

논문 2009-3-15

레이레이 페이딩 채널에서 OFDMA 협동 릴레이 방식에 따른 성능비교

Comparative study of OFDMA cooperative relaying methods in Rayleigh fading channel

김남수*

Nam-Soo Kim

요 약 최근 애드 혹 네트워크에서는 전력절약 및 통달거리 확장을 위해서 릴레이 통신이 주목을 받고 있다. 또한 고속의 데이터를 전송하기 위하여 OFDMA를 릴레이에 적용하는 방식이 제안되고 있다. 본 논문에서는 소스와 목적지 사이에 여러 개의 OFDMA 릴레이를 사용하는 2 홉(Hop) 협동 릴레이 모델을 가정하고, 세 가지 릴레이 방식에 따른 시스템의 성능을 유도하고 비교하였다. 목적지에서 동일한 상호정보 임계치를 가정할 때, 선택 릴레이 방식, 기회전송 릴레이 방식, 그리고 반복 릴레이 방식 순으로 성능이 우수하였다.

Abstract Recently, the relay communication is focused for the power saving and coverage extension of ad-hoc networks. For the high data rate transmission, it is proposed to adapt OFDMA relays. In this paper, we assume the 2 hop cooperative OFDMA relays between the source and the destination. The performance of 3 different relaying methods are derived and compared. We noticed that the selective OFDMA relaying method has the best performance followed by opportunistic OFDMA relaying and repetition-based OFDMA relaying method under the same threshold mutual information rate.

Key Words : OFDMA Relay, Cooperative diversity, Selective relay, Rayleigh fadi

I. 서 론

최근 무선 채널에 의한 시스템 성능저하를 극복하고 고속으로 데이터를 전송하기 위한 여러 가지 방법이 연구되고 있다. 그 중 한 가지 방법으로 고속의 데이터를 병렬로 나누어 여러 개의 부 반송파(sub-carrier)로 변조해서 무선으로 전송하는 방법인 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)방식은 IEEE802.11g 및 a등에 표준규격으로 사용되고 있고, WiMax에도 사용되고 있다[1], [2]. 또한 OFDM을 여러 사용자가 사용할 수 있는 다중 액세스(Multiple Access)방식인 OFDMA

도 보다 진보된 통신방식에 점차 채택되고 있는 상황이다[2].

한편 다중안테나를 사용하여 데이터 전송속도를 높이는 방식이 제안되었으나[3], 크기가 작은 무선 단말에 여러 개의 안테나를 장착하는 것이 현실적으로 어려움이 있어서, 단일 안테나를 가진 통신기를 이용하여 통달거리를 높일 뿐만 아니라 송신전력도 절약하기 위한 협력 릴레이(Cooperative Relay) 통신방식이 최근 각광을 받고 있다. 특히 2차 전지에 의해서 구동되는 전력 제한된 시스템인 무선 애드 혹 센서 네트워크에서는 이 협력 릴레이 통신방식이 매우 현실적인 대안으로 떠오르고 있다 [4].

*정회원, 청주대학교 정보통신공학과
접수일자 2009.05.21, 수정완료.2009.06.12

그러나 저자가 아는 바로는 제안된 여러 가지 협력 릴

레이 통신방식을 동일한 시스템 모델 하에서 성능을 비교하지 않았을 뿐만 아니라, 무선 페이딩 채널에서 고속 데이터 통신에 적합한 협력 OFDMA 릴레이 통신 방식에 관해서는 비교적 연구가 많지 않았다[5].

따라서 본 논문에서는 소스와 목적지 사이에 여러 개의 OFDMA 릴레이를 사용하는 2 홉(Hop) 협동 릴레이 모델을 가정하고, 세 가지 릴레이 방식에 따른 시스템의 성능을 유도하고 비교하였다: 첫째 소스로부터 수신한 신호를 모든 릴레이가 목적지로 전송하는 반복 OFDMA 릴레이(Repetition-based OFDMA Relay) 방식, 둘째는 릴레이에서 수신한 신호 대 잡음비가 임계치를 넘는 경우에만 송신하는 기회전송 OFDMA 릴레이(Opportunistic OFDMA Relay) 방식, 그리고 마지막으로 목적지에서 수신한 신호 대 잡음비가 가장 큰 릴레이만 선택하여 송신 하도록 하는 선택 OFDMA 릴레이(Selective OFDMA Relay) 방식이다.

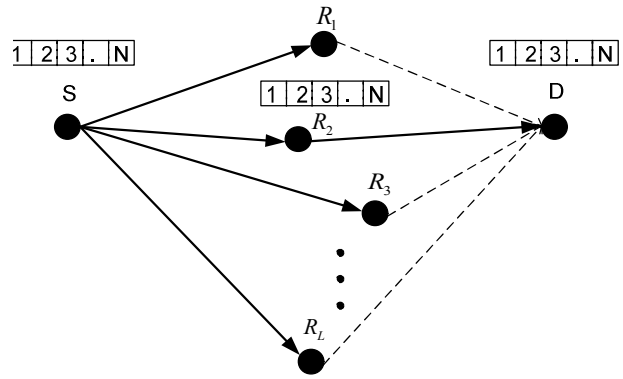
본 논문에서는 각각의 OFDMA 릴레이가 복조 후 전송(Decode and Forward)방식을 사용한다고 가정하였다 [6], [7]. 그리고 여러 개의 릴레이로부터 수신한 신호 대 잡음비를 높이기 위한 대표적인 방법으로 최대비 합성(Maximal Ratio Combining) 방식과 선택 합성(Selection Combining) 방식이 있는데, 대부분의 릴레이 통신 방식에서 가정하는 최대비 합성 방식은 성능은 우수하지만, 시스템 구현 시 각 수신신호의 주파수 및 위상을 복구하여야 하는 동기회로가 부가되어야 하므로, 소모전력 및 수신 회로가 복잡하게 되는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 시스템의 성능은 다소 저하되나 회로가 간단하고 전력소모가 적은 선택합성 방식[8]을 가정하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 OFDMA 릴레이의 시스템 모델에 관하여 설명하였고, 제3장에서는 각 방식 별 종단간(end-to-end) 오수신율을 유도하였다. 그리고 제4장에서는 수치적인 예를 들어서 각 방식의 성능을 비교하고 검토하였으며, 마지막으로 제5장에서는 본 논문에서 얻은 결과를 정리하고 결론을 서술하였다.

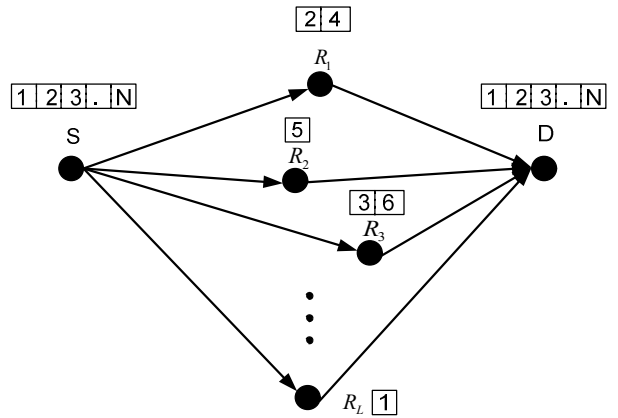
II. 시스템 모델

그림1은 Bo Gui [5]가 사용한 OFDM 및 OFDMA 릴레이의 시스템 모델을 나타내고 있다. 이 그림에서 S 는 소스, $R_i (i=1,2,\dots,L)$ 는 i 번째 릴레이, 그리고 D 는

목적지를 나타낸다. 그리고 각 노드 위에 네모 상자 안에 들어있는 숫자는 해당 OFDM/OFDMA 릴레이의 부 채널(sub-channel) 번호를 나타낸다.



(a) OFDM 릴레이 방식



(b) OFDMA 릴레이 방식

그림1. 릴레이 시스템 모델
Fig. 1. Relay system model

그림1에서 릴레이의 수는 L 개이고, 각 각의 릴레이는 N 개의 부 채널을 갖고 있다고 가정한다. 그리고 목적지에서는 서론에서 언급한 바와 같이 선택합성 다이버시티를 사용한다. 그러므로 그림1(a)에 나타난 OFDM 릴레이 방식을 사용하면 목적지에서 각 릴레이로부터 수신한 신호를 비교하여 수신한 신호 대 전력 비가 가장 큰 하나의 릴레이(이 그림에서는 R_2)만을 선택하게 된다. 그러므로 OFDM 릴레이 방식은 릴레이 단위로 선택하므로, 선택된 릴레이의 모든 부 채널은 동시에 전송하게 된다.

그러나 OFDM은 여러 개의 부 채널을 사용하므로, 어느 순간에 어떤 부 채널은 페이딩을 심하게 받고, 어떤

부 채널은 페이딩을 별로 받지 않게 된다. 그러므로 릴레이 단위가 아니라 부 채널 단위로 선택하면 시스템의 성능을 개선할 수 있게 된다[5]. 즉, 부 채널 별로 전송하는 릴레이 방식을 OFDMA 릴레이 방식이라고 부르며, 이 방식을 그림1(b)에 나타내었다.

본 논문에서는 Bo Gui[5]가 가정한 동일한 OFDMA 릴레이 시스템 모델(그림1(b))을 사용하여 서론에서 언급한 3가지의 릴레이 방식 별 성능을 유도하고 성능을 비교하고자 한다. 그리고 모든 송신 릴레이 부 채널의 송신 전력은 동일하다고 가정하였다. 또한 릴레이 방식 별 비교를 위하여 소스-릴레이 및 릴레이-목적지간 채널이 받는 페이딩은 서로 독립이고 동일한 (independent and identically distributed) 레일레이 분포를 갖는다고 가정한다.

III. 성능 분석

1. 반복 OFDMA 릴레이 (Repetition-based OFDMA Relay)

앞에서 설명한 바와 같이 반복 OFDMA 릴레이 방식은 소스로부터 받은 신호를 각 각의 릴레이가 복조 후, 모든 릴레이가 목적지로 송신하는 시스템이다. 즉 모든 릴레이가 릴레이 통신에 참여한다. 이때 목적지에서 선택합성을 한다고 가정하면, 선택합성 후의 신호 대 잡음비, $\gamma_{SC}(i)$,는 다음과 같다.

$$\gamma_{SC}(i) = \max[\gamma_{RD}(i, j)g_{RD}(i, j)], \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, L \quad (1)$$

여기서 $\gamma_{RD}(i, j)$ 는 j 번째 OFDMA 릴레이의 i 번째 부 채널의 송신 신호 대 잡음비인데, 일반적으로 송신 신호 대 잡음비[8]는 다음과 같이 정의되며,

$$Tx_SNR = \frac{P_{Tx}}{N} \quad (2)$$

여기서 P_{Tx} 는 송신전력, 그리고 N 은 잡음전력을 나타낸다. 그리고 $g_{RD}(i, j)$ 는 j 번째 OFDMA 릴레이의 i 번째 부 채널과 목적지 사이의 채널이득이고, 채널이득은 진폭이득(amplitude gain), $h_{RD}(i, j)$,과 다음과 같

은 관계가 있다.

$$g_{RD}(i, j) = |h_{RD}(i, j)|^2 \quad (3)$$

그리고 이 논문에서는 레일레이 페이딩을 받는 무선 채널을 가정하므로, $g_{RD}(i, j)$ 의 확률 밀도함수는 평균이 $1/\lambda_{RD}(i, j)$ 인 지수 분포를 갖는다.

L 개의 반복 OFDMA 릴레이들의 i 번째 부 채널들은 서로 동일한 주파수를 갖고, 각 부 채널들이 목적지로 시분할 다중화(Time division multiplexing) 송신한다고 가정하자. 그러면 반복 OFDMA 릴레이 방식의 i 번째 부 채널의 상호정보(mutual information)는 다음과 같이 쓸 수 있다[9].

$$I(i) = \frac{1}{L+1} \log[1 + \gamma_{SC}(i)] \quad (4)$$

여기서 $\log(\bullet)$ 는 기저(base)가 2이다. 이때 각 부 채널 당 목적지에서 요구하는 데이터 속도를 R 이라고 하면, i 번째 부 채널의 오수신율은 수신한 정보용량, I ,이 상호정보 임계치보다 작을 때로 정의하고, 오수신율을

$$P_o(i) = \Pr(I(i) < R) \quad (5)$$

와 같이 쓸 수 있다. 그러므로 복조 후 전송 릴레이를 사용하는 OFDMA의 i 번째 부 채널의 오수신율은 다음과 같이 쓸 수 있다[7].

$$P_{o,rb}(i) = 1 - [1 - P_{o,SR}(i)][1 - P_{o,RD}(i)] \quad (6)$$

여기서 $P_{o,RD}(i)$ 는 목적지에서 선택합성을 사용할 때, 릴레이와 목적지 사이의 i 번째 부 채널의 오수신율로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{o,RD}(i) &= \Pr\left[\frac{1}{L+1} \log\{1 + \gamma_{SC}(i)\} < R\right] \\ &= \Pr\left[\frac{1}{L+1} \log[1 + \max \gamma_{RD}(i, j)g_{RD}(i, j)] < R\right] \end{aligned} \quad (7)$$

(7)을 다시 정리하면,

$$P_{o,RD}(i) = \Pr[\max g_{RD}(i, j) < \gamma_{R,th} / \gamma_{RD}(i, j)] \quad (8)$$

여기서 반복릴레이의 임계 신호 대 잡음비, $\gamma_{R,th}$,는

$$\gamma_{R,th} = 2^{(L+1)R} - 1 \quad (9)$$

이고, 각 릴레이로부터 목적지까지의 채널이 서로 독립이며, 동일한 릴레이 확률 분포를 갖는다고 하다고 가정하면 $\gamma_{RD}(i,j) = \gamma_{RD}(i)$ 및 $\lambda_{RD}(i,j) = \lambda_{RD}(i)$ 로 쓸 수 있다. 그러므로

$$P_{o,rd}(i) = \left[1 - \exp\{-\lambda_{RD}(i)\gamma_{R,th}/\gamma_{RD}(i)\} \right]^L \quad (10)$$

이다. 그리고 (6)의 $P_{o,sr}(i)$ 는 소스에서 각 릴레이의 i 번째 부 채널까지의 오수신율이다. 소스에서 각 OFDMA의 i 번째 부 채널로 전송되는 송신 신호 대 잡음비는 동일($\gamma_{SR}(i,j) = \gamma_{SR}(i)$)하고, i 번째 부 채널에서 수신되는 평균 전력이 동일(즉, $\lambda_{SR}(i,j) = \lambda_{SR}(i)$)하다고 가정하면, $P_{o,sr}(i)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다

$$P_{o,sr}(i) = 1 - \exp(-\lambda_{SR}(i)\gamma_{R,th}/\gamma_{SR}(i)) \quad (11)$$

그러므로 N 개의 부 채널을 갖는 OFDMA 릴레이가 L 개 있을 때의 반복 OFDMA 릴레이 방식의 중단간 오수신율은

$$P_{out,rb} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{o,rb}(i)) \quad (12)$$

이 된다.

2. 기회 전송 OFDMA 릴레이 (Opportunistic OFDMA Relay)

기회전송 릴레이는 소스로부터 수신한 신호 대 잡음비가 임계치를 넘는 릴레이만 목적지로 송신하는 시스템이다. 이때에도 반복 OFDMA 릴레이와 마찬가지로 시분할 다중화 전송을 가정하자. 그러면 전체 $L+1$ 타임슬롯 중 소스와 기회전송 릴레이들이 각각 하나의 타임슬롯 동안 송신하게 된다 (물론 임계치를 넘는 릴레이의 수는 L 보다 적더라도 페이딩을 받는 채널의 상태에 따라서 기회전송 릴레이의 수가 계속하여 변하므로 전체 송신 슬롯을 최대 값인 $L+1$ 로 가정하자) [10].

그러므로 기회전송 OFDMA 릴레이의 i 번째 부 채널

의 오수신율은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{o,op}(i) = \sum_{j=0}^L \Pr\left[\max g_{RD}(i,j) < \gamma_{o,th}/\gamma_{RD}(i,j) \mid |D(s)| = j\right] \times \Pr[|D(s)| = j] \quad (13)$$

여기서 기회전송 릴레이의 임계 신호 대 잡음비는 $\gamma_{o,th} = 2^{(L+1)R} - 1$ 로 (9)와 동일하다. 그리고 $D(s)$ 는 릴레이가 수신한 데이터 속도가 요구하는 데이터 속도 R 보다 큰 노드들의 집합이다. 그러므로 $D(s)$ 가 j 개가 될 확률은

$$\Pr[|D(s)| = j] = \binom{L}{j} [1 - P_{o,sr}(i)]^j [P_{o,sr}(i)]^{L-j} \quad (14)$$

으로 쓸 수 있고, 소스로부터 각 릴레이의 i 번째 부 채널까지의 채널이 독립이고 동일한 릴레이 분포를 한다고 가정하면, (14)는

$$\Pr[|D(s)| = j] = \binom{L}{j} \left[\exp\{-\lambda_{SR}(i)\gamma_{o,th}/\gamma_{SR}(i)\} \right]^j \times \left[1 - \exp\{-\lambda_{SR}(i)\gamma_{o,th}/\gamma_{SR}(i)\} \right]^{L-j} \quad (15)$$

으로 쓸 수 있다. 그리고 (13)에서

$$\Pr\left[\max g_{RD}(i,j) < \gamma_{o,th}/\gamma_{RD}(i,j) \mid |D(s)| = j\right] = \left[1 - \exp\{-\lambda_{RD}(i)\gamma_{o,th}/\gamma_{RD}(i)\} \right]^j \quad (16)$$

이 된다. 그러므로 N 개의 부 채널을 갖는 OFDMA 릴레이가 L 개 있을 때, 기회전송 OFDMA 릴레이 방식의 중단간 오수신율은

$$P_{out,op} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{o,op}(i)) \quad (17)$$

이 된다.

3. 선택 OFDMA 릴레이(Selective OFDMA Relay)

앞 절에서 설명한 기회전송 릴레이방식은 수신한 신호 대 잡음비가 임계값보다 큰 릴레이만 전송하는 방식이다. 그리고 최종 목적지에서는 릴레이로부터 수신한

신호 중 가장 큰 신호 대 잡음비를 선택합성 한다. 그러나 모든 기회전송 릴레이(수신한 신호 대 잡음비가 임계치 보다 큰 릴레이)가 전송을 하지 않고, 목적지에서 수신한 신호 대 잡음비가 가장 큰 릴레이만 송신하게 되면 타임슬롯의 수를 줄일 수 있게 되며, 결국 전송을 위한 타임슬롯을 줄여서 임계 신호 대 잡음비를 낮출 수 있게 된다.

즉, 선택 OFDMA 릴레이 방식은 기회전송 릴레이 중 목적지에서 수신하는 신호 대 잡음비가 가장 큰 릴레이를 사전에 선택한 다음, 선택된 릴레이만 정보를 전송하도록 하는 사전결정 릴레이(Proactive Relay) 방식이다 [11]. 물론 이 방식은 가장 큰 릴레이만 전송하도록 목적지에서 릴레이로 케환(feedback) 정보가 필요하므로 시스템의 복잡도는 증가하지만, 송신 타임슬롯이 소스가 전송하는데 필요한 타임슬롯 1개와 릴레이가 전송하는데 필요한 타임슬롯 1개, 전체 2개의 타임슬롯이면 릴레이 통신이 가능하게 된다. 그러므로 앞에서 언급한 반복 릴레이 및 선택 릴레이 보다 전송에 필요한 타임슬롯이 훨씬 줄어들게 되는 장점이 있다.

그러므로 i 번째 부 채널의 상호정보는

$$I(i) = \frac{1}{2} \log[1 + \gamma_{sc}(i)] \quad (18)$$

이 되고, i 번째 부 채널의 오수신율은 (13) 및 (15)에 $\gamma_{o,th}$ 대신에 선택 릴레이의 임계 신호 대 잡음비

$$\gamma_{s,th} = 2^{2R} - 1 \quad (19)$$

을 대입하여 i 번째 부 채널의 오수신율, $P_{o,sl}(i)$,을 구하고, 결국 선택 OFDMA 릴레이 방식의 종단간 오수신율, $P_{out,sl}$,은 (17)에서 $P_{o,op}(i)$ 대신 $P_{o,sl}(i)$ 을 대입하여 구하면 된다.

IV. 수치적인 예

그림2는 3장에서 유도한 릴레이 방식에 따른 오수신율을 비교한 그림이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 선택 릴레이 방식이 가장 성능이 좋으며, 다음으로 기회전송 릴레이, 마지막으로 반복 릴레이방식이다. 주어진 조건하에서 오수신율 1×10^{-3} 을 만족시키기 위하여 선택 릴레이는 15.1 dB, 기회전송 릴레이는 31.4 dB, 그리고 반복 릴레이는 61.0 dB의 송신 신호 대 잡음비가 필요하였다.

즉 반복릴레이를 기준으로 할 때 기회전송 릴레이 방식은 29.6 dB, 그리고 선택 릴레이 방식은 45.9 dB의 이득을 얻을 수 있다.

이와 같은 커다란 차이는 목적지에서 요구하는 데이터 속도 R 을 유지하기 위하여 필요한 신호 대 잡음비의 차이에 의한 것으로 해석할 수 있다. 즉, 반복릴레이는 수신된 신호 대 잡음비의 크기와 무관하게 항상 송신해야 하므로, 이를 송신하기 위한 타임슬롯이 릴레이의 수 만큼 증가하는데 기인한다.

한편 소스와 릴레이 링크 사이의 상호 정보가 요구하는 데이터 속도 R 보다 적은 릴레이는 이미 오수신한 상태이다. 이미 오수신한 릴레이가 목적지로 데이터를 송신하면, 전체 시스템의 오수신율이 증가하므로, 기회전송 릴레이는 R 보다 큰 릴레이만 전송하여 시스템의 오수신율을 감소시키므로 반복릴레이보다 성능이 우수하게 된다.

그리고 선택 릴레이는 반복릴레이나 기회전송 릴레이와 달리 소스에서 릴레이로 데이터를 전송하는데 1개의 타임슬롯을 사용하고, 수신 신호 대 잡음비가 가장 큰 릴레이가 목적지로 송신하는데 1개의 타임슬롯이 필요하므로 총 2개의 타임슬롯이면 충분하다. 따라서 목적지에서 요구하는 데이터 속도 R 을 만족시키기 위한 임계 신호 대 잡음비가 작아지므로 결국 반복릴레이나 기회전송 릴레이 방식에 비하여 시스템의 성능이 우수하게 된다는 것을 그림2를 통하여 알 수 있다.

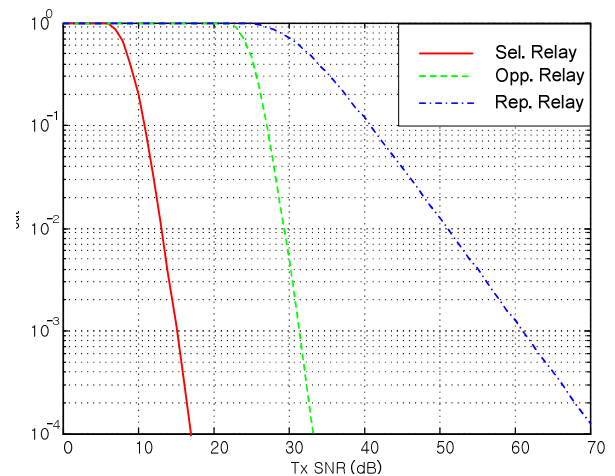


그림 2. 각 릴레이 방식의 오수신율 비교

$$(\lambda_{SR} = 2, \lambda_{RD} = 1, N = 5, L = 6, R = 1)$$

Fig. 2. Outage probability of different relay methods

$$(\lambda_{SR} = 2, \lambda_{RD} = 1, N = 5, L = 6, R = 1)$$

그림3은 OFDMA 릴레이의 부 채널 수와 시스템의 오수신율을 나타낸 것인데, 부 채널의 수가 5개 일 때 선택 릴레이, 기회전송 릴레이, 그리고 반복 릴레이는 각각 1.1×10^{-8} , 1.9×10^{-2} , 6.0×10^{-1} 의 오수신율을 갖는다. 또한 이 그림에서 각 릴레이 방식은 부 채널의 수가 증가할수록 오수신율이 증가한다는 것을 알 수 있다.

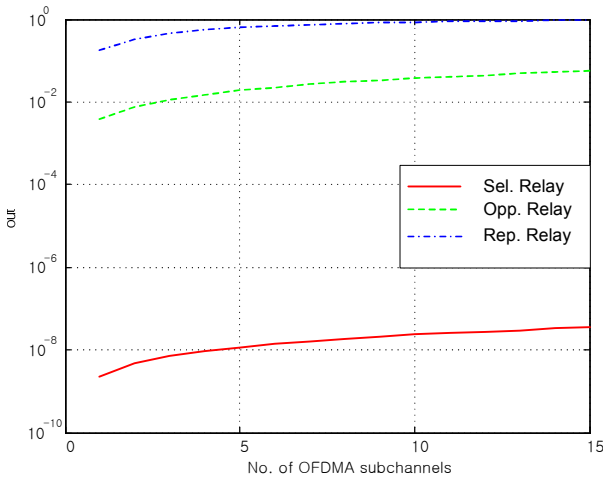


그림 3. OFDMA 부 채널의 수와 오수신율

($\lambda_{SR} = 1, \lambda_{RD} = 1, L = 5, R = 1, Tx SNR = 25 dB$)

Fig. 3. Outage probability vs. no. of OFDMA subchannels

($\lambda_{SR} = 1, \lambda_{RD} = 1, L = 5, R = 1, Tx SNR = 25 dB$)

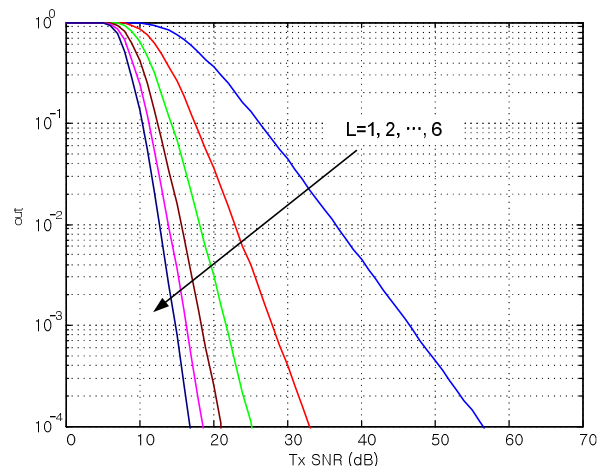


그림 4. 선택 OFDMA 릴레이에서 릴레이 수와 오수신율

($\lambda_{SR} = 2, \lambda_{RD} = 1, N = 5, R = 1$)

Fig. 4. Outage probability vs. no. of relays of selective OFDMA relaying

($\lambda_{SR} = 2, \lambda_{RD} = 1, N = 5, R = 1$)

그림4는 시스템의 성능이 가장 우수한 선택 릴레이 방식에서 릴레이 수에 따른 오수신율의 변화를 나타내고 있다. 이 그림은 일반적인 공간 다이버시티의 경우와 마찬가지로 릴레이가 증가할수록 성능은 우수해지지만, 동일한 오수신율을 유지하기 위하여 필요한 송신 신호 대 잡음비의 감소율은 점차 작아짐을 나타내고 있다.

V. 결론

본 논문에서는 소스와 목적지 사이에 여러 개의 OFDMA 릴레이를 사용하는 2 홉 협동 릴레이 모델을 가정하고, 세 가지 릴레이 방식에 따른 시스템의 성능을 유도하고 비교하였다. 비교결과 선택 릴레이 방식, 기회전송 릴레이 방식, 그리고 반복 릴레이 방식 순으로 성능이 우수하였다. 이는 릴레이 방식 별로 목적지에서 요구하는 데이터 속도 R 을 유지하기 위하여 필요한 신호 대 잡음비가 서로 다르기 때문인 것으로 해석되었다.

또한 성능이 가장 우수한 선택 OFDMA 릴레이에서 릴레이의 수와 오수신율의 관계는 릴레이가 증가할수록 성능은 우수해지지만, 동일한 오수신율을 유지하기 위하여 필요한 송신 신호 대 잡음비의 감소율은 점차 작아짐을 나타내고 있다.

이 논문의 결과는 향후 빠른 데이터 속도를 요구하는 OFDMA 무선 통신 시스템의 릴레이 방식을 결정하는데 이론적 자료로 활용할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] Michel Barbeau, Evangelos Kranakis, *Principles of ADHOC networking*, John Wiley & Sons, 2007.
- [2] Clint Smith, John Meyer, *3G wireless with WiMax and Wi-Fi*, McGraw-Hill, 2005.
- [3] A. Goldsmith, S. Jafar, N.Jindal, S.Vishwanath, "Capacity limit of MIMO channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, no. 5, pp. 684-702, June 2003.
- [4] Nam-Soo Kim, Beongku An, Do-Hyun Kim, "A Strategy for supporting power saving services for mobile ad-hoc networks," *Proceedings of*

- Healthcom05, pp. 282-285, June 2005.
- [5] Bo Gui, Lin Dai, and L. J. Cimini, "Selective relaying in cooperative OFDM systems: Two-hop random network," Proceedings of WCNC2008, pp. 996-1001, Mar. 2008.
- [6] M. O. Hasna, and M-S Alouini, "End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh-fading channels," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.2, no.6, pp.1126-1131, Nov. 2003.
- [7] M. Hasna, M-S Alouini, "Harmonic mean and end-to-end performance of transmission systems with relays," IEEE Trans. on Communications, vol. 52, no. 1, pp.130-135, Jan. 2004.
- [8] Jeremiah Hu, Norman C. Beaulieu, "Performance analysis of decode-and-forward relaying with selection combining," IEEE Communications Letters, vol.11, no.6, pp.489-491, June 2007.
- [9] H. Suraweera, P.Smith, N.Surobhi, "Exact outage of cooperative diversity with opportunistic spectrum access," Proceedings of ICC2008, pp. 79-84, May 2008.
- [10] N. C. Beaulieu, 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.
- [11] Aggelos Bletsas, H. Shin, M. Win, "Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying," IEEE Trans. on Wireless Communications, vol.6, no.9, pp.3450-3460, Sep. 2007.

저자 소개

김 남 수(정회원)



- 1986년 - 1994년 : ETRI 이동통신 연구단 무선기술 연구실장 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 - 2007.12 : 청주대학교 학술정보처장
- <주관심분야 : 무선 이동통신 채널, 이동통신시스템 설계, 디지털 변복조시스템>