

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.1.111>

IIBC 2015-1-14

간섭 완화를 위한 새로운 협력 스펙트럼 공유 기법

New Method of Cooperative Spectrum Sharing for Interference Mitigation

공형윤*

Hyung-Yun Kong*

요약 본 논문은 인지 통신의 1차, 2차 시스템 사이에서 발생하는 협력 스펙트럼 공유 모델을 고려한다. 제시된 모델은 동상 신호로 표현되는 1차 사용자의 메시지가 존재할 때, 직교 위상 기반의 신호인 2차 사용자의 메시지가 존재하기 위한 단일 2차 송신기 ST의 배치에 대해 표현한다. 상호 간섭이 없는 순간적인 스펙트럼 공유로 가정하였으므로, 2차 사용자의 동작으로 인한 1차 사용자의 동작을 보호하는 것은 불필요하다. 또한 1차 시스템의 신호, 2차 시스템의 신호가 동상 및 직교 위상인 직교 차원에 위치하는 것을 기반으로 하기 때문에, 1차 시스템과 2차 시스템의 신호는 상호 간섭이 발생하지 않으며 2차 시스템 전원의 일부를 사용하여 1차 시스템의 신호를 강화시킬 수 있다.

Abstract This article considers a model of cooperative spectrum sharing between primary and secondary systems in which transmission occurs in two phases. In this scheme, we introduce that a single secondary transmitter, ST, employs a quadrature-phase-based signal to present the secondary message, while the primary message is presented by an in-phase-based signal. This allows simultaneous spectrum sharing without mutual interference. Therefore, an interference constraint is not necessary to protect primary operating performance from being degraded by the secondary user operations. Theoretical analysis and Simulations are then provided to confirm the superiority of the proposed scheme over the the current conventional methods.

Key Words : Cognitive radio; Spectrum sharing; Cooperative spectrum sharing; Decode and forward.

1. 서론

최근, 인지 통신의 연구에서 동적 스펙트럼 공유 기법에 대한 관심이 높아지고 있으나 프레임워크가 공존하는 시스템인 협력 스펙트럼 공유에 대한 연구에 초점을 두고 있다^[1-11]. 협력 스펙트럼 공유 기법은 크게 두 가지 모델로 정의할 수 있다. 첫 번째 모델에서 2차 시스템의 노드는 1차 시스템의 증계기로 작동하며 1차 시스템의 신호를 전송하고 수신함으로써 1차 시스템의 성능을 향상시

킬 수 있다. 이러한 협력으로 인해, 2차 시스템의 사용자가 1차 시스템의 스펙트럼에 접근할 수 있다^[1-7]. 두 번째 모델에서 2차 시스템의 노드는 1차 사용자의 전송에 어떠한 도움을 주지 않는다. 따라서 1차 시스템 성능의 향상을 위해 1차 수신단은 2차 시스템의 전송에 대한 간섭을 줄이는 기법을 적용했다. [9]의 결과를 제외한 연구에서는 1차 시스템의 간섭 제약과 관련된 공존 시스템의 성능 분석에 초점을 맞추었다. 이러한 모델은 간섭 제약의 개선을 위해 송신 전력이 증가하는 것을 허가하지 않

*정희원, 울산대학교 전기전자정보시스템공학부
접수일자 : 2014년 9월 24일, 수정완료 : 2015년 1월 5일
게재확정일자 : 2015년 2월 13일

Received: 24 September, 2014 / Revised: 5 January, 2015

Accepted: 13 February, 2015

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

School of Electrical Engineering, University of Ulsan, Korea

때문에 2차 시스템의 작동에 제한된 성능을 보인다. 또한, 상호 간섭으로 인해 2차 시스템의 성능 저하에 영향을 미친다.

따라서 본 논문에서는 위 문제점을 해결할 수 있는 새로운 협력 스펙트럼 공유 기법을 제안한다. 제안하는 공유 기법은 1차 시스템의 신호, 2차 시스템의 신호가 동상 및 직교 위상인 직교 차원에 위치하는 것을 기반으로 한다. 그 결과, 1차 시스템과 2차 시스템의 신호는 상호 간섭이 발생하지 않으며 2차 시스템 전원의 일부를 사용하여 1차 시스템의 전송을 돕는다. 따라서 2차 시스템의 신호는 1차 시스템에 간섭을 일으키지 않으며 1차 시스템의 신호를 강화시킨다.

II. 시스템 모델

본 논문의 시스템 모델은 그림 1에 표현된 것 같이 1차 송신단 PT, 1차 수신단 PR, 2차 송신단 ST, 2차 수신단 SR로 구성된다. 모든 채널은 평탄한 레일리 페이딩 채널이며 채널 상태 정보는 h_1, h_2, h_3, h_4, h_5 으로 구성되고 각각의 거리는 d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 이다.

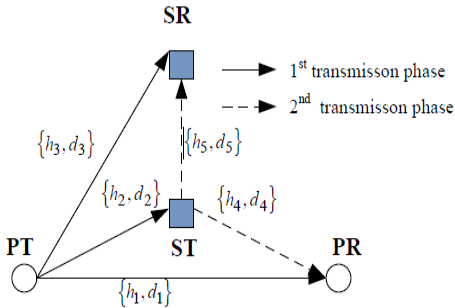


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model

또한, 채널 h_i 의 평균 이득 전력은 거리와 경로 v 에 의존되며 Ω_i^{-v} 로 표현되므로 h_i 의 분산은 $h_i \sim CN(0, d_i^{-v})$ 이 된다. 또한, 채널 h_i 의 이득은 γ_i 이며 $\gamma_i = |h_i|^2$ 이 된다. 첫 번째 시간 슬롯에서 1차 송신단에서 전송된 메시지는 $x_{p,1}$ 으로 표현한다. 또한, 복소 문자 집합 S_C 는 이진 메시지로 선택된다. 1차 송신단

1차 수신단으로 전송하는 메시지를 \mathcal{J} 으로 표현하고 복소 신호 $x_{p,1}$ 에 존재하며 $x_{p,1} \in S_C$ 로 구성된다. 첫 번째 시간 슬롯에서 PT는 PR과 모든 노드로 $x_{p,1}$ 을 전송한다. 두 번째 시간 슬롯에서 ST가 1차 신호를 성공적으로 복호할 경우 이 신호를 재전송하는 첫 번째 우선 순위를 가지게 되며 그렇지 않을 경우, PT는 재전송을 실행한다.

III. 기존의 협력 스펙트럼 공유

본 장에서는 [2]에서 표현된 협력 스펙트럼 공유 기법에 대해 기술한다. 특히 [2]에서는 2차 시스템에 최대비 결합 기법을 적용할 때, 얻어지는 아웃티지 성능에 대해 분석하였다.

1. 1차 신호의 복호

첫 번째 시간 슬롯에서 PT는 자신의 신호를 전송하며 PR, ST, SR은 다음과 같은 신호를 수신한다.

$$y_{i1} = \sqrt{P_p} h_i x_{p,1} + n_{i1} \quad (1)$$

식 (1)에서 i 는 PR, ST, SR의 값인 1, 2, 3이며 P_p 는 PT의 전송 전력이다. n_{ij} 는 평균이 0, 분산이 σ^2 인 복소 백색 가우시안 잡음이다. 식 (1)에서 두 번째 아래 첨자는 $j = 1, 2$ 로 주어지며 y_{ij}, n_{ij} 로 시간 슬롯에 따라 변한다. 또한 수신된 신호 y_{i1} 에 해당하는 신호 대 잡음 비는 Γ_{i1} 으로 주어진다. 두 번째 시간 슬롯에서 두 가지의 가능한 전송 방법이 존재한다. 첫 번째는 1차 송신단에 의해 전송되는 것이며 두 번째는 2차 송신단에 의해 전송되는 것이다. 첫 번째 경우에서 PT는 자신의 신호 $x_{p,1}$ 를 간단하게 재전송하며 PR은 다음과 같은 신호를 수신한다.

$$y_{12} = \sqrt{P_s} h_1 x_{p,1} + n_{12} \quad (2)$$

[2]의 선행 연구에서 PT에 의한 1차 신호의 재전송은 허가되지 않았으므로 최대 비 결합 기법을 사용할 수 없다. 그러나 증분 전송의 결과로서 재전송이 허가된다. 따라서 최대 비 결합 기법을 통해 얻는 신호는 다음과 같다.

$$\hat{y}_1 = w^H y_1 = \left(\frac{P_p \gamma_1}{\sigma^2} + \frac{P_s \gamma_1}{\sigma^2} \right) x_{p,1} + \frac{\sqrt{P_p} h_1^* n_{11}}{\sigma^2} + \frac{\sqrt{P_s} h_1^* n_{12}}{\sigma^2} \quad (3)$$

식 (3)에서 w 는 최대 비 결합의 가중치 벡터이며 $w = R^{-1}C$ 로 주어지며 $c = [\sqrt{P_p} h_1, \sqrt{P_s} h_1]^T$ 이다. 또한 간섭 잡음 상호 분산 값은 R 로 주어지며 $R = \text{diag}\{E\{|n_{11}|^2\}, E\{|n_{12}|^2\}\} = \text{diag}\{\sigma^2, \sigma^2\}$ 이다. $[\cdot]^H$ 는 $[\cdot]$ 의 행렬에 대한 공역 전치 행렬이다. 신호 \hat{y}_1 에서 신호 대 간섭 잡음 비는 Γ_1^{re} 로 주어지며 're'는 PT의 재전송 표시이다. 두 번째 경우에서 첫 번째 시간 슬롯에서 $x_{p,1}$ 이 복호된다면 ST는 두 번째 시간 슬롯에서 자신의 신호를 전송한다. ST는 신호 $x_{p,1}$ 의 재생성을 통해 2차 시스템의 신호 x_s 와 중첩된 신호를 생성하여 P_s 의 전력으로 전송한다. 신호 x_s 는 복소 신호이며 S_C 에 포함된다. 2차 송신단에서 x_s 는 βP_s 만큼 할당되며 $\beta \in [0, +\infty)$ 로 표현된다[2]. 이 경우 PR에 수신되는 신호는 다음과 같다.

$$y_{12} = (\sqrt{P_s} x_{p,1}, \sqrt{\beta P_s} x_s) h_4 + n_{12} \quad (4)$$

PR에서는 수신된 신호 y_{11} 와 y_{12} 를 최대 비 결합을 통해 복호한다. 최대 비 결합의 가중치를 통해 신호 \hat{y}_1 를 구할 수 있다. 신호 대 간섭 잡음 비는 Γ_1^{CCSS} 으로 정의하며 'CCSS'는 기존의 협력 스펙트럼 공유를 뜻한다[2]. 또한, 신호 대 잡음 비 Γ_1^{CCSS} 의 조건이 $P_s \beta \gg \sigma^2$ 일 경우 위의 근사치를 사용할 수 있다. 그러나 $P_s \beta$ 이 σ^2 보다 충분히 크지 않다면 $\Gamma_{1,up}^{CCSS} = \frac{P_p \gamma_1}{\sigma^2} + \frac{P_s \gamma_4}{\sigma^2}$ 으로 표현된다.

2. 2차 신호의 복호

ST는 중계기와 같은 역할을 수행하며 SR은 2차 신호의 복호를 시도한다. SR은 먼저 1차 신호를 복호함으로써 1차 신호에 의한 간섭을 완화시킨다. 이 경우에 대한 최대 비 결합 신호는 \hat{y}_3 으로 주어진다. 이 신호는 PR의

최대 비 결합 신호와 유사하다. 또한, 신호 y_{32} 는 아래와 같다.

$$y_{32} = \sqrt{P_s} h_5 x_{p,1} + \sqrt{\beta P_s} h_5 x_s + n_{32} \quad (5)$$

식 (5)의 값을 통해 λ_3 이 결정되며 $\beta P_s \gamma_5 + \sigma^2$ 으로 주어진다. 만약 $\beta P_s \gg \sigma^2$ 인 경우 1차 신호의 복호에 따라 결정되는 신호 대 간섭 잡음 비는 $\Gamma_{3,p}^{CCSS}$ 이다. 1차 시스템의 메시지가 SR에서 성공적으로 복호될 경우 간섭 제거를 수행한다. 따라서 2차 시스템의 신호 x_s 에 대한 신호 대 잡음 비는 $\Gamma_{3,s}^{CCSS} = \frac{\beta P_s \gamma_5}{\sigma^2}$ 으로 주어진다. 또한, SR이 1차 신호의 복호를 실패할 경우 2차 신호는 복호할 수 없다.

IV. 동상 및 직교 위상 협력 스펙트럼 공유

식 (7), (9)를 통해 SR과 PR에서 1차, 2차 신호에 대한 간섭이 발생한다. 이 경우 각 시스템에서 성능의 저하가 발생됨을 고려해야하며 이러한 단점을 극복하기 위해 본 논문에서는 1차 신호와 2차 신호가 하나의 차원에서 동시에 스펙트럼에 접근하는 협력 스펙트럼 공유 기법을 제안하였다. 이러한 신호는 두 개의 직교 차원에 위치하게 되며 1차 신호는 동상 차원, 2차 신호는 직교 위상 차원에 존재한다. 실수 집합 S_p 는 신호를 생성하기 위해 기호를 선택할 때 사용된다. 신호 $x_{p,2}$ 는 1차 신호 \mathcal{J} 를 대표하며 S_p 에 포함된다. 또한, ST는 특정한 조정 신호를 사용하여 신호의 종류를 변경하는 것을 PR에 알릴 수 있으며 직교 위상 신호는 2차 신호를 표현한다.

1. 2차 신호의 표현을 위한 직교 위상 신호

직교 위상 신호는 S_p^+, S_p^- 인 두 종류이다. 따라서 복합 집합 \hat{S}_p 는 $S_p^+ \cup S_p^-$ 로 정의한다. 위 식에서 동상 부분을 나타내는 a 는 상수이기 때문에 정보를 포함하지 않는다. 직교 차원에 위치한 z 성분은 정보를 포함할 수 있다. 그러므로 \hat{S}_p 는 직교 차원에 의존된 값이며 a 는 1차 신호의 전송을 돕는 역할을 한다.

2. 동상 및 직교 위상 신호를 사용하는 스펙트럼 공유

첫 번째 시간 슬롯에서 1차 송신단은 기존의 기법과 동일하게 자신의 신호 $x_{p,1}$ 을 전송한다. 두 번째 시간 슬롯에서 2차 송신단은 $x_{p,1}$ 이 성공적으로 복호될 경우 자신의 신호 x_s 를 이용해 $x_{p,2}$ 를 전송한다. 이때, 신호 x_s 는 기존의 기법과 같은 복소 신호가 아니며 \widehat{S}_P 에 의해 정의된다.

$$x_s = \begin{cases} a + iz, & x_{p,2} > 0 \\ -a + iz, & x_{p,2} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

식 (6)에서 $x_{p,2} > 0$ 일 경우 x_s 는 S_P^+ 에 포함되며 $x_{p,2} < 0$ 일 경우, S_P^- 에 포함된다. 동일한 2차 신호는 $x_{p,2}$ 의 양수와 음수로 표현된다. 노드 ST는 1차 신호에 대한 전력 P_S 의 성분을 할당하며 2차 신호에 대한 전력 $\beta P_S |x_{p,2}|^2$ 를 제공한다. 2차 신호의 전력 할당은 1차 신호 $x_{p,2}$ 의 값에 의존된다. 이러한 이유는 $E\{\sqrt{\beta P_S} |x_{p,2}| |x_s|^2\} = \beta P_S$ 이기 때문이다. 2차 신호에 대한 전력 소비는 βP_S 이며 이 값은 기존의 기법과 동일하다. 따라서 두 번째 시간 슬롯에서 PR에 수신되는 복소 신호 y_{12} 는 다음과 같이 표현된다.

$$y_{12} = (\sqrt{P_S} + \sqrt{\beta P_S a}) h_4 x_{p,2} + i \sqrt{\beta P_S} |x_{p,2}| h_4 \text{Im}\{x_s\} + n_{12} \quad (7)$$

또한, 신호 y_{12} 에 동상 신호가 포함되며 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{y}_{12} = \text{Re}\{e_4^* \dot{y}_{12}\} = (\sqrt{P_S} + \sqrt{\beta P_S a}) \sqrt{\gamma_4} x_{p,2} + \dot{n}_{12} \quad (8)$$

식 (8)에서 \dot{n}_{12} 는 $\text{Re}\{e_4^* n_{12}\}$ 이며 $e_i \doteq h_i / |h_i|$ 이고 e_i^* 는 e_i 의 공액이다. 첫 번째 시간 슬롯에서 2차 송신단이 1차 신호의 복호에 실패할 경우 기존의 기법과 동일하게 P_S 의 전력으로 $x_{p,1}$ 을 재전송한다. 또한 PR은 기존의 기법과 동일하게 최대 비 결합 기법으로 신호를

결합한다. ST가 동시에 스펙트럼에 접근할 경우 두 번째 시간슬롯에서 2차 수신단에 수신되는 메시지 y_{32} 는 아래와 같다.

$$y_{32} = (\sqrt{P_S} + \sqrt{\beta P_S a}) h_5 x_{p,2} + i \sqrt{\beta P_S} |x_{p,2}| h_5 \text{Im}\{x_s\} + n_{32} \quad (9)$$

식 (9)에서 2차 수신단은 1차 수신단과 동일한 방법으로 y_{32} 를 복호하며 이때의 신호 대 잡음 비 $\Gamma_{3,p}^{pcss}$ 는 $\frac{2(\sqrt{P_S} + \sqrt{\beta P_S a})^2 \gamma_5}{\sigma^2}$ 으로 주어진다. 2차 수신단에서 y_{32} 를 포함한 1차 신호를 복호할 경우 2차 신호의 복호를 위한 간섭 제거를 수행한다. 또한 $x_{p,2}$ 의 값을 알 경우, 2차 신호 복호에 대한 신호 대 잡음 비는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \Gamma_{3,s}^{pcss} &= \frac{2\beta P_S \gamma_5 E\{|x_{p,2}| |x_s|^2\}}{\sigma^2} \\ &= \frac{2\beta P_S \gamma_5 (1-a^2)}{\sigma^2} \end{aligned} \quad (10)$$

3. 아웃티지 확률 분석

본 논문에서 제안하는 협력 스펙트럼 공유 기법에서 1차 시스템의 아웃티지 확률은 $p_{out,p,1}^{pcss}$ 로 주어지며 다음과 같이 표현된다.

$$p_{out,p,1}^{pcss} = \Pr\{R_2 < R_{pt}\} \Pr\{R_{1,MRC}^{rc} < R_{pt}\} + \Pr\{R_2 > R_{pt}\} \Pr\{R_{pt}^{pcss} < R_{pt}\} \quad (11)$$

식 (11)에서 $R_1^{pcss} = \frac{1}{4} \log_2(1 + \Gamma_1^{pcss})$ 이며 R_{pt} 는 1차 시스템의 임계 전송률이다. 또한, 1/4의 값은 로그 인자로서 전송 시간의 절반과 단일 차원 신호를 의미한다.

또한, 2차 시스템의 아웃티지 확률 $p_{out,3,s}^{pcss}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_{out,3,s}^{pcss} = 1 - \Pr\{R_2 > R_{pt}\} \times \Pr\{R_{3,p}^{pcss} > R_{pt}, R_{3,s}^{pcss} > R_{pt}\} \quad (12)$$

따라서, 식 (11, 12)을 통해 시스템의 전체적인 아웃티지 확률로 정리할 수 있다.

$$P_{out,s,3}^{pcss} = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{\sigma^2}{P_p \Omega_2} \rho_{pt}\right) \times \left(\exp\left(-\frac{\hat{\eta}_{st}}{\Omega_5}\right)\right), & \hat{\eta}_{st} > \hat{\eta}_{pt} \\ 1 - \exp\left(-\frac{\sigma^2}{P_p \Omega_2} \rho_{pt}\right) \times \left(\exp\left(-\frac{\hat{\eta}_{pt}}{\Omega_5}\right)\right), & \text{그 외} \end{cases} \quad (13)$$

V. 모의실험

모의실험에서 1차 송신단은 $(0, 0)$, 2차 송신단은 $(d_2, 0)$, 1차 수신단은 $(d_1, 0)$, 2차 수신단은 (d_2, d_5) 에 위치한다고 가정한다. 또한 감쇄가 존재할 경우 $v = 4$ 이며 분산 $\sigma^2 = 1$ 로 정의되며 $\frac{P_p}{\sigma^2}$ 와 $\frac{P_s}{\sigma^2}$ 은 3dB, 임계율 R_{pt} , R_{st} 는 1(bit/Hz/s)로 정의된다.

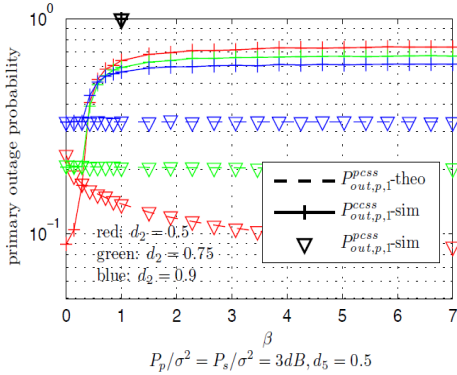


그림 2. β 값에 따른 1차 시스템의 아웃티지 성능
 Fig. 2. Performance outage probability of the primary system versus β

그림 2, 3에서 1차, 2차 시스템의 β 값을 변경할 때 얻을 수 있는 아웃티지 확률을 나타내었으며 각 거리 $d_5 = 0.5$ 일 때, $d_2 = 0.5, 0.7, 0.9$ 에 대한 결과를 표현하였다. 일반적인 협력 스펙트럼 공유 기법의 경우 β 가 0에 가까울수록 우수한 아웃티지 확률을 얻을 수 있다. 반면, 본 논문에서 제안한 기법의 경우 β 가 충분히 클 경우 우수한 아웃티지 확률을 얻을 수 있다. 또한, d_2 가 큰 값을 가질 경우 모든 β 값에 대해서 협력 스펙트럼 공유를 실행할 수 있으며 이러한 이유는

$\Pr\{R_2 > R_{pt}\}$ 의 값이 $\Pr\{R_2 < R_{pt}\}$ 보다 충분히 작기 때문이다. 그리고 d 의 값이 작은 경우 기존의 기법에서는 제안된 기법처럼 β 의 값이 증가하게 된다. 왜냐하면 2차 신호가 간섭이 유발하지 않거나 1차 신호를 강화할 수 있기 때문이다.

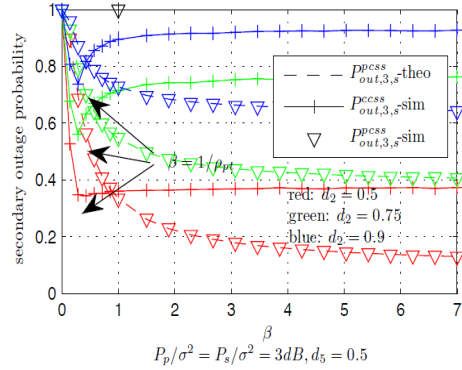


그림 3. β 값에 따른 2차 시스템의 아웃티지 성능
 Fig. 3. Performance outage probability of the secondary system versus β

2차 시스템의 아웃티지 확률은 그림 4에 표현되어 있으며 $\beta < 1/\rho_{pt}$ 일 때, β 가 증가할 경우 기존 기법의 아웃티지 확률은 제안된 기법에 비해 성능이 향상되며 이러한 이유는 제안된 기법이 허수 차원을 사용하기 때문이다. 또한 $\beta > 1/\rho_{pt}$ 일 때 β 가 증가할 경우 기존 기법의 성능은 하향되며 제안된 기법의 성능은 향상됨을 알 수 있다. 이러한 이유는 2차 수신단에서 1차 신호를 복호할 때 간섭의 영향을 받기 때문이다. 그러므로 기존의 기법에서 β 의 값은 보장하기 위해선 0 근처의 값이 되어야 한다. 한편 제안된 기법의 경우 β 값의 요구 범위가 존재하지 않으므로 1차 시스템, 2차 시스템에 대한 아웃티지 확률이 우수함을 알 수 있다.

VI. 결론

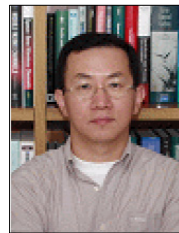
본 논문에서는 2차 시스템이 1차 시스템 신호를 강화하거나 간섭의 영향을 줄일 수 있는 협력 스펙트럼 공유 기법의 새로운 모델을 제시하였다. 1차 시스템과 2차 시스템의 아웃티지 확률을 통해 기존의 기법에 비해 성능이 우수함을 증명하였다.

References

- [1] Y. Han, A. Pandharipande, S. H. Ting, "Cooperative spectrum sharing via controlled amplify-and-forward relaying," in Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium on, 2008, pp. 1-5.
- [2] H. Yang, A. Pandharipande, S. H. Ting, "Cooperative decode-and-forward relaying for secondary spectrum access," Wireless Communications, IEEE Transactions on, vol. 8, pp. 4945-4950, 2009.
- [3] H. Yang, S. H. Ting, A. Pandharipande, "Cooperative Spectrum Sharing with Distributed Secondary User Selection," in Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on, 2010, pp. 1-5.
- [4] H. Yang, S. H. Ting, A. Pandharipande, "Cooperative Spectrum Sharing Protocol with Secondary User Selection," Wireless Communications, IEEE Transactions on, vol. 9, pp. 2914-2923.
- [5] H. Yang, S. H. Ting, A. Pandharipande, "Cooperative Spectrum Sharing Protocol with Selective Relaying System," Communications, IEEE Transactions on, vol. 60, pp. 62-67, 2012.
- [6] Q. Li, S. H. Ting, A. Pandharipande, M. Motani, "Cooperate-and-Access Spectrum Sharing with ARQ-Based Primary Systems," Communications, IEEE Transactions on, vol. 60, pp. 2861-2871, 2012.
- [7] H. Yang, S. H. Ting, M. Motani, A. Pandharipande, "On throughput and delay scaling with cooperative spectrum sharing," in Information Theory Proceedings (ISIT), 2011 IEEE International Symposium on, 2011, pp. 821-825.
- [8] K. J. Kim, T. Q. Duong, N. Tran, "Performance Analysis of Cognitive Spectrum-Sharing Single-Carrier Systems with Relay Selection," Signal Processing, IEEE Transactions on, vol. PP, pp. 1-1, 2012.
- [9] L. Wei Dang, G. Yi, S. H. Ting, W. Xuan Li, Z. Nai Tong, "Cooperative OFDM Relaying for Opportunistic Spectrum Sharing: Protocol Design and Resource Allocation," Wireless Communications, IEEE Transactions on, vol. 11, pp. 2126-2135, 2012.
- [10] T. Duong, D. da Costa, T. Tsiftsis, C. Zhong, A. Nallanathan, "Outage and Diversity of Cognitive Relaying Systems under Spectrum Sharing Environments in Nakagami-m Fading," Communications Letters, IEEE, vol. PP, pp. 1-4, 2012.
- [11] M. Xia and S. Aissa, "Cooperative AF Relaying in Spectrum-Sharing Systems: Outage Probability Analysis under Co-Channel Interferences and Relay Selection," Communications, IEEE Transactions on, vol. PP, pp. 1-11, 2012.

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>