

논문 2009-46TC-6-3

CSI 지연이 있는 상황 인지 무선 협동 릴레이 네트워크의 오수신율

(Outage Performance of Cooperative Cognitive Wireless Relay Networks with Delayed CSI)

김 남 수*

(Nam-Soo Kim)

요 약

본 논문에서는 최근에 활발한 연구가 진행되고 있는 상황인지 무선시스템을 대상으로 하여, 직접 경로 및 간접 경로를 갖는 협동 다이버시티를 적용하였을 경우 시스템의 성능을 분석하였다. 그리고 릴레이-목적지 경로에서는 여러 개의 릴레이 중 가장 큰 신호 대 잡음비를 갖는 릴레이만 송신하는 선택 릴레이 방식을 채택하였고, 이 릴레이를 선택하기 위하여 필수적으로 발생하는 채널 상태정보(CSI) 지연에 의한 시스템 성능의 열화를 포함한 식을 유도하였다. 분석결과 직접 경로로부터의 수신 전력이 간접경로 수신 전력의 1/10만 있어도 시스템의 성능이 4.4 dB 개선되므로 Rayleigh 페이딩 환경 하에서 협동 다이버시티의 적용이 매우 효과적임을 알 수 있었고, 상황 인지 시스템의 주파수 획득 확률이 적을수록, 그리고 채널 지연이 클수록 시스템의 성능은 저하되었다.

Abstract

The performance of a cognitive radio system with cooperative diversity which includes the direct and indirect path is analysed. The selection relay cooperation which selects the best relay, the relay with the best received signal-to-noise ratio(SNR) in destination node, is considered and derived the performance degradation caused by the CSI(Channel State Information) delay analytically. Numerical examples show that the cooperative diversity which have the direct and the indirect paths effectively improves the system performance in Rayleigh fading; the performance improves 4.4 dB with 1/10 of SNR of the indirect path. And the system performance is more degraded with the less frequency acquisition probability and with the high CSI delay.

Keywords : Cognitive radio, Relay system, Cooperative diversity, CSI, Rayleigh fading.

I. 개 요

상황인지 무선 시스템 (Cognitive radio system)은 이미 주파수를 허가 받아 사용 중인 시스템이 주파수를 사용하고 있지 않을 때, 주파수 사용 효율을 높이기 위하여 사용하지 않는 주파수를 일시적으로 이용하는 것이다. 현재 상업적인 데이터 서비스, 비상통신, 그리고 군사 통신에 활용하기 위한 연구와 향후 무선 시스

템 및 무선 네트워크에 도입하려는 연구가 활발히 진행되고 있다^[1~3].

또한 일시적이거나 비상용, 군사용으로 주목 받고 있는 애드 혹(Ad hoc) 네트워크는 전력이 제한된 시스템이기 때문에 소모 전력절약이 매우 중요한 관건이다. 근래에 전력 절약 방안의 하나로 제안된 릴레이를 통한 신호 중계방식은 한 개의 릴레이를 사용할 때보다 여러 개의 릴레이를 사용하여 동일한 정보를 전송하면 무선 채널에서 다이버시티 효과를 얻을 수 있으므로 네트워크의 전력을 더욱 절약할 수 있는 것으로 나타났다^[4~6]. 그러나 여러 개의 릴레이가 동시에 신호를 전송한다면,

* 평생회원, 청주대학교 전자정보공학부
(Cheongju University)

접수일자: 2009년2월9일, 수정완료일: 2009년6월17일

신호 식별을 위해 직교성을 유지하여야 하고 주파수, 시간, 코드 등의 통신자원이 릴레이 수만큼 필요하게 되므로 최근에는 여러 개의 릴레이로부터 수신한 신호 중 가장 큰 수신 전력을 갖는 릴레이만 송신하면 통신 자원도 절약하고 간섭도 줄일 수 있다는 연구 결과가 발표되었다^[7~8]. 그러나 현실적으로 가장 큰 수신 전력을 갖는 릴레이를 선택하기 위하여 여러 개의 릴레이로부터 수신된 신호를 서로 비교하고, 비교한 것 중 가장 큰 릴레이를 선택하고 선택된 릴레이 만 정보를 송신하도록 하는 과정에서 시간 지연이 발생하게 된다. 일반적으로 무선 채널이 페이딩을 받아서 채널의 상태가 빠르게 변화한다면, 현재의 채널상태가 시간이 지연된 후의 채널 상태와 동일하다고 할 수 없게 된다^[9~10].

이와 같은 이유로 2008년 Vicario 등은 채널 상태 정보(CSI, Channel State Information)의 지연이 선택 릴레이 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하였는데, 지연이 있는 경우에는 시스템의 성능에 민감한 영향을 미친다는 것을 발표하였다^[11].

그리고 [11]과 [12]에서는 상황인지 무선 시스템에서 소스로부터 성공적으로 복조한 모든 릴레이 가 송신하는 반복 릴레이(Repetition-based relay) 방식과, 목적지에서 가장 큰 수신 신호 대 잡음 비를 갖는 릴레이만 선택하여 전송하는 선택 릴레이 방식의 오수신율을 비교 분석하였다.

그러나 [9]는 채널상태 정보의 지연에 따른 영향은 분석하였지만, 시스템 모델을 여러 개의 릴레이들로부터 수신한 신호 중 가장 큰 릴레이만 전송 하도록 하는 선택 릴레이를 사용하는 경우만 고려하였고, 시스템의 성능을 개선할 수 있는 소스로부터 목적지 노드로 가는 직접 경로를 포함하지 않았다. 또한 [11]과 [12]는 상황 인지 무선 시스템에서 릴레이를 선택하여 전송하는 경우, 릴레이를 선택하는 과정과 선택된 릴레이가 송신할 때까지의 시간 지연으로 말미암아 비롯되는 시스템의 성능 저하는 고려하지 않았다.

그러므로 본 논문에서는 다음과 같은 시스템을 모델로 하여 각 파라미터가 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하였다: 전력 및 통신자원을 절약하기 위하여 선택 릴레이를 사용할 뿐만 아니라, (1)소스로부터의 직접 경로를 포함한 협동 다이버시티(Cooperative diversity)를 포함하고, (2)채널상태 정보의 지연을 고려한, (3)상황인지 무선시스템을 모델로 하여, 채널상태 정보의 지연을 고려한 협동 다이버시티 상황 인지 릴레

이 시스템의 성능을 분석하고자 한다.

상기 시스템의 분석을 위하여 본 논문을 다음과 같이 구성하였다. 제II장에서는 분석하고자 하는 시스템 모델과 채널상태 정보의 지연에 관하여 설명한다. 제III장에서는 직접경로(소스-목적지 경로)와 간접경로(소스-릴레이-목적지 경로)로부터 수신한 신호의 확률밀도함수를 유도하고, 이를 적용하여 시스템의 오수신율을 유도하였는데, 먼저 상황인지 시스템이 항상 채널을 획득하는 경우를 분석하고, 다음으로 주파수획득 확률이 항상 1이 아닌 경우를 분석하였다. 이와 같이 유도한 결과를 이용하여 제IV장에서 수치적인 예를 들어서 파라미터의 변화에 따른 성능변화를 검토하고 분석하였다. 마지막으로 제V장에서는 본 논문에서 얻은 결과를 요약하고 결론을 맺었다.

II. 시스템 모델

1. 시스템 모델

다음 그림1은 본 논문에서 고려한 상황인지 무선 시스템의 모델인데, [11]에서 사용한 모델과 동일하다. Phase1에서는 소스가 송신하고 릴레이와 목적지를 포함한 모든 노드들이 수신하며, Phase2에서는 소스로부터 데이터를 복조한 릴레이(복조 송신 릴레이, Decode and forward relay) 중 목적지에서 수신한 신호 대 잡음비가 가장 큰 릴레이만 송신하게 되는 선택 릴레이 방식이다.

이 그림에서 우선사용자(Primary user)는 기존에 스펙트럼의 허가를 얻어서 사용하고 있는 시스템의 사용자이다. 앞에서 언급한 바 와 같이 상황인지 무선 시스템은 기존의 시스템이 주파수를 사용하지 않을 경우에만 일시적으로 주파수를 획득하여 사용하게 된다. 그러

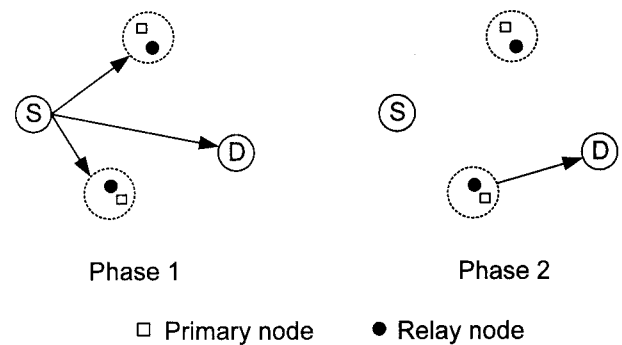


그림 1. 선택 릴레이 상황인지 무선 시스템 모델
Fig. 1 Selection relay cognitive radio system model.

므로 Phase 1에서 릴레이가 소스로부터 송신한 신호를 성공적으로 복조 하였다고 하더라도, 기존에 사용하던 시스템이 주파수를 사용한다면 Phase 2에서 사용할 주파수가 없기 때문에 목적지로 신호를 중계(Relaying)할 수 없게 된다.

우선 사용자는 주파수를 사용하지 않을 경우 비콘(Beacon) 신호를 송신하여 인접한 타 노드들에게 주파수가 비어있으므로 사용할 수 있다는 것을 알려준다^[11]. 그러므로 릴레이 노드들은 비콘 신호를 수신하여 주파수를 사용할 수 있다는 것을 판정하게 되는데 이 과정을 주파수 획득(Spectrum acquisition)이라고 한다. 무선 채널이 Rayleigh 페이딩을 받는다고 가정하면 비콘 신호를 수신할 평균 검출 확률은 다음 식과 같이 주어진다^[2, 13].

$$P_d = e^{-\frac{\Gamma}{2}} \sum_{k=0}^{u-2} \frac{1}{k!} \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^k + \left(\frac{1+\bar{\rho}}{\bar{\rho}}\right)^{u-1} \times \left(e^{-\frac{\Gamma}{2(1+\bar{\rho})}} - e^{-\frac{\Gamma}{2}} \sum_{k=0}^{u-2} \frac{1}{k!} \left\{ \frac{\Gamma\bar{\rho}}{2(1+\bar{\rho})} \right\}^k \right) \quad (1)$$

여기서 Γ 는 신호 유무를 판정하기 위한 신호 대 잡음비의 임계값이며, $\bar{\rho}$ 는 평균 신호 대 잡음비, 그리고 u 는 시간-대역폭의 곱이다.

만일 송신 노드가 a 이고 수신 노드가 b 라고 한다면 수신 노드에서 받은 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$r_b = h_{ab}x_a + n_b \quad (2)$$

여기서 x_a 는 노드 a 에서 송신하는 신호이고 평균 송신전력은 $P_a = E[|x_a|^2]$ 이다. h_{ab} 는 노드 a 와 노드 b 사이의 채널 진폭이득인데, 복소 Gaussian 분포를 하며 평균이 영, 분산이 1이다. 그리고 채널은 Rayleigh 페이딩을 받는다고 가정한다. n_b 는 노드 b 에서의 잡음이며 h_{ab} 와는 독립인 Gaussian 분포를 하고 평균이 영, 분산이 N 이다. 여기서 송신 신호 대 잡음비, Tx_SNR ,를 다음과 같이 정의하자.

$$Tx_SNR = \frac{P_a}{N} \quad (3)$$

2. 지연된 채널상태 정보

여러 개의 릴레이를 이용하여 중계하는 방식은 사용

하는 무선 채널의 직교성을 이용 하는데, 주파수, 시간, 코드 등이 대표적이다. 시간 직교성을 이용하는 경우, 반복 릴레이 방식은 소스로부터 전송된 정보를 성공적으로 복조한 l 개의 릴레이가 모두 전송에 참여하기 때문에 전송용량이 $1/(l+1)$ 로 줄어들게 된다^[14]. 이런 단점을 극복하기 위하여 릴레이에서 전송되는 신호 중 목적지에서 수신한 신호 대 잡음비 (만일 송신 신호 대 잡음비가 동일하다면 채널이득)가 가장 큰 신호만 선택하는 선택 릴레이 방식이 등장하게 되었으며, 이 경우 전송용량은 1/2이 되어 반복릴레이 방식에 비하여 채널 용량이 증가하게 된다^[11~12]. 그러므로 송신 신호 대 잡음비가 동일하다고 가정할 때, l 개의 릴레이에서 송신된 신호 중 목적지에서 수신한 채널이득이 최대가 되는 릴레이를 실시간으로 안다고 가정하면 채널이득이 가장 큰 신호를 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$|h_{rd,max}| = \max\{|h_{rd}|\}, i = 1, 2, \dots, l \quad (4)$$

그러나 채널이 급변하는 경우에는 목적지에서 채널이득이 최대가 되는 릴레이를 선정하고, 선정된 정보를 해당 릴레이로 전송한 후, 결국 선정된 릴레이가 정보를 전송하는 동안 실제 채널상태 정보의 지연이 발생하게 된다. 그림2는 이 과정을 나타내고 있는데 목적지에서 최대 채널이득을 갖는 릴레이를 결정해서 궤환하는 시간 Δt 가 크게 되면 지연된 채널이득은 실제 채널이득과 상이하게 된다.

이때 실제 채널이득($h_{rd,max}$)과 지연된 채널이득($\tilde{h}_{rd,max}$)사이에는 다음과 같은 관계가 있다^[10].

$$h_{rd,max} = \rho \tilde{h}_{rd,max} \quad (5)$$

여기서 ρ 는 채널 지연의 영향을 받는 상관계수인데, Rayleigh 페이딩 시에는

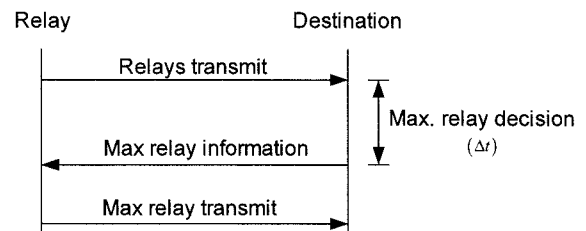


그림 2. 지연 채널 상태 정보의 발생원인
Fig. 2. Causes of a CSI delay.

$$\rho = J_0(2\pi f_d T) \quad (6)$$

이 된다. 여기서 $J_0(\cdot)$ 는 제1종 영차 베셀(Bessel) 함수이고, f_d 는 도플러 주파수, 그리고 T 는 시간지연이다. 그리고 T 는 그림2에서 나타낸 바와 같이 릴레이와 목적지 사이의 왕복 정보 전송시간, 목적지에서 최대 신호 대 잡음비를 갖는 노드의 결정시간(Δt), 그리고 릴레이와 목적지의 정보 복조 시간 등이 포함된다.

목적지에서 수신된 전력이 임계치 이하가 될 때를 오수신이라고 정의하면, 오수신율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{out} = \left(|h_{sd}|^2 + |\tilde{h}_{rd,max}|^2 < \Gamma \right) \quad (7)$$

여기서 Γ 는 정규화된 임계치로써 $\Gamma = (2^{2R} - 1) / Tx_SNR$ 이며, Tx_SNR 은 (3)에서 정의한 송신 신호 대 잡음비, 그리고 R [bps/Hz]는 정보전송속도이다.

III. 오수신율 유도

1. 송신 채널을 항상 획득할 경우

이 절에서는 먼저 송신 채널을 항상 획득하는 경우를 고려하자. 소스로부터 정보를 성공적으로 복조한 릴레이 세트를 $D(s)$ (여기서 $D(s) = l$)라고 하고, 그 중 가장 큰 신호 대 잡음비를 갖는 릴레이만 송신하는 경우 오수신율은 다음과 같이 쓸 수 있다^[12].

$$P_{out} = \sum_{D(s)} \Pr \left[|h_{sd}|^2 + |\tilde{h}_{rd,max}|^2 < \Gamma | D(s) \right] \Pr [D(s)] \quad (8)$$

오수신율을 유도하기 위하여 $X_1 = |h_{sd}|^2$, $X_2 = |\tilde{h}_{rd,max}|^2$, 그리고 $X = X_1 + X_2$ 라고 하면 X 의 누적분포함수(CDF), $F_x(x)$,는 다음과 같다.

$$F_x(x) = \int_0^x F_{X_1}(x-z) p_{X_2}(z) dz \quad (9)$$

그런데 Rayleigh 페이딩을 가정하므로 X_1 의 누적분포함수는

$$F_{X_1}(x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (10)$$

여기서 $\lambda_1 = 1/E(|h_{s1}|^2)$ 이고, l 개의 릴레이 노드가 전송하고 목적지 노드에서 최대 신호 대 잡음비를 선택한다고 하면, 목적지 노드에서 채널 상태 정보의 지연을 고려한 선택 릴레이의 누적분포함수는 다음과 같다^[10].

$$F_{X_2}(x) = l \sum_{k=0}^{l-1} \binom{l-1}{k} \frac{(-1)^k}{k+1} \left(1 - e^{-\frac{x(k+1)\lambda_{rd}}{1+(1-\rho^2)k}} \right) \quad (11)$$

여기서 각 노드로부터 수신한 목적지 노드에서의 평균 전력은 동일하다고 가정하였다

$$(E(|h_{rd,i}|^2), i = 1, 2, \dots, l) = E(|h_{rd}|^2).$$

또한 $\lambda_{rd} = 1/E(|h_{rd}|^2)$ 로 정의하고, $E(|h_{rd}|^2) \leq 1$ 이다. 그리고 (11)로 부터

$$p_{X_2}(x) = l \sum_{k=0}^{l-1} \binom{l-1}{k} (-1)^k \frac{\lambda_{rd}}{1+(1-\rho^2)k} e^{-\frac{x(k+1)\lambda_{rd}}{1+(1-\rho^2)k}} \quad (12)$$

이 된다. (10)과 (12)를 (9)에 대입하면, X 의 누적분포함수는 다음과 같이 유도할 수 있다

$$\begin{aligned} F_x(x) &= l \sum_{k=0}^{l-1} \binom{l-1}{k} (-1)^k \\ &\times \left[\frac{k}{k+1} \left(1 - e^{-\frac{\lambda_{rd}(k+1)x}{1+(1-\rho^2)k}} \right) \right. \\ &\left. + \frac{\lambda_{rd}}{(1+(1-\rho^2)k)\lambda_{sd} + (k+1)\lambda_{rd}} \left(e^{-\frac{(k+1)\lambda_{rd}x}{1+(1-\rho^2)k}} - e^{-\lambda_{sd}x} \right) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

그러므로

$$F_x(\Gamma) = \Pr \left[|h_{sd}|^2 + |\tilde{h}_{rd,max}|^2 < \Gamma | D(s) \right] \quad (14)$$

이 되고, 전체 릴레이 노드의 수를 m 개라고 하고, 그 중 l 개의 릴레이가 성공적으로 복조하여 송신한다고 하면

$$\Pr [D(s)] = \binom{m}{l} (1 - e^{-\Gamma \lambda_r})^{m-l} e^{-\Gamma \lambda_{rd} l} \quad (15)$$

이 된다. 그러므로 (14)와 (15)를 (8)에 대입하면 오수신율은

$$P_{out} = (1 - e^{-\lambda_{sr}\Gamma})^m + \sum_{l=1}^m l \sum_{k=0}^{l-1} \binom{l-1}{k} (-1)^k \times \left[\frac{k}{k+1} \left(1 - e^{-\frac{\lambda_{sd}(k+1)\Gamma}{1+(1-\rho^2)k}} \right) + \frac{\lambda_{rd}}{(1+(1-\rho^2)k)\lambda_{sd} + (k+1)\lambda_{rd}} \right] \times \left(e^{-\frac{(k+1)\lambda_{sr}\Gamma}{1+(1-\rho^2)k}} - e^{-\lambda_{sr}\Gamma} \right) \times \binom{m}{l} (1 - e^{-\Gamma\lambda_{sr}})^{m-l} e^{-\Gamma\lambda_{sd}l} \quad (16)$$

이다. 여기서 첫 번째 항은 모든 릴레이가 소스로부터의 정보를 복조하지 못하여 중계를 할 수 없는 경우이다 ($D(s) = \emptyset$). 두 번째 항은 채널 상태 정보가 지연이 있을 경우의 오수신율을 나타낸 것인데, 전체 m 개의 릴레이 중 l 개의 릴레이가 성공적으로 복조하여 목적지 노드로 송신하는 경우의 오수신율이다. (16)에서 소스와 목적지의 직접 경로가 없을 경우에는 $\lambda_{sd} = \infty$ 가 되고, 이 경우는 [9]의 (2)와 동일한 수식이 된다.

2. 송신채널을 항상 획득하지 못할 경우

앞에서 설명한 바와 같이 상황인지 무선 시스템은 우선 사용자가 주파수를 사용하고 있다면 주파수를 획득하지 못하게 된다. 따라서 1절에서 언급한 경우와 더불어 주파수를 획득할 확률을 추가로 고려해야 한다. 이 경우 오수신율은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{out} = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{l=0}^j \Pr \left[|h_{sd}|^2 + |\tilde{h}_{rd,\max}|^2 < \Gamma | D(s) = l, \delta = j \right] \times \Pr [D(s) = l | \delta = j] \right) \Pr(\delta = j) \quad (17)$$

여기서

$$\Pr \left[|h_{sd}|^2 + |\tilde{h}_{rd,\max}|^2 < \Gamma | D(s) = l, \delta = j \right] \quad (18)$$

은 j 개의 릴레이가 주파수를 획득하고 l 개의 릴레이가 송신할 때, 목적지에서 수신한 채널이득의 합이 임계치보다 작을 확률로서 (13)으로 부터 얻을 수 있다. 그리고

$$\Pr(\delta = j) = \binom{m}{j} (1 - P_d)^{m-j} P_d^j \quad (19)$$

이며, 주파수를 전체 m 개의 릴레이 중 j 개의 릴레이가 주파수를 획득할 확률이다. P_d 는 릴레이가 채널을 획득할 확률이며 (1)에 정의하였다. 그리고

$$\Pr [D(s) = l | \delta = j] = \binom{j}{l} (1 - e^{-\lambda_{sr}\Gamma})^{j-l} e^{-\lambda_{sr}\Gamma} \quad (20)$$

는 주파수를 획득한 j 개의 릴레이 중 l 개의 릴레이가 소스로부터의 신호를 성공적으로 복조하여 송신할 확률이다. 그러므로 채널이득의 지연이 있을 때 선택협동 상황인지 무선 시스템의 오수신 확률은 (18), (19) 및 (20)을 (17)에 대입하면 얻을 수 있다.

$$P_{out} = \sum_{j=1}^m \left\{ (1 - e^{-\lambda_{sr}\Gamma})^j + \sum_{l=1}^j l \sum_{k=0}^{l-1} \binom{l-1}{k} (-1)^k \times \left[\frac{k}{k+1} \left(1 - e^{-\frac{\lambda_{sd}(k+1)\Gamma}{1+(1-\rho^2)k}} \right) + \frac{\lambda_{rd}}{(1+(1-\rho^2)k)\lambda_{sd} + (k+1)\lambda_{rd}} \times \left(e^{-\frac{(k+1)\lambda_{sr}\Gamma}{1+(1-\rho^2)k}} - e^{-\lambda_{sr}\Gamma} \right) \right] \right\} \times \binom{m}{j} (1 - P_d)^{m-j} P_d^j \quad (21)$$

IV. 수치적인 예

이 장에서는 수치적인 예를 위하여 각 노드가 동일한 송신전력을 갖는 일반적인 상황을 가정하였고, 소스-릴레이, 릴레이-목적지간의 채널이득이 동일한 $\lambda_{sd} = \lambda_{rd} = 2$, 릴레이의 수 $m = 5$, 그리고 $R = 1 [bps.Hz]$ 인 경우를 분석하였다.

그림3은 주파수 획득의 영향을 배제하고 ($P_d = 1$), 직접경로(소스-목적지 경로)와 간접경로(소스-릴레이-목적지 경로)의 수신 신호를 동시에 사용하는 협동 다이버시티 시스템과 간접경로만을 사용하는 선택 릴레이 시스템의 성능을 비교하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 채널지연이 있는 경우에도 협동 다이버시티 시스템은 릴레이 시스템에 비하여 항상 성능이 개선됨을 알 수 있었다. 그리고 채널지연으로 $\rho = 0.9$ 인 경우, 직접 경로를 사용하지 않을 때에는 수신오율 1×10^{-3} 을 유지하기 위하여 송신 신호 대 잡음비가 24 dB 가 필요하였으나, 직접경로의 채널이득이 큰 순서(즉, 목적지에서 수신전력이 큰 순서)대로 $\lambda_{sd} = 2\lambda_{sr}$, $\lambda_{sd} = 5\lambda_{sr}$, $\lambda_{sd} = 10\lambda_{sr}$ 인 경우 각각 17 dB, 18.4 dB, 그리고 19.6 dB 가 필요하였다. 따라서 직접경로가 존재할 경우, 간접경로만 존재하는 경우에 비해서 각각 7 dB, 5.6 dB,

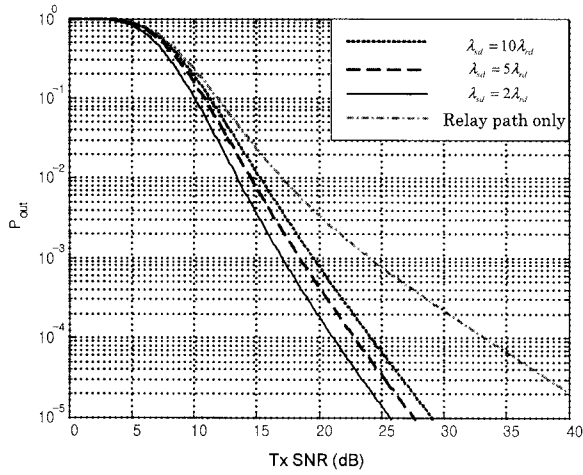


그림 3. 직접경로 전력파와 시스템의 오수신율
 $(\lambda_{sr} = \lambda_{rd} = 2, P_d = 1, \rho = 0.9, m = 5, R = 1)$.
 Fig. 3. Direct path power vs. outage probability.
 $(\lambda_{sr} = \lambda_{rd} = 2, P_d = 1, \rho = 0.9, m = 5, R = 1)$.

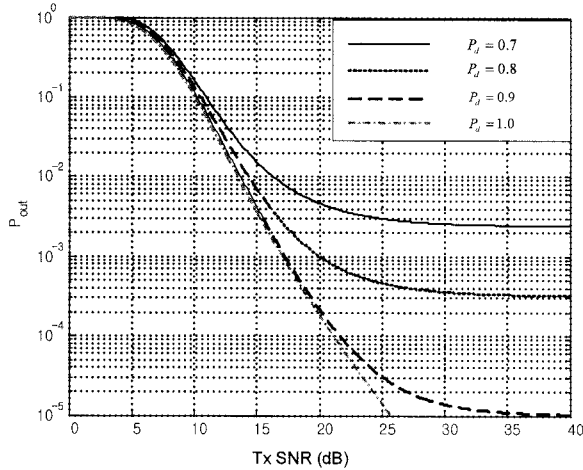


그림 4. 주파수 획득 확률의 변화와 시스템 성능
 $(\lambda_{sr} = \lambda_{rd} = 2, \lambda_{sd} = 2\lambda_{rd}, \rho = 0.9, m = 5, R = 1)$.
 Fig. 4. Probability of spectrum acquisition vs. outage probability. $(\lambda_{sr} = \lambda_{rd} = 2, \lambda_{sd} = 2\lambda_{rd}, \rho = 0.9, m = 5, R = 1)$

그리고 4.4 dB의 신호 대 잡음비의 이득을 얻을 수 있었다. 그러므로 이 결과로부터 직접 경로로부터의 수신 전력이 간접경로 수신전력의 1/10 ($\lambda_{sd} = 10\lambda_{sr}$)만 있어도 시스템의 성능이 4.4 dB 개선되므로 Rayleigh 페이딩 환경 하에서 협동 다이버시티의 적용이 매우 효과적임을 알 수 있었다.

그림 4는 그림3의 경우를 확장하여 주파수 획득 확률에 따른 성능 변화를 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 주파수 획득 확률이 적을수록 시스템의 성능은 저하됨을 알 수 있다. 특히 주파수 획득 확률이 0.7인 경

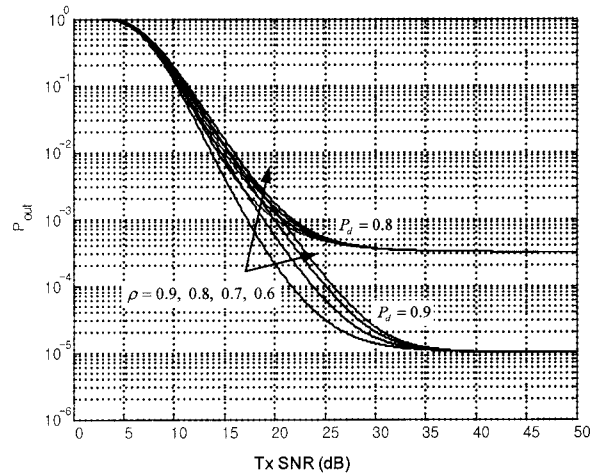


그림 5. 주파수 획득 확률 및 상관계수의 영향
 $(\lambda_{sr} = \lambda_{rd} = 2, \lambda_{sd} = 2\lambda_{rd}, m = 5, R = 1)$.
 Fig. 5. Probability of spectrum acquisition vs. Correlation coefficient.
 $(\lambda_{sr} = \lambda_{rd} = 2, \lambda_{sd} = 2\lambda_{rd}, m = 5, R = 1)$

우에는 송신신호의 전력이 증가하더라도 오수신율 1×10^{-3} 을 만족시킬 수 없었다. 항상 주파수를 획득할 때에 비하여 주파수 획득 확률이 0.9 및 0.8인 경우에는 각각 시스템의 성능이 0.3 dB 및 2.9 dB 저하되었다. 그러므로 페이딩을 받을 때 채널 상태정보의 지연에 의한 영향은 무시할 수 없음을 알 수 있다.

그림 5는 채널 상태정보의 지연과 채널획득 확률의 변화에 따른 시스템의 오수신율을 나타내고 있는데, 채널 지연에 의한 상관계수 값이 작아질수록 시스템의 성능은 저하됨을 보여주고 있다. 그리고 신호 대 잡음비가 증가하더라도 오수신율이 더 이상 줄어들지 않는 상태가 나타나는데, 채널 획득 확률이 0.8 및 0.9인 경우에는 오수신율의 하한 값이 약 3×10^{-4} 및 1×10^{-5} 을 갖는다.

V. 결 론

본 논문에서는 최근에 활발한 연구가 진행되고 있는 상황인지 무선시스템을 대상으로 하여, 직접 경로 및 간접 경로를 갖는 협동 다이버시티를 적용하였을 경우 시스템의 성능을 분석하였다. 특히 간접경로에서 선택 릴레이 방식을 채택하기 위하여 필수적으로 발생하는 채널 상태정보 지연의 영향을 포함하였다.

분석결과 직접 경로로부터의 수신 전력이 간접경로 수신 전력의 1/10만 있어도 시스템의 성능이 4.4 dB 개

선되므로 Rayleigh 페이딩 환경 하에서 협동 다이버시티의 적용이 매우 효과적임을 알 수 있었다.

그리고 예측하는 바와 같이 상황 인지 시스템의 주파수 획득 확률이 적을수록 시스템의 성능은 저하되었다. 그리고 채널 지연에 의한 상관계수 값이 작아질수록 시스템의 성능은 저하되었으며, 신호 대 잡음비가 증가하더라도 오수신율이 더 이상 줄어들지 않는 상태가 나타나는 것을 알 수 있었다.

이 논문의 결과는 상황인지 시스템을 설계할 경우 고려할 요소 및 그 영향을 분석하는데 활용할 수 있겠고, 향후에는 채널의 영향에 의한 적응 상황인지 시스템에 관한 연구를 계속할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] I. M. Sherman, A. Mody, R. Martinez, C. Rodriguez, and R. Reddy, "IEEE standards supporting cognitive radio and networks, Dynamic spectrum access, and coexistence," *IEEE Communication Magazine*, vol. 46, no. 7, pp. 72-79, July 2008.
- [2] A. Ghasemi, and E. Sousa, "Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments," *Proceedings of DYSpan2005*, pp. 131-136, Nov. 2005.
- [3] Y. Xing and R. Chandramouli, "Human behavior inspired cognitive radio network design," *IEEE Communication Magazine*, vol. 46, no. 12, pp. 122-127, Dec. 2008.
- [4] N. C. Beaulieu and J. Hu, "A closed-form expression for the outage probability of decode-and-forward relaying in dissimilar Rayleigh fading channels," *IEEE Communications Letters*, vol. 10, no. 12, pp. 813-815, Dec. 2006.
- [5] Y. Zhao, R. Adve, and T. J. Lim, "Outage probability at arbitrary SNR with cooperative diversity," *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 8, pp. 700-702, Aug. 2005.
- [6] J. N. Laneman and G. W. Wornell, "Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2415-2425, Oct. 2003.
- [7] A. Bletsas, H. Shin, and M. Z. Win, "Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 6, no. 9, pp. 3450-3460, Sep. 2007.
- [8] B. Zhao and M. C. Valent, "Practical relay networks: A generalization on hybrid-ARQ," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 1, pp. 7-18, Jan. 2005.
- [9] J. L. Vicario, A. Morell, A. Bel, and G. S-Granados, "Optimal power allocation in opportunistic relaying with outdated CSI," *Proceedings of Sensor array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)*, pp. 49-53, July 2008.
- [10] J. L. Vicario and C. A-Haro, "Analytical assessment of multi-user vs. special diversity trade-offs with delayed channel state information," *IEEE Communications Letters*, vol. 10, no. 8, pp. 588-590, Aug. 2006.
- [11] K. Lee, and Aylin Yener, "Outage performance of cognitive wireless relay networks," *Proceedings of Globecom2006*, pp. 1-5, Nov. 2006.
- [12] H. A. Suraweera, P. J. Smith, and N. A. Surobhi, "Exact outage probability of cooperative diversity with opportunistic spectrum access," *Proceedings of International Conference on Communication Workshops (ICC2008)*, pp. 79-84, May 2008.
- [13] F. Digham, M-S Alouini, and M. K. Simon, "On the energy detection of unknown signals over fading channels," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 55, no. 1, pp. 21-24, Jan. 2007.
- [14] T. Cover and J. Thomas, *Element of information theory*, JohnWiley&Sons, Inc., 1991.

저 자 소 개



김 남 수 (평생회원)

1986년~1994년 ETRI 이동통신
연구단 무선기술 연구실
장 역임

1991년 연세대학교 대학원
전자공학과(공학박사)

1991년 BNR (Bell Northern
Research) 방문연구원

2002년~2003년 NJIT (New Jersey Institute of
Technology) 교환교수

1994년 3월~현재 청주대학교 전자정보공학부
교수

2006년 1월~2007년 12월 청주대학교 학술정보처장
<주관심분야 : 무선 이동통신 채널, 이동통신시
스템 설계, 디지털 변복조시스템>