} = \omega_1 y_{D_p}^{(1)} + \omega_2 y_{D_p}^{(2)} \quad (10)$$

위 식 (10)에서 ω_1 과 ω_2 는 각각 $h_{T_p D_p}^{(1)}$, $\sqrt{\alpha} h_{R, D_p}^{(2)}$ 이다.

V. 모의실험

본 장에서는 협력 비, 평균 전송 전력, 프레임 오류율에 대한 모의실험을 통해 시스템의 성능을 나타내었다. 모의 실험에서 잡음의 분산은 1로 가정하였으며 각 노드 사이의 거리는 $d_{T_p D_p} = 1$, $d_{T_p R_s}$, d_{R, D_p} , $d_{T_p R_s}$, d_{R, D_p} 는 $1/\sqrt{2}$, d_{R, R_s} , d_{R, D_s} , d_{R, D_s} 는 $1/2\sqrt{2}$ 로 경로 손실 지수는 2로 가정하였다. 본 모의실험에서 사용된 컨벌루션 코드의 길이는 $K=4$ 이며 생성 행렬 $G=[17, 15]$ 이다.

그림 2에서는 2차 송신단에서 자신의 신호를 전송할 경우 1차 수신단에서 의한 간섭의 제약 없을 경우의 협력 공유 비에 대한 모의실험 결과이다. $E_{S1}=0$ 인 경우는 1차 수신단에서 높은 신호 대 잡음 비를 가지게 되므로 2차 시스템과 협력하지 않는 것을 의미한다. 따라서 스펙트럼 공유는 이루어지지 않는다. 또한 17dB에서 협력 공유 비는 0.05의 수치를 가지며 100차례 중 5번만 협력이 이루어졌다는 것을 의미한다. 또한 그래프 상에서 1차 시스템의 협력 공유비는 신호 대 잡음 비가 증가할수록 각 값의 차이가 줄어들면서 일정한 값으로 유지된다.

그림 3은 제안된 기법에서 노드 R_s 의 평균 전력 소비에 대한 성능을 나타내고 있다. 첫 번째 시간 슬롯에서 간섭이 존재하지 않을 때의 평균 전력 소비 성능이다. 채널 상태 정보 g_1 을 완전히 알 경우가 다른 경우에 비해 많은 전력을 필요로 하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 그림 2를 통해 시스템의 첫 번째 시간 슬롯에서 2차 시스템에 간섭 제약이 없을 경우 채널 상태 정보 g_1 을 사용하여 시스템의 성능이 우수한 것을 확인할 수 있다. 이 결과를 통해 세 가지의 경우를 확인할 수 있으며 각각 g 을 완전히 알 경우, g_1 을 완전히 알 경우, g 을 알지 못할 경우

우이다. 세 번째 경우의 채널 상태 정보는 간섭을 보장하기 위해 R_i 에 의해 얻어진다. 협력 공유와 전력 소비는 두 번째 경우에 최적화 되어있다.

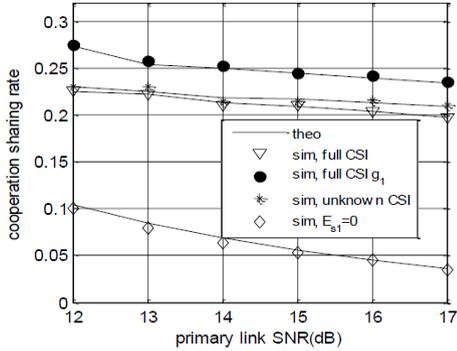


그림 2. 성능 저하를 고려하지 않은 협력 비
 Fig. 2. Cooperation rate corresponding to unconstrained degradation

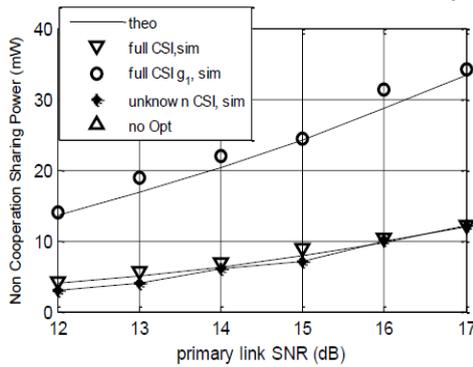


그림 3. 간섭이 존재하지 않을 때 평균 비협력 공유 전력
 Fig. 3. Average noncooperative sharing power when there is no constraint on interference temperature.

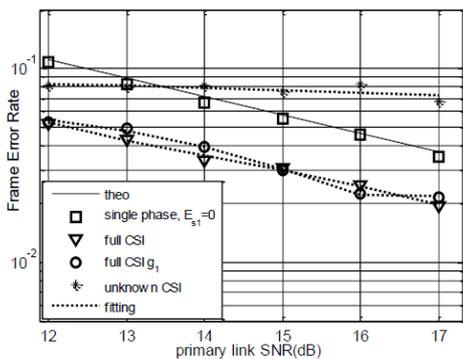


그림 4. 간섭이 없을 경우의 프레임 오류율
 Fig. 4. FER comparison without interference

그림 4는 간섭이 존재하지 않을 때의 프레임 오류율에 대한 모의실험 결과이다. E_{s1} 이 0인 경우는 1차 시스템 간의 직접 전송이며 이 그래프와 나머지를 비교하여 시스템의 성능을 평가할 수 있다. 채널 상태 정보를 모를 경우 전송이 거의 안되는 것을 확인할 수 있으며 채널 상태 정보를 모두 알 경우 직접 전송보다 우수함을 알 수 있다. 이러한 이유는 채널 상태 정보를 모두 알 경우 전송 전력이 높아졌기 때문이다.

VI. 결론

본 논문에서는 1차 시스템의 스펙트럼을 활용하기 위한 방안이 제안되었다. 모의실험에서 기존의 기법과 비교하여 스펙트럼 효율이 향상되었음을 확인하였고 스펙트럼 공유가 구현됨을 확인하였다. 제안된 기법에서 협력과 공유는 첫 번째 시간 슬롯에서 1차 신호가 전송에 실패할 때 자동적으로 구성된다. 또한 비협력 공유 기법을 사용함으로써 성능 저하 현상을 허가하였고 협력 공유 비를 최대화하였다. 따라서 제안된 방법은 1차 신호의 송신에 대응하여 두 개의 2차 사용자를 통해 스펙트럼 사용 기회를 향상시킨다. 1차 사용자의 스펙트럼 효율은 스펙트럼 공유가 필요할 경우에만 제한하며 두 시간 슬롯 동안 전송이 일어나게 되므로 기존의 방법과 비교하여 성능이 우수하다.

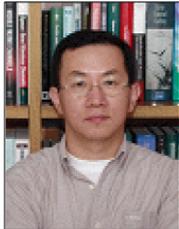
References

- [1] N. T. A. I. A. (NTIA). FCC Frequency Allocation Chart [Online]. Available: <http://www.ntia.doc.gov/smhome/allochrt.pdf>
- [2] D. A. Roberson, et al., "Spectral Occupancy and Interference Studies in support of Cognitive Radio Technology Deployment," in Networking Technologies for Software Defined Radio Networks., SDR '06.1st IEEE Workshop on, 2006, pp. 26–35.
- [3] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol. 23, pp. 201–220, 2005.

- [4] O. Ileri and N. B. Mandayam, "Dynamic spectrum access models: toward an engineering perspective in the spectrum debate," *Communications Magazine*, IEEE, vol. 46, pp. 153-160, 2008.
- [5] D. Cabric, et al., "Spectrum sharing radios," *Circuits and Systems Magazine*, IEEE, vol. 6, pp. 30-45, 2006.
- [6] A. Goldsmith, et al., "Breaking Spectrum Gridlock With Cognitive Radios: An Information Theoretic Perspective," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, pp. 894-914, 2009.
- [7] S. Srinivasa and S. A. Jafar, "Cognitive Radios For Dynamic Spectrum Access -The Throughput Potential of Cognitive Radio: A Theoretical Perspective," *Communications Magazine*, IEEE, vol. 45, pp. 73-79, 2007.
- [8] A. Jovicic and P. Viswanath, "Cognitive Radio: An Information-Theoretic Perspective," *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 55, pp. 3945-3958, 2009.
- [9] O. Simeone, et al., "Spectrum Leasing to Cooperating Secondary Ad Hoc Networks," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 26, pp. 203-213, 2008.
- [10] Y. Han, et al., "Cooperative spectrum sharing via controlled amplify-and-forward relaying," in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. IEEE 19th International Symposium on*, 2008, pp. 1-5.

저자 소개

공 형 윤(정회원)



- 1989년 2월 : New York Institute of Technology(미국) 전자공학과 학사
 - 1991년 2월 : Polytechnic University (미국) 전자 공학과 석사
 - 1996년 2월 : Polytechnic University (미국) 전자 공학과 박사
 - 1996년 ~ 1996년 : LG전자 PCS팀장
 - 1996년 ~ 1998년 : LG 전자 회장실 전략 사업단
 - 1998년 ~ 현재 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수
- <주관심분야 : 모듈레이션, 채널 부호화, 검파 및 추정 기술, 협력통신, 센서네트워크>