

논문 2010-47TC-5-4

다수의 주 사용자가 존재하는 무선인지 네트워크의 중계 전송 성능 평가

(Performance Analysis of Cognitive Relay Networks with Multiple Primary Users)

이 제 민*, 왕 한 호*, 노 고 산*, 홍 대 식**

(Jemin Lee, Hano Wang, Gosan Noh, and Daesik Hong)

요 약

본 논문은 underlay 기법으로 다수의 주 사용자 수신기들(primary receivers)이 부 사용자들(secondary users)과 공존할 때 부 사용자들의 협력을 통한 중계 전송의 성능을 평가하였다. 무선 인지 환경에 적합한 중계기 선택 기준을 사용하였을 때 부 사용자의 outage probability를 유도하였다. 이러한 분석을 통하여, 공존하는 다수의 주 사용자들로 인하여 증가하는 부 사용자의 outage probability 양을 정량적으로 표현하였다. 모의실험을 통하여, 주 사용자의 개수가 증가할수록 중계 전송이 직접 전송에 비하여 민감하게 성능이 감소하고, 이로 인하여 중계 전송이 직접 전송에 비하여 비효율적일 수 있음을 보여주었다. 또한, 비록 다수의 주 사용자가 존재하더라도 중계기 선택의 다이버시티를 늘려 줌으로서 중계 전송이 직접 전송보다 효율적일 수 있음을 확인하였다.

Abstract

This paper evaluates the outage probability of cognitive relay networks with cooperation between secondary users based on the underlay approach, when multiple primary receivers coexist with secondary users. Using an appropriate relay selection criterion in cognitive radio networks, we derive the outage probability of secondary user. It is shown that the outage probability increases as the number of primary receivers increases and we quantify the increase. Through the simulation results, we verify that the performance of relaying transmission is varied more sensitively compared to that of direct transmission as the number of primary receivers increases. In addition, the relaying transmission can be less efficient than the direct transmission when multiple primary receiver exist but it can be more efficient than the direct transmission by increasing the relay selection diversity.

Keywords : Cognitive relay networks, multiple primary receivers, outage probability

I. 서 론

* 학생회원, ** 평생회원, 연세대학교 전기전자공학부 (School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

※ 이 논문은 한국과학재단이 주관하는 국가지정연구실사업(NRL:R0A-2007-000-20043-0)의 지원을 받아 연구되었음.

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITA-2009-(C1090-0902-0011)).

접수일자: 2010년3월16일, 수정완료일: 2010년5월18일

무무선 인지 네트워크(cognitive radio networks)에서 는 비 허가 사용자(부 사용자, secondary user)들이 허가된 사용자(주 사용자, primary user)들의 데이터 전송을 보호하는 범위 내에서 스펙트럼 underlay, overlay 그리고 interweave의 방식들로 허가된 대역을 사용하도록 한다^[1]. Underlay 방식으로 공존 시, 부 사용자는 주 사용자가 허용하는 간섭 한계치 이하의 간섭을 주는 범

위 내에서 주 사용자의 대역을 사용 할 수 있다. 그러므로 부 사용자의 전송 파워는 부 사용자에게 주는 간섭의 양에 의하여 제한된다. Overlay 방식으로 공존 시, 부 사용자는 주 사용자와 같은 대역을 동시에 사용하는데, 이때 정교한 신호 처리 및 코딩 기법 등을 통하여 주 사용자의 데이터 전송을 향상 혹은 유지 시켜 주어야 한다^[1]. 또한, interweave 기법으로 공존할 수 있는데, 이는 부 사용자가 주 사용자가 사용하지 않는 주파수의 대역(spectrum hole)을 검출 기법(detection algorithm)들을 통하여 확인한 뒤에 그 대역을 사용하는 것이다.

중계 전송(relaying transmission)은 무선 네트워크의 커버리지 확장 및 성능 향상을 위한 방법으로 제안되어 왔다^[2]. 중계 전송의 이득은 소스와 목적지 사이의 중계기를 사용하여 전반적인 경로손실(pathloss)를 감소시킴으로서 얻을 수 있다. 이러한 중계 전송의 이득을 무선 인지 환경에 적용하면서 무선 인지 중계 네트워크(cognitive relay networks)가 최근에 부 사용자의 전송 성능을 향상시키기 위한 방법으로 연구되고 있다. 이때, 무선 인지 네트워크에서의 중계 전송은 부 사용자와 주 사용자 사이의 협력(cooperation)^[3]과 주 사용자 사이의 협력^[4~7]을 통하여 가능하다.

부 사용자들 사이의 협력을 통해 중계 전송 시, overlay 방식을 기반으로 공존하는 부 사용자의 outage probability을 스펙트럼 센싱(spectrum sensing) 성능에 따라 분석 되었다^[4]. 또한, 부 사용자의 전체 전송 파워를 최소화하기 위한 분산된(Decentralized) 전송 파워 할당 알고리즘을 제안되었다^[5]. 허가 대역과 비 허가 대역에서의 무선 중계 네트워크의 성능을 기존의 중계 네트워크에서의 성능과 비교되기도 하였다^[6]. 하지만 이러한 기존 연구들에서는 보여 준 것과 같이 시스템 성능에 중요한 영향을 미치는 적합한 중계기 선택의 문제를^[7] 고려하지 않았다.

이를 고려하여 최근 논문에서 무선 인지 환경에 적합한 중계기 선택 기준을 제시하였다^[8]. 이 선택 기준을 사용했을 때 부 사용자의 outage probability를 분석하고, 중계기 선택 다이버시티(relay selection diversity)를 기존 중계 네트워크에서의 다이버시티와 비교하였다. 하지만, 이 논문에서는 하나의 주 사용자가 존재하는 환경에서만 성능을 분석하였다.

본 논문에서는 다수의 주 사용자들이 부 사용자들과 공존하는 환경에서 부 사용자의 중계 전송 시 성능을

평가한다. 하나의 주 사용자가 존재하는 경우와는 달리, 여러 명의 주 사용자들에게 주는 간섭까지 고려하여 부 사용자의 전송 파워가 결정되게 되고 부 사용자의 outage probability에 영향을 주게 된다. 이 논문을 통하여 1) 주 사용자의 outage probability를 유도하면서 다수의 주 사용자들의 간섭 제한들로 인하여 outage probability의 증가량을 분리하여 표현하였고, 2) 중계 전송이 직접 전송(direct transmission)에 비하여 주 사용자 수의 증가에 민감함을 보였다.

II. 시스템 모델

그림 1은 다 수의 부 사용자들과 주 사용자들이 공존하는 무선인지 중계 네트워크를 보여준다. SU_S 와 SU_D 는 각각 부 사용자 소스(source)와 목적지(destination)을 나타낸다. 또한 중계기로 사용가능한 부 사용자들이 K 명이고 주 사용자의 수신기들이 총 N 개 존재한다고 가정하였다. 그림 1에서 $SU_k(k=1, \dots, K)$ 와 $PU_{RX,i}(i=1, \dots, N)$ 는 각각 k 번째 부 사용자와 i 번째 주 사용자 수신기를 나타낸다. 이후의 본 논문에서는 주 사용자 수신기를 편의를 위하여 주 사용자로 표현하였다. 중계기들은 재생 모드(Regenerative mode)로 전송하며 부 사용자들의 인덱스들의 집합을 $M = \{S, D, 1, \dots, K\}$ 으로 그리고 주 사용자들의 집합은 $\mathbb{P} = \{1, \dots, N\}$ 로 표현하였다.

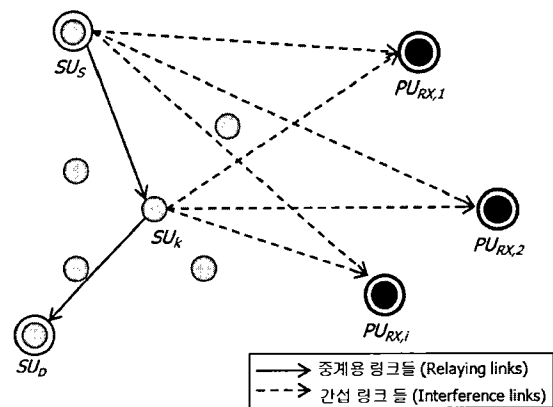


그림 1. 다 수의 주 사용자 수신기(PU_{RX})들과 부 사용자(SU)들이 공존하는 무선인지 중계 네트워크의 예

Fig. 1. An example of cognitive relay networks the secondary users and the multiple primary receivers.

h_{ij} 는 i 번째 부 사용자와 j 번째 부 사용자 사이의 순시 채널을 나타내며, h_{iP_j} 는 i 번째 부 사용자와 j 번째 주 사용자 사이의 순시 채널을 나타내고, 이들은 $h_{ij} = \chi_{ij} d_{ij}^{-\alpha/2} (i, j \in \mathbb{M}, \mathbb{P})$ 와 같이 표현된다. 이때, α , d_{ij} 각각, 경로손실 지수(pathloss exponent), 두 사용자 사이의 거리를 의미한다. χ_{ij} 는 페이딩 지수로 단일 분산을 가지는 Complex Gaussian 랜덤 변수 이다^[9]. 그러므로 $|h_{ij}|^2$ 은 $1/\lambda_{ij}$ 를 평균으로 가지는 exponential 분산의 랜덤 변수가 되고, 평균 채널 파워는 $1/\lambda_{ij} = E[|h_{ij}|^2] = d_{ij}^{-\alpha}$ 가 된다. 부 사용자들은 부 사용자들 사이의 채널뿐만 아니라, 주 사용자와의 채널 정보를 완벽하게 알고 있다고 가정하였다^[8].

본 논문이 가정한 Underlay 공존 방법에서는 부 사용자가 주 사용자에게 일정 크기 (즉, 간섭 임계치 \bar{I}) 이하 간섭만을 주어야 하므로^[1], 부 사용자의 전송 파워는 $P_k \leq \bar{I}/|h_{kP_i}|^2 (\forall i \in \mathbb{P})$ 와 같이 간섭 제한을 고려해야 한다. 또한, 부 사용자가 사용할 수 있는 최대 파워도 $P_k \leq \bar{P}$ 와 같이 제한되므로^[5], 위와 같은 두 개의 제한들에 의하여 k 번째 부 사용자가 사용할 수 있는 전송 파워는 다음과 같이 정의 된다.

$$P_k \leq \min \{ \bar{I}/H_k, \bar{P} \} (\forall k \in \mathbb{M}) \quad (1)$$

이때, H_k 는 $H_k = \max_{i \in \mathbb{P}} |h_{kP_i}|^2$ 를 의미하고, 이는 k 번째 부 사용자가 가장 큰 간섭을 주게 되는 주 사용자에게 간섭 임계치 이하의 간섭을 주기 위한 것이다.

만약 부 사용자가 k 번째 중계기를 사용하여 가장 효율적으로 알려진 두 홉으로 중계 전송을 하는 경우 부 사용자의 Capacity는 다음과 같이 정의 된다^[7].

$$C_k = \frac{1}{2} \min \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{P_S |h_{Sk}|^2}{N_o} \right), \log_2 \left(1 + \frac{P_k |h_{kD}|^2}{N_o} \right) \right\} \quad (2)$$

위의 식에서 $1/2$ 는 중계 전송 시 두 개의 시간 슬롯을 사용하기 때문에 들어간 것이고 N_o 는 노이즈 variance 이다. 또한, 주 사용자의 전송기(primary transmitter)로부터 들어오는 간섭은 무시 가능하다고 가정하였다.*

* 이는 주 사용자의 전송기가 부 사용자들로부터 멀리 떨어져 있거나^[10], 임의의 Gaussian 코드 북들을 통해 생성된 주 사용자의 전송기의 신호는 노이즈로 표현된다는 면에서 가능할 수 있다^[11].

III. 무선 인지 네트워크에서 중계 전송의 성능 분석

1. 기존 중계 네트워크의 Outage probability

무선 인지 네트워크가 아닌 기존 환경에서 중계 전송 시 outage probability의 분석부터 먼저 살펴보도록 하겠다. 기존 환경에서 capacity를 최대화 하고 outage probability를 최소화하기 위하여 다양한 중계기 선택 기준들이 제안되어 왔다^[12~15]. 그 중 소스와 중계기 사이의 링크와 중계기와 목적지 사이의 링크의 신호 대비 노이즈 비 (SNR)들의 최소 값을 최대화하는 중계기를 선택하는 max-min 선택 기준이 outage probability를 최소화 하는데 최적화된 기준이다^[14]. 그러므로 기존 네트워크에서는 중계기 전송 기준이 다음과 같이 정의되었다^[14~15].

$$l^* = \arg \max_k \min \{ |h_{Sk}|^2, |h_{kD}|^2 \} \quad (3)$$

이때, l^* 는 선택된 중계기의 인덱스를 나타낸다. 이와 같이 중계기는 중계 링크들의 채널 이득을 기반으로 선택된다.

모든 사용자들이 최대 파워를 사용하여 전송한다고 가정하였을 때, k 번째 중계기를 사용 시 outage probability는 $P_{conv,k}^o = 1 - e^{-(\lambda_{Sk} + \lambda_{kD})U_T/\bar{P}}$ 가 되고, 이때 $U_T = N_o(2^{2C_T} - 1)$ 이고 C_T 는 목표 대역폭 효율(target bandwidth efficiency)이다. 따라서 중계기 선택을 적용하였을 때 outage probability는 다음과 같이 정의 된다^[14].

$$P_{conv}^o = \prod_{k=1}^K \{ 1 - e^{-(\lambda_{Sk} + \lambda_{kD})U_T/\bar{P}} \} \quad (4)$$

2. 무선 인지 중계 네트워크의 Outage probability

기존 네트워크와 다르게 무선인지 네트워크에서는 최대 전송 파워 제한뿐만 아니라 주 사용자에게 주는 간섭 제한까지 고려하여야 하므로, 기존의 중계기 선택 기준은 적합하지 않다. 예를 들어, 기존 시스템에서는 소스와 중계기 그리고 중계기와 목적지 사이의 채널 상태를 기준으로 중계기를 선택하지만, 만약 그 중계기가 주 사용자에게 많은 간섭을 주는 것이라면 무선 인지 환경에서는 적합하지 않다. 그러므로 중계기 선택을 위

한 max-min 기준은 주 사용자에게 주는 간섭까지 고려하여 다음과 같이 정의하여야한다^[8].

$$\begin{aligned} k^* &= \arg \max_k \min \left\{ \min \left\{ \frac{\bar{I}}{H_S}, \bar{P} \right\} |h_{sk}|^2, \right. \\ &\quad \left. \min \left\{ \frac{\bar{I}}{H_S}, \bar{P} \right\} |h_{sk}|^2 \right\} \\ &= \arg \max_k \min \{u_{1,k}, u_{2,k}\} = \arg \max_k U_k \end{aligned} \quad (5)$$

이때, k^* 는 무선 인지 환경에서 선택된 중계기의 인덱스를 나타낸다. 만약, k 번째 중계기를 사용하여 데이터를 전송하는 경우 발생하는 outage probability가 $P_{CR,k}^o$ 라면, (5)의 기준을 이용하여 중계기를 선택하여 전송하는 경우 outage probability는 $P_{CR}^o = \Pr\{U_k \leq U_T\} = \prod_{k=1}^K P_{CR,k}^o$ 이 된다. 주 사용자가 하나만 존재하는 경우에 outage probability는 다음과 같이 정의된다^[8].

명제 1. 단일 주 사용자와 공존하는 부 사용자가 수식 (5)의 기준을 이용하여 중계기를 선택하여 전송 할 때 outage probability가 다음과 같이 정의 된다^[8].

$$P_{CR_1}^o = \prod_{k=1}^K \{P_{conv,k}^o + \beta_{1,k}\} \quad (6)$$

이때, $\beta_{1,k}$ 는 주 사용자에게 주는 간섭 제한 때문에 생긴 outage probability의 증가량으로 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \beta_{1,k} &= e^{-(\lambda_{sk} + \lambda_{kd})U_T/\bar{P}} \left\{ \frac{-e^{-(\lambda_{sk}\gamma_{1,k} + \lambda_{kd}\gamma_{2,k})\bar{I}/\bar{P}}}{(\gamma_{1,k}\bar{I}/U_T + 1)(\gamma_{2,k}\bar{I}/U_T + 1)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{-e^{-\lambda_{sk}\gamma_{1,k}\bar{I}/\bar{P}}}{\gamma_{1,k}\bar{I}/U_T + 1} + \frac{-e^{-\lambda_{kd}\gamma_{2,k}\bar{I}/\bar{P}}}{\gamma_{2,k}\bar{I}/U_T + 1} \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

이때 $\gamma_{1,k} = \lambda_{SP}/\lambda_{Sk} = (d_{SP}/d_{Sk})^\alpha$ 이고 $\gamma_{2,k} = \lambda_{kP}/\lambda_{kD} = (d_{kP}/d_{kD})^\alpha$.

증명: 자세한 증명 과정은 [8]에 나와 있음. ■

위의 명제 1에서 볼 수 있듯이, 무선 인지 네트워크에서는 기존 네트워크에서 발생하는 outage probability에 간섭 제한으로 인하여 증가하는 outage probability로 분리되어 표현할 수 있다.

본 논문에서는 여러 개의 주 사용자가 공존하는 경우

에 outage probability를 보려 한다. 즉, 기존에 하나의 주 사용자에게 미치는 간섭만 고려하여 부 사용자의 사용 가능한 전송 파워가 결정되었지만, 여러 개의 주 사용자가 존재 시 이들 모두에게 미치는 간섭의 양이 간섭 임계치 이하가 되도록 해야 한다. 그러므로 N 개의 주 사용자가 존재 할 때 outage probability $P_{CR,N}^o$ 를 정의 하기 위하여, $\Pr\{u \leq U_T\}$ 의 분포를 우선 구해야 한다. 이때, $u = \min\{\bar{I}/x, \bar{P}\} \cdot y$ 이고 $x = \max_{i \in \mathbb{P}} x_i$, x_i 와 y 는 각각 평균이 $1/\lambda_i$ 와 $1/\lambda_y$ 인 exponential 랜덤 변수 이다. x 의 cumulative density function(CDF)는 $F_x^{\max}(x) = \prod_{i=1}^N \{1 - e^{-\lambda_i x}\}$ 이고, probability density function (pdf)는 $f_x^{\max}(x) = dF(x)/dx$ 이다. 이를 이용하여 $\Pr\{u \leq U_T\}$ 의 분포는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \Pr\{u \leq U_T\} &= \int_{x=0}^{\bar{I}/\bar{P}} \int_{y=0}^{U_T/\bar{P}} f_x^{\max}(x) f_y(y) dx dy \\ &\quad + \int_{x=\bar{I}/\bar{P}}^{\infty} \int_{y=0}^{U_T/\bar{I}} f_x^{\max}(x) f_y(y) dx dy \\ &= 1 - e^{-\lambda_y U_T/\bar{P}} \prod_{i=1}^M (1 - e^{-\lambda_y \bar{I}/\bar{P}}) \\ &\quad + \int_{x=\bar{I}/\bar{P}}^{\infty} f_x^{\max}(x) e^{-\lambda_y x U_T/\bar{I}} dx \\ &= g_{u,N}(\lambda_i, \lambda_y) \end{aligned} \quad (8)$$

k 번째 중계기를 사용하였을 때 outage probability는 $P_{CR,N,k}^o = \Pr\{C_k \leq C_T\} = \Pr\{U_k \leq U_T\}$ 와 같고 수식 (8)을 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} P_{CR,N,k}^o &= 1 - \Pr\{u_{1,k} \geq U_T\} \Pr\{u_{2,k} \geq U_T\} \\ &= 1 - (1 - g_{u,N}(\lambda_{SP_i}, \lambda_{Sk})) (1 - g_{u,N}(\lambda_{kP_i}, \lambda_{kD})) \end{aligned} \quad (9)$$

따라서 N 개의 주 사용자들이 존재 할 때 부 사용자의 outage probability는 수식 (9)를 이용하여 $P_{CR,N}^o =$

$\prod_{k=1}^K P_{CR,N,k}^o$ 와 같이 정의 된다. 그러나 수식 (8)에서 볼 수 있듯이, 다수의 주 사용자들을 고려했을 때 outage probability는 닫힌 형태(closed form)로 표현할 수 없다.

만약 $\lambda_i = \lambda_x, \forall i \in \mathbb{P}$ 의 가정이 사용된다면 수식 (9)를 닫힌 형태로 표현할 수 있게 된다. 이 가정은

$\lambda_{kP_i} = \lambda_{kP} (d_{kP_i} = d_{kP}), \forall i \in \mathbb{P}$ 와 같이 중계기들과 주 사용자들 사이 링크의 채널 평균이 모두 같다는 것으로 일반적인 가정은 아니다. 하지만 다수의 주 사용자들이 부 사용자의 중계 전송 성능에 미치는 영향을 간단하게 알아보기 위한 가정이고, 부 사용자들의 집합이 주 사용자들의 집합과 멀리 떨어져 있는 상태에서는 가능한 가정이 된다. 이러한 가정 하에 다음과 같은 명제로 부 사용자의 outage probability를 정의할 수 있다.

명제 2. N 개의 주 사용자가 존재 시 부 사용자가 수식 (5)를 이용하여 중계기를 선택하여 전송 할 때, outage probability가 다음과 같이 정의 된다.

$$P_{CR_N}^o = \prod_{k=1}^K \{P_{conv,k}^o + \beta_{N,k}\} \quad (10)$$

이때, $\beta_{N,k}$ 는 주 사용자들에게 주는 간섭 제한들 때문에 생긴 outage probability의 증가량으로 다음과 같이 정의 된다.

$$\beta_{N,k} = e^{-\lambda_{sk} + \lambda_{kd}} U_T / \bar{P} \{h_N(\gamma_{1,k}, \lambda_{sk}) + h_N(\gamma_{2,k}, \lambda_{kd}) - h_N(\gamma_{1,k}, \lambda_{sk}) h_N(\gamma_{2,k}, \lambda_{kd})\} \quad (11)$$

이때 $h_N(\gamma, \lambda_y)$ 는 다음과 같다.

$$h_N(\gamma, \lambda_y) = \sum_{j=1}^N \left\{ \binom{N}{j} (-1)^{j+1} + \binom{N-1}{j-1} \frac{(-1)^j N \gamma}{\gamma j + U_T} \right\} \times e^{-\lambda_y \gamma \bar{I} / \bar{P} j} \quad (12)$$

증명: $\lambda_i = \lambda_x, \forall i \in \mathbb{P}$ 가정 하에 x 의 cdf와 pdf는 binomial 이론을 이용하여^[16] 각각 $\overline{F_x^{max}}(x) = (1 - e^{-\lambda_x x})^N$ 와 $f_x^{max}(x) = N[F_x^{max}(x)]^{N-1} f_x(x) = N \lambda_x \sum_{i=1}^N \binom{N-1}{i-1} (-1)^{i-1} e^{-\lambda_x x^i}$ 가 된다. 수식(8)에서 $f_x^{max}(x)$ 대신 $\overline{f_x^{max}}(x)$ 를 대입하여 정리하면 $g_{u,N}(\lambda_x, \lambda_y)$ 는 다음과 같이 정리된다.

$$g_{u,N}(\lambda_x, \lambda_y) = 1 - e^{-\lambda_y U_T / \bar{P}} \left\{ (1 - e^{-\lambda_x \bar{I} / \bar{P}})^N - \sum_{i=1}^N \binom{N-1}{i-1} \frac{N \lambda_x (-1)^{i-1} e^{-\lambda_x \bar{I} / \bar{P} i}}{\lambda_x i + \lambda_y U_T} \right\} \quad (13)$$

수식 (13)에서 $(1 - e^{-\lambda_x \bar{I} / \bar{P}})^N = \sum_{j=0}^N \binom{N}{j} (-1)^j \times$

$e^{-\lambda_x \bar{I} / \bar{P} j}$ 이므로, 수식 (13)을 수식 (9)에 적용하면 수식 (10)과 같은 형태로 정리 된다. ■

위의 명제 2를 통하여 다수의 주 사용자들이 존재할 때 기존 중계 전송 시에 비하여 증가하는 outage probability가 명제 1과 같이 독립된 항으로 표현 가능하다는 것을 알 수 있다. $\beta_{N,k}$ 는 N 에 관한 증가함수이므로, 주 사용자가 늘어날수록 outage probability가 증가함을 나타내 준다.

IV. 모의 실험

본 모의 실험에서는 다수의 주 사용자의 수신기들이 부 사용자의 중계 전송 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 우선, 그림 2와 그림 3을 통하여 III장에서 유도한 outage probability가 모의실험 결과와 일치함을 확인할 수 있다. 본 실험들을 위하여 주 사용자의 수신기들은 좌표 (1.5, 1.5), 부 사용자의 송신기는 좌표 (0, 1), 부 사용자의 수신기는 좌표 (1, 0)에 위치하고, 중계기들은 좌표들 (0, 0), (1, 0), (0, 1), (1, 1)로 구성되는 사각형의 영역에 균일하게 분포 되도록 배치하였다.

그림 2는 최대 전송 파워 대비 간섭 한계 값의 비

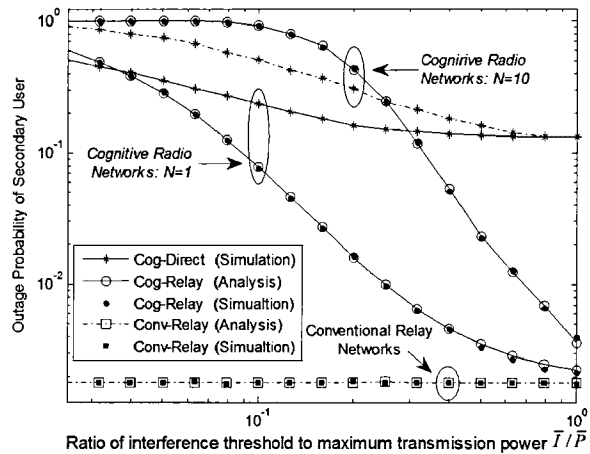


그림 2. 최대 전송 파워 대비 간섭 한계 값의 비(\bar{I}/\bar{P}) 증가에 따른 기존 네트워크에서의 중계 전송 성능 (Conv-Relay), 무선 인지 네트워크에서 직접 전송 성능(Cog-Direct) 및 중계 전송 성능 (Cog-Relay)의 비교

Fig. 2. Comparison of outage probabilities of cognitive relay networks (Cog-Relay) and the direct transmission in cognitive radio networks (Cog-Direct) according to the interference threshold to the transmission power ratio, \bar{I}/\bar{P} .

(\bar{I}/\bar{P})를 증가시켰을 때 기존 네트워크에서의 중계 전송의 성능(Conv-Relay), 무선 인지 네트워크에서 직접 전송(direct transmission)의 성능(Cog-Direct), 그리고 중계 전송의 성능(Cog-Relay)을 비교하였다. 이때, $K=20$, $\bar{P}/N_o=30\text{ dB}$, 그리고 $C_T=5\text{ bps/Hz}$ 이 사용되었다. 그림을 통해서 알 수 있듯이 무선 인지 네트워크가 되면서 생긴 간섭의 제한으로 인하여 outage probability가 증가함을 확인할 수 있다. 또한, 전반적으로 중계 전송이 직접 전송에 비하여 낮은 outage probability를 얻을 수 있다.

하지만, 간섭 임계값이 낮은 경우, 중계 전송보다 직접 전송이 더 성능이 좋게 되고, 그 성능 차이는 N 이 클수록 커진다. 기본적으로 간섭 임계값이 작아짐에 따라 중계기의 전송 파워도 작아지게 되는데, 이 경우 중계 전송 시 사용하는 두 배의 자원의 크기로 인한 영향(예를 들어, 수식 (2)의 $1/2$ 부분)이 중계 전송으로 얻게 되는 이득보다 더 큰 영향을 가지기 때문이다^[8]. 또한, 낮은 간섭 임계 값 사용 시, 주 사용자가 많아질수록 중계기의 파워 제한이 커지므로 직접 전송과 중계 전송간의 성능 차이도 커지게 된다.

또한, 그림 2를 통하여 주 사용자의 개수가 많아짐에 따라 중계 전송이 직접 전송에 비해 가지는 이득이 감소함을 확인할 수 있다. 즉, 주 사용자가 한 명인 경우

($N=1$) \bar{I}/\bar{P} 가 0.04 이하의 경우에만 단일 전송이 더 효율적이 되는 반면에, 주 사용자가 10명인 경우 ($N=10$) \bar{I}/\bar{P} 가 0.2 이상이 되어야 중계 전송이 의미 있게 된다. 즉, 주 사용자의 개수가 많아짐에 따라 고려해야 하는 간섭 제한도 많아지고, 이로 인하여 중계기들이 사용할 수 있는 전송 파워의 크기가 작아지면서 중계 전송이 비효율적이 되는 것이다.

그림 3은 주 사용자 개수(N) 증가에 따른 무선 인지 중계 전송 (Cog-Relay)와 무선 인지 직접 전송 (Cog-Direct)간의 outage probability 성능을 알아본 것이다. 이때, $\bar{I}/\bar{P}=10^{-9}$, $\bar{P}/N_o=30\text{ dB}$, 그리고 $C_T=5\text{ bps/Hz}$ 이 사용되었다. 그림 3에서 볼 수 있듯이, 주 사용자 개수가 증가하면서 outage probability들이 증가하는데, 중계 전송이 직접 전송에 비하여 주 사용자의 개수에 따른 민감성(sensitivity)가 높음을 확인할 수 있다. 이는 직접 전송의 경우 주 사용자의 소스에서만 주 사용자의 개수로 인한 변화가 생기는 반면에, 중계 전송의 경우 소스 및 중계기에서 영향을 받기 때문이다.

또한, 선택 가능한 중계기의 개수(K)가 커짐에 따라서 중계 전송의 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 다수의 주 사용자들이 공존하더라도 중계기 선택의 다이버시티를 증가시켜 주면 중계 전송이 직접 전송보다 더 높은 성능을 낼 수도 있게 된다.

V. 결 론

본 논문은 다수의 주 사용자 수신기들이 존재하는 경우 주 사용자의 중계 전송의 outage probability를 평가하고 이를 직접 전송의 성능과 비교했다는 데 의미가 있다. 주 사용자의 개수가 많아질수록 중계 전송이 직접 전송보다 더 민감하게 성능이 감소되는데, 이로 인하여 작은 간섭 임계치와 같은 특정 환경에서는 중계 전송이 직접 전송보다 비효율적이 된다. 이러한 중계 전송의 성능 저하는 중계기 선택의 다이버시티를 늘리면 보완할 수 있으므로, 주 사용자의 개수가 많은 경우에도 선택 가능한 중계기의 개수를 늘려주어 효율적인 중계 전송이 가능할 수 있다. 이러한 결론들은 다수의 주 사용자가 무선인지 중계 네트워크에 미치는 영향에 대한 시각을 가질 수 있도록 도와 줄 것이다.

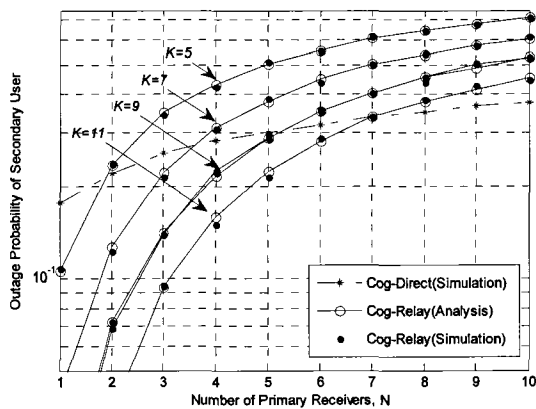


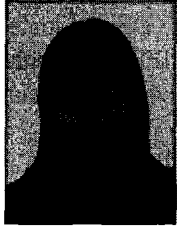
그림 3. 주 사용자 개수(N) 증가에 따른 무선 인지 중계 전송(Cog-Relay)와 무선 인지 직접 전송(Cog-Direct) 간 성능 비교

Fig. 3. Comparison of outage probabilities of cognitive relay networks (Cog-Relay) and the direct transmission in cognitive radio networks (Cog-Direct) according to the number of primary receivers.

참 고 문 헌

- [1] A. Goldsmith, S. A. Jafar, I. Maric, and S. Srinivasa, "Breaking Spectrum Gridlock With Cognitive Radios: An Information Theoretic Perspective," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 97, No. 5, pp. 894 - 914, May 2009.
- [2] C. Chang and J. Chang, "Optimal Design Parameters in a Multihop Packet Radio Network using Random Access Techniques," *IEEE Global Telecommunications Conference*, Vol. 1, pp. 493-497, June 1984.
- [3] O. Simeone, U. Spagnolini, and Y. Bar-Ness, "Stable Throughput of Cognitive Radios With and Without Relaying Capability," *IEEE Trans. on Comm.*, Vol. 55, Issue. 12, pp. 2351-2360, Dec. 2007.
- [4] K. Lee and A. Yener, "Outage Performance of Cognitive Wireless Relay Networks," *IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 1-5, Nov. 2006.
- [5] J. Mietzner, L. Lampe, and R. Schober, "Distributed Transmit Power Allocation for Multihop Cognitive-radio Systems," *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, Vol. 8, No. 10, pp. 5187-5201, Oct. 2009.
- [6] S. Kim, W. Choi, Y. Choi, J. Lee, Y. Han, and I. Lee, "Downlink Performance Analysis of Cognitive Radio based Cellular Relay Networks," *Int. Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, pp. 1-6, May 2008.
- [7] J. Lee, H. Wang, W. Seo, and D. Hong, "QoS-guaranteed Transmission Mode Selection for Efficient Resource Utilization in Multi-hop Cellular Networks," *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, Vol. 7, No. 10, pp. 3697-3701, Oct. 2008.
- [8] J. Lee, H. Wang, J. G. Andrews, and D. Hong, "Outage Probability of Cognitive Relay Networks with Interference Constraints", submitted to *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, Available at <http://users.ece.utexas.edu/~jandrews/publications.php>.
- [9] D. Michalopoulos and G. Karagiannidis, "Performance Analysis of Single Relay Selection in Rayleigh Fading," *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, Vol. 7, Issue 10, pp. 3718-3724, Oct. 2008.
- [10] X. Kang, Y. C. Liang, and A. Nallanathan, "Optimal Power Allocation for Fading Channels in Cognitive Radio Networks: Delay-Limited Capacity and Outage Capacity," *IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 1544-1548, May 2008.
- [11] R. Etkin, A. Parekh, and D. Tse, "Spectrum Sharing for Unlicensed Bands," *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.*, Vol. 25, Issue 2, pp. 517-528, April. 2007.
- [12] V. Sreng, H. Yanikomeroglu, and D. D. Falconer, "Relayer Selection Strategies in Cellular Networks with Peer-to-peer Relaying," *IEEE Vehicular Technology Conference*, Vol. 3, pp. 1949- 1953, Oct. 2003.
- [13] Z. Dongmei and T. D. Todd, "Cellular CDMA capacity with out-of-band multihop relaying," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, Vol. 5, No. 2, pp. 170- 178, Feb. 2006.
- [14] A. Muller and J. Speidel, "Relay Selection in Dual-Hop Transmission Systems: Selection Strategies and Performance Results," *IEEE International Conference on Communications*, pp. 4998-5003, May 2008.
- [15] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed, and A. Lippman, "A Simple Cooperative Diversity Method Based on Network Path Selection," *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.*, Vol. 24, Issue 3, pp. 659-672, March 2006.
- [16] M. Abramowitz and I. A. Stegun (Eds.). *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, 9th printing. New York: Dover, 1972.

저 자 소 개



이 제 민(학생회원)
 2005년 연세대학교 전기전자 공학과 학사 졸업.
 2007년 연세대학교 전기전자 공학과 석사 졸업.
 2007년~현재 연세대학교 전기 전자공학과 박사 과정.

<주관심분야 : 무선 인지 네트워크, 주파수 공유 기법, 다중 홉 시스템, 다중 반송파 시스템>



왕 한 호(학생회원)
 2004년 연세대학교 전기전자 공학과 학사 졸업.
 2006년~현재 연세대학교 전기 전자공학과 석·박사 통합 과정.

<주관심분야 : 4G시스템, 무선자원관리, MIMO 시스템>



노 고 산(학생회원)
 2007년 연세대학교 전기전자 공학과 학사 졸업.
 2007년~현재 연세대학교 전기 전자공학과 석·박사 통합 과정.

<주관심분야 : 이동통신, 다중 홉 시스템, 다중 반송파 시스템>



홍 대 식(평생회원)
 1990년 Purdue University Electrical Engineering 박사 졸업
 1991년~현재 연세대학교 전기 전자공학과 교수

<주관심분야 : 디지털통신, 통신신호처리, 4G시스템, OFDM 시스템>