논문 2010-5-6

CSI 지연을 갖는 기회전송 상황 인지 릴레이 시스템

Opportunistic Transmit Cognitive Radio Relay Systems with CSI Delay

김남수*

Nam-Soo Kim*

요 약 본 논문에서는 최근에 많은 주목을 받고있는 상황인지 시스템을 협동릴레이 시스템에 적용하였을 때 상황인지 협동 릴레이 시스템의 성능을 유도하였다. 협동 릴레이 시스템은 기회전송 릴레이를 채택하였을 때와 채택하지 않았을 때의 성능을 비교하였다. 특히 목적지에서 시스템 구현의 간편성 때문에 많이 채택하고 있는 선택 결합방식을 고려하였는데, 이 경우 필수적으로 발생되는 채널 상태 정보(CSI)를 주고받으면서 발생되는 지연의 영향을 고려하였다. 분석결과 기회전송 릴레이를 채택할 경우 기회전송 릴레이를 채택하지 않은 경우보다 주어진 조건에서 최대 0.6 dB 열화 되었으며, 시스템의 성능은 상황인지 릴레이의 주파수 획득 확률보다는 채널 상태정보의 지연에 더욱 민감한 영향을 받음을 알 수 있었다.

Abstract In this paper, we analyze the performance of the cooperative cognitive radio relay system which is adapted the recently highly focused cognitive radio system. The performance comparison is made between the system with and that without the opportunistic transmission relay. Especially the selection combining is considered at the destination for simple implementation. In this case, the effect of the channel state information (CSI) delay, which is caused essentially by the process during the CSI delivery, to the system performance is considered. It is noticed that the performance of the system with the opportunistic relay degrades up to 0.6 dB at a given condition compared to the system without the opportunistic relay. And it is shown that the system performance is more sensitive to the CSI delay compared to the frequency acquisition probability of the cognitive radio relay.

Key Words : Opportunistic transmission, Relay, Cooperative diversity, Rayleigh fading, CSI

Ⅰ. 서 론

최근 제4세대 이동통신 시스템에 무선 주파수 자원의 효율을 높이기 위해서 상황인지 무선 시스템(Cognitive radio system)을 활용될 예정인데, 상황인지 무선 시스템은 상용 시스템에 할당된 주파수가 사용되고 있지 않을 때, 사용하지 않는 주파수를 일시적으로 이용함으로써 무선 주파수의 사용 효율을 높이는 것이다[1],[2],[3].

*정회원 : 청주대학교 전자정보공학부
접수일자 : 2010.07.12, 수정완료일자 : 2010.9.17
게재확정일자 2010.10.15

한편 이동통신에서는 이동 애드혹 네트워크의 도입을 고려하고 있는데, 이는 고정된 네트워크를 항구적으로 설치하는 대신에 일시적으로 필요한 시기에만 네트워크를 형성하는 특징을 갖는다. 이동 애드혹 네트워크의 관건 중 하나는 전력 소모를 최소화 하는 것인데 이를 위하여 최근에는 릴레이 통신 방식과 더불어 협동 다이버시티 시스템이 도입되었다. 그러나 일반적인 협동 다이버시티 방식보다는 기회전송 다이버시티 방식이 전력소모를 줄이고 시스템내의 간섭도 줄일 수 있는 방안으로 등장하게 되었다. 이어서 기회전송 협동 다이버시티 방식을 개선한 선택 릴레이 방식이 도입되었다[4],[5]. 그러나

선택 릴레이 방식은 릴레이로부터 수신한 신호 중 가장 큰 신호를 송신하는 릴레이를 선택하고, 선택된 릴레이에게 이를 알려주는 과정에서 필연적으로 발생되는 시간 지연의 영향에 관하여 Vicario[6]는 채널 상태 정보(CSI, Channel State Information)의 지연이 선택 릴레이 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

한편 [7]에서는 기회전송 협동 다이버시티 시스템의 성능은 분석하였지만, 채널 상태정보 지연에 의한 영향은 없다고 가정하고 상황인지 무선 시스템을 분석하였다.

그러므로 본 논문에서는 다음과 같은 시스템을 모델로 하여 각 파라메터가 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하였다: (1) 협동 다이버시티 시스템의 릴레이에서 상황인지 시스템을 사용하는 시스템, (2) 채널 조건과 채널조건을 고려하지 않는(기회전송) 협동다이버시티 시스템 모델. 이러한 모델에서 CSI의 지연이 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

상기 시스템의 분석을 위하여 제2장에서는 시스템 모델과 채널상태 정보의 지연에 관하여 설명한다. 제3장에서는 두 가지 시스템 모델의 종단 간(end-to-end) 오수신 확률을 유도하였다. 제4장에서는 수치적인 예로 시스템의 성능을 검토하였으며, 제5장에서는 본 논문의 요약 및 결론을 맺었다.

II. 시스템 모델

그림1은 본 논문에서 고려한 상황인지 무선 시스템의 모델인데, [7]에서 사용한 모델과 동일하다. Phase1에서는 소스만 송신하는 경우 이며, Phase2에서는 목적지에서 수신한 SNR이 가장 큰 릴레이만 송신하게 되는 선택 릴레이 방식이다.

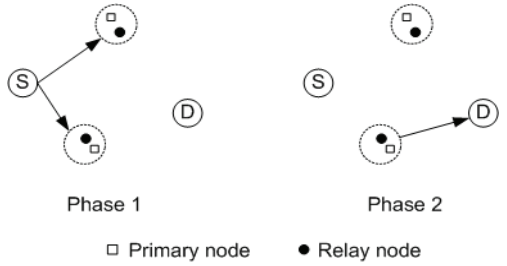

그림 1. 선택 릴레이 상황인지 무선 시스템 모델
Fig. 1. Selection relay cognitive radio system model

무선 채널이 Rayleigh 페이딩을 받는 다고 가정하면 상황인지 시스템에서 비콘 신호를 수신할 평균 검출 확률 P_d는 [2] 및 [8]에 주어졌다.

한편 임의의 노드의 송신전력이 P이고 잡음전력이 N일 때, 송신 신호 대 잡음비를 Tx_SNR = P/N 이라고 정의하자.

l 개의 릴레이에서 송신된 신호 중 목적지에서 수신한 채널이득이 가장 큰 신호를 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\left|h_{rd,\max}\right| = \max\{\left|h_{r_i d}\right|,\ i = 1,\ 2,\ \ldots,\ l\} \tag{1}$$

그러나 채널이득이 가장 큰 릴레이를 결정하고, 결정된 릴레이 정보를 궤환하는 과정에서 실제 채널이득($h_{rd,\max}$)과 지연된 채널이득($\tilde{h}_{rd,\max}$)사이에는 다음과 같은 관계가 있다[7].

$$h_{rd,\max} = \rho \tilde{h}_{rd,\max} \tag{2}$$

여기서 ρ 는 채널 지연의 영향을 받는 상관계수인데, Rayleigh 페이딩 시에는 $\rho = J_0(2\pi f_d T)$ 이다. 여기서 $J_0(\bullet)$는 제1종 영차 베셀(Bessel) 함수이고, f_d 는 도플러 주파수, 그리고 T 는 시간지연이다.

III. 오수신율 유도

1. 수신한 신호를 항상 재전송하는 경우

복조 후 송신하는 경우의 종단 간 오수신율은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{out} = \sum_{j=1}^{m}\left(\mathbf{Pr}\left[\left|h_{sd}\right|^2 < \Gamma,\ \left|\tilde{h}_{rd,\max}\right|^2 < \Gamma \middle| \delta = j\right]\right)\mathbf{Pr}(\delta = j) \tag{3}$$

여기서 Γ 는 임계치 SNR을 Tx_SNR로 정규화한 임계치이다. 유도과정을 생략하고 결과만을 정리하면, 종단 간 오수신율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{out}=\sum_{j=1}^{m}\left[j\sum_{k=0}^{j-1}\binom{j-1}{k}(-1)^k\frac{1}{k+1}\left(1-e^{-\frac{\lambda_{rd}(k+1)\Gamma}{1+(1-\rho^2)k}}\right)\left(e^{-\lambda_{sr}\Gamma}\right)\right] \times\binom{m}{j}\left(1-P_d\right)^{m-j}P_d^j \tag{4}$$

2. 임계치를 넘을 때만 재 전송 (Opportunistic transmission)하는 경우

소스로부터 수신한 SNR이 임계치 이상 되는 신호만 중계하는 기회 전송 시스템을 적용하면 통신 자원의 효율성도 높일 뿐 만 아니라 전체 시스템의 성능도 높일 수 있다. 이 때의 오수신율은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{out}=\sum_{j=1}^{m}\Big(\sum_{l=0}^{j}\mathbf{Pr}\left[\left|\tilde{h}_{rd,\max}\right|^2<\Gamma\middle|D(s)=l,\delta=j\right] \times\mathbf{Pr}\left[D(s)=l\middle|\delta=j\right]\Big)\mathbf{Pr}\left(\delta=j\right) \tag{5}$$

여기서 $D(s)$는 릴레이에서 수신한 SNR이 임계치를 넘는 릴레이의 수이다. 그리고

$$P_0=\mathbf{Pr}\left[\left|\tilde{h}_{rd,\max}\right|^2<\Gamma\middle|D(s)=l,\delta=j\right] \tag{6}$$

은 j 개의 릴레이가 주파수를 획득하고 l 개의 릴레이가 송신할 때, 목적지에서 수신한 최대 채널이득이 임계치보다 작을 확률이다. 그리고

$$\mathbf{Pr}\left[D(s)=l\middle|\delta=j\right]=\binom{j}{l}\left(e^{-\lambda_{sr}\Gamma/\gamma}\right)^l\left(1-e^{-\lambda_{sr}\Gamma/\gamma}\right)^{j-l} \tag{7}$$

는 주파수를 획득한 j 개의 릴레이 중 l 개의 릴레이가 소스로부터의 신호를 성공적으로 복조하여 송신할 확률이다. 그리고 $P_r(\delta=j)$는 전체 m 개의 릴레이 중 j 개의 릴레이가 주파수를 획득할 확률이다.

그러므로 채널이득의 지연이 있을 때 선택협동 상황인지 무선 시스템의 오수신 확률은 (6) 및 (7)을 (5)에 대입하면 얻을 수 있다.

$$P_{out}=\sum_{j=1}^{m}\Big[\sum_{l=0}^{j}\left\{ j\sum_{k=0}^{j-1}\binom{j-1}{k}(-1)^k\frac{1}{k+1}\left(1-e^{-\frac{\lambda_{rd}(k+1)\Gamma}{1+(1-\rho^2)k}}\right)\right\} \times\binom{j}{l}\left(e^{-\lambda_{sr}\Gamma}\right)^l\left(1-e^{-\lambda_{sr}\Gamma}\right)^{j-l}\Big]\binom{m}{j}\left(1-P_d\right)^{m-j}P_d^j \tag{8}$$

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 임계치 SNR은 0 dB를 가정하였다.

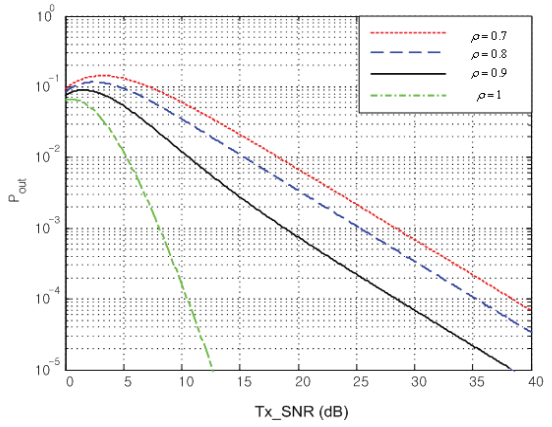

그림 2. 릴레이가 항상 재전송 할 때 채널의 지연과 오수신율 ($\lambda_{sr}=\lambda_{rd}=2, P_d=1, m=5$)

Fig. 2. Outage probability vs. channel delay without opportunistic transmission ($\lambda_{sr}=\lambda_{rd}=2, P_d=1, m=5$)

그림2는 릴레이가 수신한 신호를 모두 목적지로 전송하는 경우의 시스템 성능을 나타낸 것이다. 이 그림2에서는 주파수 획득의 영향을 배제하고($P_d=1$), 채널지연의 영향에 다른 시스템의 오수신율을 비교하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 채널 지연이 있는 경우 상관계수가 클수록 시스템의 성능은 우수한 것으로 나타내었는데, 이는 실제 채널과 지연된 채널이 근접할수록 성능이 우수함을 나타내는 것이며, 채널 지연으로 $\rho=0.7$, 0.8,

0.9 및 1 인 경우, 수신오율 1×10^{-3}을 유지하기 위하여 송신 신호 대 잡음비가 각각 28.4 dB, 25.3 dB, 18.3 dB, 그리고 8.3 dB 가 필요하였다. 이 결과로부터 상관계수가 증가할수록 필요한 송신 신호 대 잡음비는 급격히 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 채널 지연이 시스템의 성능에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다.

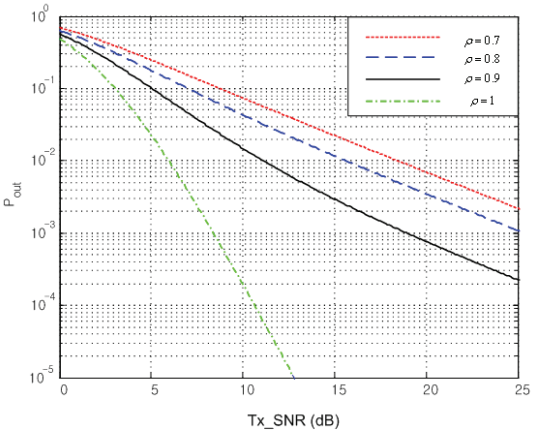

그림 3. 기회전송 시 채널의 지연과 오수신율
$(\lambda_{sr}=\lambda_{rd}=2, P_d=1, m=5)$

Fig. 3. Outage probability vs. channel delay with opportunistic transmission
$(\lambda_{sr}=\lambda_{rd}=2, P_d=1, m=5)$

그림3은 그림2와 동일한 조건에서 릴레이가 임계치를 넘을 때만 전송하는 기회전송 시스템의 경우를 나타내었다. 그림2와 마찬가지로 채널 지연이 있는 경우 상관계수가 클수록 시스템의 성능은 우수한 것으로 나타났다. 채널 지연으로 $\rho=0.7$, 0.8, 0.9 및 1 인 경우, 수신오율 1×10^{-3}을 유지하기 위하여 송신 신호 대 잡음비가 각각 28.4 dB, 25.4 dB, 18.9 dB, 그리고 8.4 dB 가 필요하였다. 그림2와 비교할 때 $\rho=0.7$ 및 0.8일 때는 송신 신호 대 잡음비가 매우 흡사하였으나, 0.9 및 1일 때에는 각각 송신 신호 대 잡음비가 더 필요하였다 이는 송신하는 릴레이 수가 기회전송을 하지 않을 때 보다 적기 때문에 공간 다이버시티 효과가 다소 감소하게 때문인 것으로 해석되었다.

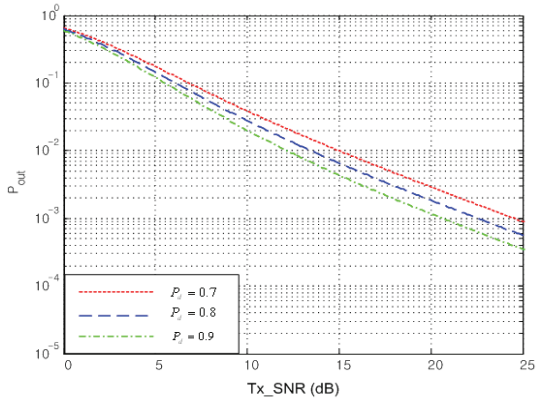

그림 4. 기회전송 시 주파수 획득 확률의 변화에 따른 오수신율 $(\lambda_{sr}=\lambda_{rd}=2, \rho=0.9, m=5)$

Fig. 4. Outage probability vs. frequency acquisition probability
$(\lambda_{sr}=\lambda_{rd}=2, \rho=0.9, m=5)$

그림4는 상황인지 릴레이가 주파수를 획득하는 주파수 획득 확률에 따른 성능 변화를 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 주파수 획득 확률이 적을수록 시스템의 성능은 저하됨을 알 수 있다. 그러나 그림3과 같은 채널 지연이 시스템의 성능에 미치는 영향과 같이 민감한 변화는 보이지 않는다. 오수신율 1×10^{-3}을 만족시키기 위하여 필요한 송신 신호 대 잡음비는 주파수 획득 확율이 0.7, 0.8 및 0.9인 경우에는 각각 24.5 dB, 22.5 dB, 그리고 20.5 dB 이었다.

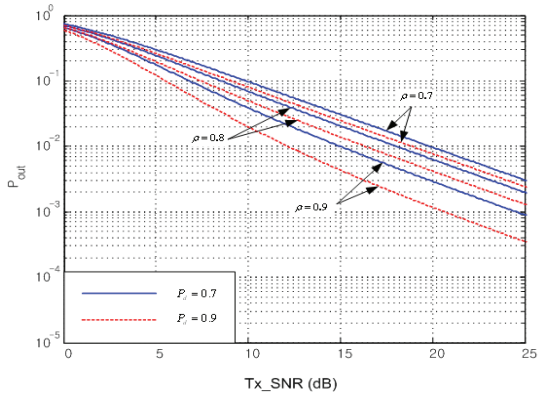

그림 5. 주파수 획득 확률 및 상관계수의 영향
$(\lambda_{sr}=\lambda_{rd}=2, m=5)$

Fig. 5. Effect of the frequency acquisition probability and channel correlation coefficient
$(\lambda_{sr}=\lambda_{rd}=2, m=5)$

그림5는 채널 상태정보의 지연과 채널획득 확률의 변화에 따른 시스템의 오수신율을 나타내고 있는데, 채널 지연에 의한 상관계수 값이 작아질수록 시스템의 성능은 저하됨을 보여주고 있다. 그리고 상황인지 릴레이의 주파수 획득 확률이 증가할수록 시스템의 성능이 향상됨을 나타내고 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 최근에 활발한 연구가 진행되고 있는 상황인지 무선시스템을 대상으로 하여, 소스로부터 수신한 신호를 항상 목적지로 전송하는 협동 다이버시티 시스템과 수신된 SNR이 임계치를 초과할 때만 전송하는 기회전송 협동 다이버시티 시스템의 성능을 유도하고 비교하였다.

수신된 SNR이 동일하고 상황인지 시스템의 주파수 획득확률이 동일한 경우 무조건 목적지로 전송하는 시스템과 기회전송 시스템을 비교하였을 때, 기회전송 시스템의 성능이 최대 0.6 dB 저하 되었다. 이는 기회전송 시스템의 송신 릴레이 수가 무조건 전송하는 시스템의 릴레이 수 보다 적어서 공간 다이버시티 효과가 다소 감소하였기 때문인 것으로 해석되었다.

그리고 예측하는 바 와 같이 주파수 획득 확률이 적을수록 시스템의 성능은 저하됨을 알 수 있다. 그러나 주파수 획득 확률보다는 채널 지연이 시스템의 성능에 미치는 영향이 더욱 민감하였다. 이 논문의 결과는 상황인지 시스템을 설계할 경우 고려할 요소 및 그 영향을 분석하는데 활용할 수 있겠다.

참 고 문 헌

[1] 1. 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] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] K. Lee, and Aylin Yener, “Outage performance of cognitive wireless relay networks,” Proceedings of Globecom2006, pp. 1-5, Nov. 2006.

[8] 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.

※ 이 논문은 2009 – 2011학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음

저자 소개

김 남 수(정회원)

- 1986년 ~ 1994년: ETRI(전자통신 연구소) 이동통신 연구단 무선기술 실장 역임
- 1991년: 연세대학교 대학원 전자공학과 공학박사
- 1991년 ~ 1991년: BNR(Bell Northern Research) 방문연구원
- 2002년 ~ 2003년: NJIT(New Jersey Institute of Technology) 교환교수
- 1994년 ~ 현 재: 청주대학교 전자정보공학부 교수
- 2006년 ~ 2007 : 청주대학교 학술정보처장
- 2010년 ~ 현재 : 청주대학교 입학처장
- 2008년 ~ 현재 : Marquis Who's Who in the World 등재
- 2011 ~ 2012 : Marquis Who's Who in Science and Engineering 등재

<주관심분야 : Wireless mobile ad-hoc network, RF system design, Digital modulation, 무선 이동통신 채널, 이동통신 시스템 설계>