

두 릴레이가 존재할 때 삼중 홉 중계와 베스트 릴레이 선택 후 이중 홉 중계 방식의 아웃티지 확률 비교

준회원 윤 유 선*, 정회원 김 동 우**

Comparison of Outage Probability Between Best-relay 2-hop Relaying and 3-hop Relaying

You-Sun Youn* Associate Member, Dongwoo Kim** Regular Member

요 약

본 논문에서는 임의로 분포되어 있는 레일리 페이딩(Rayleigh fading) 채널 하에서 소스노드와 목적지 노드 사이의 직접 경로가 존재하고 복호 후 전송(decode-and-forward) 방식을 사용하여 중계하는 시스템을 고려한다. 이 때, 다수의 릴레이 가운데 베스트 릴레이를 선택하여 이중 홉을 사용하여 통신하는 경우와 다중 홉을 사용하여 통신하는 경우의 아웃티지 확률을 구하고, 이를 통해 그 성능을 비교한다. 여기서 소스 노드와 릴레이들로부터 목적지 노드가 받은 모든 신호는 maximum ratio combining (MRC) 기법을 사용하여 결합하였고, 모든 경우에 대하여 목적지 노드에서 받은 수신 신호의 SNR이 갖는 확률 밀도 함수(probability density function, PDF)와 누적 확률 변수(cumulative density function, CDF)를 유도하였다. 이와 같이 구한 아웃티지 확률을 통해 릴레이의 개수가 2개일 때를 가정하고 실험한 결과, 채널 상태가 나쁠수록 다중 홉을 사용하여 통신하는 기법이 베스트 릴레이 선택 기법보다 좋은 성능을 보였다.

Key Words : selective relaying, multi-hop relaying, decode and forward, outage probability

ABSTRACT

In this paper, we investigate decode-and-forward (DF) relaying systems with a direct link between the source and the destination node. The objective of this paper is to determine the better relaying strategy between 3-hop DF relaying and dual-hop DF relaying with the best relay selection. Assuming Rayleigh fading channels, we present closed-form outage probability of the 3-hop relaying and the dual-hop relaying, respectively, and compare the performances by numerical investigation. Numerical results show that if the channel is poor, the outage performance of the 3-hop relaying is better than the dual-hop relaying.

1. 서 론

협력 다이버시티(cooperative diversity)는 소스 노드와 목적지 노드 사이에 위치한 릴레이들이 소스 노드로부터 전송된 신호가 페이딩에 의해 신호 세기가 감쇠될 때 이를 보완하는 역할을 해주는 기법이다.^{[1], [2]} 이 기법은 슬로우 페이딩(slow fading)

무선 환경에서 큰 이득을 제공하는 안테나 배열을 형성하는 방법 중에 하나로 많이 연구되어왔다. 이 기법에서 소스 노드와 릴레이가 다중 송신 안테나(multiple transmit antenna)의 역할을 하게 되므로 협력 다이버시티 시스템을 Virtual Multiple Input Multiple Output (MIMO) 시스템이라 부르기도 한다. 이 때, 릴레이의 개수가 많아지면 협력 다이버

* 한양대학교 전자전기제어계측공학과(ysyou@wnl, hanyang.ac.kr), ** 한양대학교 전자컴퓨터공학부
 논문번호 : KICS2009-10-497, 접수일자 : 2009년 10월 31일, 최종논문접수일자: 2010년 1월 5일

시티 이득도 많아지게 된다. 다수 개의 릴레이를 사용하여 이득을 얻는 방법은 대표적으로 다수의 릴레이를 이용하여 다중 홉을 통해 통신하는 기법과, 다수의 릴레이 가운데 채널 상태가 좋은 하나의 릴레이를 선택하여 통신에 이용하는 기법이 있다.

특히 다수의 릴레이 가운데 베스트 릴레이(best relay)를 선택하여 이중 홉을 통해 통신하는 기법은 많은 논문들에서 활발히 연구되었다. 기존의 연구들 중 증폭 후 전송 방식을 가정하고 베스트 릴레이 선택 기법의 SER(symbol error rate)을 분석한 논문에서는 높은 SNR에서 풀 다이버시티(full diversity)가 얻어진다는 것이 확인되었고[3], 복호 후 전송 방식이 가정된 시스템에서 베스트 릴레이 선택 기법에 대한 캐패시티 아웃티지 확률을 분석한 논문에서는 릴레이 개수가 3개 이상인 경우 분산형 시공간 코드가 이용된 경우보다 좋은 성능을 보인다는 것이 연구되었다[4], [5]. 이와 같이 베스트 릴레이 선택 방식은 기존의 한 개의 채널 보다 상태가 좋은 두 개의 채널을 제공하는 효과를 가져 오고 단지 2개의 타임 슬롯(time slot)만이 요구 된다는 장점을 가지고 있다. 반면 소스 노드와 목적지 노드 사이에 다수의 릴레이를 이용하여 다중 홉을 통해 통신하는 경우, 여러 개의 상태가 좋은 채널을 통신에 이용할 수 있다는 장점을 가지고 있지만 베스트 릴레이 선택 기법보다는 채널 효율성이 낮다는 약점을 가지고 있다. 하지만 소스 노드와 목적지 노드 간의 채널 상태가 좋지 않을 때, 다수의 릴레이를 통한 다중 홉 중계 기법이 베스트 릴레이 선택 기법보다 좋은 성능을 보일 가능성은 충분히 있다.

본 논문에서는 이런 가능성에 대한 고찰을 위해 두 개의 릴레이를 가정하고, 베스트 릴레이 선택 후 이중 홉을 통한 중계 방식과 두 릴레이를 통한 삼중 홉 중계 방식을 비교하였다. 이 때, 복호 후 전송 방식을 가정하였고, 복호에 성공한 모든 확률 집합을 고려하여 각각에 따른 SNR의 PDF와 CDF를 유도하고, 전확률의 법칙(low of total probability)에 의해 최종적인 아웃티지 확률을 구하였다. 이와 같이 구한 아웃티지 확률을 경로 감쇠 지수(path loss exponent)을 달리해주며 실험하였다. 그 결과 채널 상태가 나쁜 경우, 즉 경로 감쇠 지수가 커질수록 다중 홉을 사용하는 기법이 베스트 릴레이 선택 기법보다 좋은 성능을 보이는 것을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 다음의 II절에서는 시스템 모델에 대한 자세한 설명을 하고, III절에

서는 각 경우에 대한 아웃티지 확률 분석한다. 다음으로 IV절에서는 III절에서 구한 아웃티지 확률 결과 식을 바탕으로 실험을 수행한 결과에 대해 기술하고 마지막으로 V절에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

그림 1과 같이 소스 노드와 목적지 노드, 그리고 두 개의 릴레이로 구성된 무선 통신 시스템을 고려한다. 여기서 소스 노드, 릴레이 1, 릴레이 2, 그리고 목적지 노드는 다음과 같이 S, R_1, R_2, D 로 표현하기로 한다. 이 때, 두 개의 릴레이 모두 RTS(ready-to-send)와 CTS(clear-to-send)를 감지할 수 있는 영역 내에 존재한다고 가정한다. 또한 각 릴레이에서의 중계 방식은 수신신호를 복호 한 후 전송하는 복호 후 전송 기법을 사용한다고 가정하였다. 각 노드 간의 거리와 채널 임펄스 응답은 $d_{i,j}$ 와 $h_{i,j}$ 로 표현하고 여기서 $i \in S, R_1, R_2, D, j \in S, R_1, R_2, D$ 이다. $h_{i,j}$ 는 독립적이지만 동일하지 않은 복소 가우시안 랜덤 변수로 모델링 된 플랫폼 페이딩(flat fading) 채널을 가정한다. 따라서 $|h_{i,j}|^2$ 는 지수 분포를 따른다고 할 수 있고 경로 감쇠 지수(path loss exponent)는 α 로 나타낸다. 또한 각 노드에서의 송신 파워는 노드 간의 거리를 표현한 것과 같이 $P_{i,j}$ 로 표현하고 수신 잡음 파워는 N_0 로 가정한다.

2.1 협력 다이버시티를 하지 않는 경우

그림 1의 시스템 모델에서 릴레이를 사용하지 않는 경우를 가정하자. 이 경우는 참조 모델로 사용되며, 이 때 목적지 노드에서의 수신 신호는 다음과 같다.

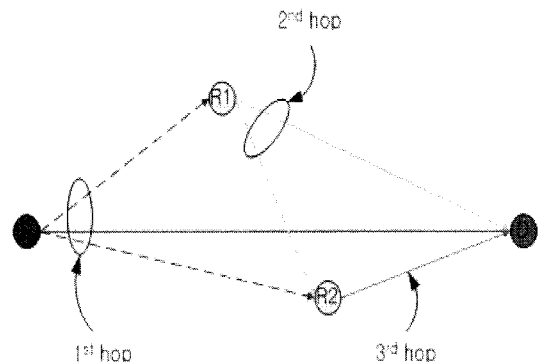


그림 1. 3-hop 중계 시스템 모델

$$y_{D_A} = \frac{\sqrt{P_{S,D}}h_{S,D}}{\sqrt{d_{S,D}^\alpha}} a_S + n \quad (1)$$

이 경우 한 개의 타임 슬롯을 사용하므로 시스템 용량은

$$I_{D_A} = \log_2(1 + \gamma_{D_A}) \quad (2)$$

이고, 이 때 γ_{D_A} 는 목적지 노드에서의 SNR이고 그 값은 다음과 같다.

$$\gamma_{D_A} = \frac{P_{S,D}|h_{S,D}|^2}{d_{S,D}^\alpha N_0} \quad (3)$$

2.2 3-hop을 사용하는 경우

이 경우 그림 1에서 R_1 와 R_2 가 $R_1 \rightarrow R_2$ 의 순서로 전송에 참여한다고 가정하자. 이 때, 두 릴레이의 디코딩 성공 여부에 따라 수신 신호가 결정된다. 여기서 고려해야 할 릴레이가 두 개이므로 모든 경우의 수는 4가지가 되고 두 릴레이가 디코딩에 성공하지 못한 경우는 II.A절과 같은 결과가 도출되므로 그 이외의 경우들에 대해서만 살펴보기로 하자.

먼저, 두 개의 릴레이 모두 디코딩에 성공한 경우에 대해 살펴보자. 목적지 노드에서의 수신 신호는 소스 노드와 R_1 , R_2 를 거쳐 도착한 수신 신호 이외에 소스 노드와 R_1 이 브로드캐스팅한 신호들도 함께 수신된다. 목적지 노드에서의 수신 SNR를 수식으로 표현하면

$$\gamma_{D_{B,1}} = \frac{P_{S,D}|h_{S,D}|^2}{d_{S,D}^\alpha N_0} + \frac{P_{R_1,D}|h_{R_1,D}|^2}{d_{R_1,D}^\alpha N_0} + \frac{P_{R_2,D}|h_{R_2,D}|^2}{d_{R_2,D}^\alpha N_0} \quad (4)$$

이 된다. 이 SNR 식을 이용하여 시스템 용량을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$I_{D_{B,1}} = \frac{1}{3} \log_2(1 + \gamma_{D_{B,1}}) \quad (5)$$

다음으로 R_2 만이 디코딩에 성공한 경우에 대하여 살펴보자. 이때에는 R_1 이 디코딩에 실패하였기

때문에 R_2 는 소스 노드로부터 받은 신호만을 수신하여 디코딩하게 되고 목적지 노드는 소스 노드와 R_2 로부터 신호를 수신하게 된다. 이 경우의 수신 SNR은

$$\gamma_{D_{B,2}} = \frac{P_{S,D}|h_{S,D}|^2}{d_{S,D}^\alpha N_0} + \frac{P_{R_2,D}|h_{R_2,D}|^2}{d_{R_2,D}^\alpha N_0} \quad (6)$$

이다.

마지막으로 릴레이 노드 R_1 만이 디코딩에 성공한 경우, 목적지 노드가 소스와 R_1 로부터 받은 신호만이 존재하게 된다. 결국 목적지 노드에서의 수신 SNR은

$$\gamma_{D_{B,2}} = \frac{P_{S,D}|h_{S,D}|^2}{d_{S,D}^\alpha N_0} + \frac{P_{R_1,D}|h_{R_1,D}|^2}{d_{R_1,D}^\alpha N_0} \quad (7)$$

이다. 위의 두 경우는 R_1 의 디코딩 성공 여부에 따라 R_2 가 받는 수신 신호가 달라지므로 이 점에 유의해야 한다.

2.3 베스트 릴레이를 선택하는 경우

앞에서와 같이 각 릴레이 노드가 RTS와 CTS의 커버리지 범위 내에 존재한다고 가정하였기 때문에 소스 노드와 각 릴레이 간의 채널 정보 및 릴레이와 목적지 노드 간의 채널 정보는 순시적으로 얻어진다고 가정한다. 이때 중계는 그림 2와 같이 측정된 순시 채널 정보를 바탕으로 종단간 (end-to-end) 채널이 가장 좋은 릴레이를 선택함으로써 이루어진다.

디코딩에 성공한 릴레이의 집합을 S_D 로 표현하기로 하면, $|S_D|$ 는 디코딩에 성공한 릴레이들의 개수를 뜻한다. 본 논문은 두 개의 릴레이만을 가정하였기 때문에 베스트 릴레이 선택 기법의 분석은

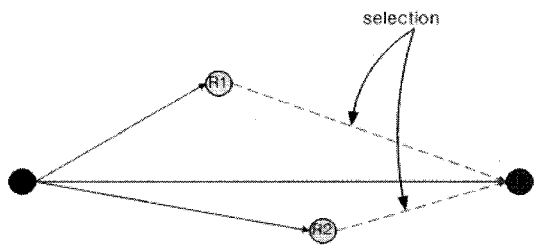


그림 2. 베스트 릴레이 선택 중계 시스템 모델

$|S_D|$ 의 개수에 따라 $|S_D|=0,1,2$ 와 같이 세 가지 경우로 나뉜다.

디코딩에 성공한 릴레이의 개수가 0 인 경우 소스 노드와 목적지 노드 간의 직접 경로만이 존재하게 되므로 II.A절과 같은 결과가 도출됨을 알 수 있다.

다음으로 디코딩에 성공한 릴레이의 개수가 1개인 경우에 대해 살펴보자. 이 경우 디코딩에 성공한 릴레이를 R_k 라고 하면 목적지 노드에서의 수신 SNR은

$$\gamma_{D_{C2}} = \frac{P_{S,D} |h_{S,D}|^2}{d_{S,D}^\alpha N_0} + \frac{P_{R_k,D} |h_{R_k,D}|^2}{d_{R_k,D}^\alpha N_0} \quad (8)$$

이다. 이 경우 2-hop이 사용되었으므로 시스템의 용량은 다음과 같다.

$$I_{D_{C2}} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{D_{C2}}). \quad (9)$$

마지막으로 두 개의 릴레이 모두가 디코딩에 성공한 경우 목적지 노드에서의 수신 SNR은

$$\gamma_{D_{C3}} = \frac{P_{S,D} |h_{S,D}|^2}{d_{S,D}^\alpha N_0} + \max \left\{ \frac{P_{R_1,D} |h_{R_1,D}|^2}{d_{R_1,D}^\alpha N_0}, \frac{P_{R_2,D} |h_{R_2,D}|^2}{d_{R_2,D}^\alpha N_0} \right\} \quad (10)$$

이다. 이 경우의 시스템 용량은 위에서 계산한 것과 같은 방법으로 계산 할 수 있다.

III. 아웃티지 확률 분석

아웃티지가 상호 정보량(mutual information)이 임계값(R) 보다 작을 때 일어난다고 가정하면 아웃티지 확률은 $\Pr[I_D < R]$ 라고 할 수 있다. 이 아웃티지 확률을 계산하기 위해서는 모든 경우에 대한 SNR의 확률밀도함수가 필요하다. 간단한 표현을 위해 $\frac{d_{i,j}^\alpha N_0}{P_{i,j} \sigma_{i,j}^2}$ 를 각 링크에 대한 지수 확률 변수의 매개변수 $\lambda_{i,j}$ 로 정의하자. 여기서 $i \in S, R_1, R_2, D$, $j \in S, R_1, R_2, D$ 이다.

3.1 협력 다이버시티를 하지 않는 경우

이 경우의 상호 정보량은 식 (2)와 같으므로 아웃티지 확률은

$$\Pr[I_{D_1} < R] = \Pr[\gamma_{D_1} < u_1] \quad (11)$$

이고, 이때 SNR의 PDF는 다음과 같다.

$$f_{\gamma_{D_1}}(x) = \lambda_{S,D} e^{-\lambda_{S,D} x}. \quad (12)$$

위의 식을 이용하여 아웃티지 확률을 구하면

$$\Pr[\gamma_{D_1} < u_1] = \int_0^{u_1} f_{\gamma_{D_1}}(x) dx \quad (13)$$

가 된다. 여기서 $u_1 = 2^R - 1$ 이다.

3.2 3-hop을 사용하는 경우

이 경우 디코딩에 성공한 릴레이에 의존적인 확률 계산이 요구되고 고려해야 할 모든 경우는 네 가지이다. 따라서 각 경우에 대해 아웃티지가 일어나지 않은 확률 값을 구하여 합해준 뒤 여집합의 확률을 이용하여 최종적인 아웃티지 확률을 계산한다. 두 릴레이가 디코딩에 성공하지 못한 경우는 협력 다이버시티를 이용할 수 없는 경우이므로 III.A절과 같은 과정으로 쉽게 구해지므로 생략한다.

먼저 두 개의 릴레이 모두 디코딩에 성공한 경우의 아웃티지 사건의 여집합의 확률은 다음과 같다.

$$\Pr[I_{D_{B1}} < R] = \Pr[\gamma_{D_{B1}} > u_2 | S_{D1}] \Pr[S_{D1}]. \quad (14)$$

여기서 $u_2 = 2^{3R} - 1$ 이다. 이 경우 R_1 과 R_2 모두 디코딩에 성공해야 하므로

$$\Pr[S_{D1}] = \Pr[R_2 \in S_D | R_1 \in S_D] \Pr[R_1 \in S_D] \quad (15)$$

이다. 다음으로 $\Pr[\gamma_{D_{B1}} > u_2 | S_{D1}]$ 을 계산하기 위해 지수 확률 변수들의 합인 $\gamma_{D_{B1}}$ 의 PDF는

$$f_{\gamma_{D_{B1}}}(x) = \prod_{i \in S, R_1, R_2} \lambda_{i,D} e^{-\lambda_{i,D} x} \times \sum_{j \in S, R_1, R_2} \frac{e^{-\lambda_{j,D} x}}{\prod_{\substack{k \in S, R_1, R_2 \\ k \neq j}} (\lambda_{k,D} - \lambda_{j,D})} \quad (16)$$

이고 이를 이용하여 $\Pr[\gamma_{D_{B1}} > u_2 | S_{D1}]$ 을 구하면 다음과 같다.

$$\Pr[\gamma_{D_{B1}} < u_2] = \int_0^{u_2} f_{\gamma_{D_{B1}}}(x) dx. \quad (17)$$

다음으로 R_2 만이 디코딩에 성공하는 경우 아웃티지가 일어나지 않을 확률은

$$\Pr[I_{D_{B2}} > R] = \Pr[\gamma_{D_{B2}} > u_2 | S_{D2}] \Pr[S_{D2}] \quad (18)$$

이고, 여기서

$$+\Pr[S_{D2}] = \Pr[R_2 \in S_D | R_1 \notin S_D] \Pr[R_1 \notin S_D]. \quad (19)$$

이 때, R_2 에서 수신한 신호는 소스 노드로부터 받은 신호밖에 없다는 데 주의해야 한다. 이 경우, 목적지 노드에서는 R_1 으로부터 신호를 수신 할 수 없으므로 식 (16)에서 i, j, k 가 가질 수 있는 원소가 S, R_2 로 바뀐다는 것 이외에 모든 것을 동일하게 적용하여 구할 수 있다.

마지막으로 R_1 만이 디코딩에 성공한 경우 아웃티지가 일어나지 않을 확률은

$$\Pr[I_{D_{B3}} > R] = \Pr[\gamma_{D_{B3}} > u_2 | S_{D3}] \Pr[S_{D3}] \quad (20)$$

이고, 여기서

$$\Pr[S_{D3}] = \Pr[R_2 \notin S_D | R_1 \in S_D] \Pr[R_1 \in S_D]. \quad (21)$$

이 때, R_2 에서는 소스 노드와 R_1 로부터 받은 신호를 수신하므로 R_2 가 디코딩 집합에 속할 확률은 위의 경우와 다르다는 데 유의한다. 또한, 목적지 노드에서는 R_2 로부터 신호를 수신할 수 없으므로 식 (16)을 적용하여 아웃티지의 여사건의 확률을 구하면 i, j, k 가 가질 수 있는 원소는 S, R_1 로 바뀐다. 이와 같이 구해진 각 경우에 따른 확률들을 total probability law를 이용하여 최종적인 아웃티지 확률을 구하면 다음 페이지의 식 (27)과 같이 쓸 수 있다.

3.3 베스트 릴레이를 선택하는 경우

베스트 릴레이를 선택하는 기법 역시 여집합의

확률을 이용하여 구하기로 하자. 디코딩에 성공한 릴레이가 없는 경우는 III.B에서와 마찬가지로 생략한다.

다음으로 베스트 릴레이를 선택하는 경우에는 디코딩에 성공한 릴레이가 한 개인 경우 두 번째 타임 슬롯에서 그 릴레이만이 협력 통신에 참여하며, 두 릴레이 모두 소스 노드로부터 받은 신호만을 디코딩에 이용하므로 R_k 이 디코딩에 성공하고 R_j 이 그렇지 못했을 때의 아웃티지가 일어나지 않을 확률은 다음과 같다.

$$\Pr[\gamma_{D_{C2}} > u_3 | S_{D,C2}] = \int_{u_3}^{\infty} f_{\gamma_{D_{C2}}}(x) dx, \quad (22)$$

$$\Pr[S_{D,C2}] = \Pr[R_k \in S_D] \Pr[R_j \notin S_D].$$

여기서 $u_3 = 2^{2R} - 1$ 이다.

마지막으로 모든 릴레이가 디코딩에 성공했을 때에 대해서 살펴보자. 먼저 $\max\{\gamma_{R_1,D}, \gamma_{R_2,D}\}$ 의 PDF를 구하기 위해 $\gamma_{R_1,D} \equiv X_1, \gamma_{R_2,D} \equiv X_2, \gamma_{S,D} \equiv Y$ 라고 하자. X_1 와 X_2 는 상호 독립적이므로 이들의 joint PDF는 각 지수 확률 변수의 PDF의 곱으로 쓸 수 있다. 다시 $\max\{\gamma_{R_1,D}, \gamma_{R_2,D}\} \equiv X$ 라고 하면 변수 X 의 CDF는

$$F_X(x) = \int_0^x \int_0^x f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (23)$$

이고, PDF는 간단히 위의 식을 미분하여 얻을 수 있다. 다음으로 $Z = X + Y$ 라고 하면 Z 의 PDF는 다음과 같다.

$$f_Z(z) = C_1(1 - e^{-(\lambda_{R_1,D} + \lambda_{S,D})x}) + C_2(1 - e^{-(\lambda_{R_2,D} + \lambda_{S,D})x}) - C_3(1 - e^{-(\lambda_{R_1,D} + \lambda_{R_2,D} + \lambda_{S,D})x}). \quad (24)$$

여기서 상수들의 값은 다음과 같다.

$$C_1 = \frac{\lambda_{R_1,D}}{\lambda_{R_1,D} + \lambda_{S,D}}, C_2 = \frac{\lambda_{R_2,D}}{\lambda_{R_2,D} + \lambda_{S,D}}, \quad (25)$$

$$C_3 = \frac{\lambda_{R_1,D} + \lambda_{R_2,D}}{\lambda_{R_1,D} + \lambda_{R_2,D} + \lambda_{S,D}}.$$

위의 식을 이용하여 아웃티지가 일어나지 않을 확

를 구하면

$$\Pr[Z > u_3 | S_{D_{C3}}] = \int_{u_3}^{\infty} f_z(z) dz, \quad (26)$$

$$\Pr[S_{D_{C3}}] = \Pr[R_1 \in S_D] \Pr[R_2 \in S_D].$$

과 같다. 최종적인 베스트 릴레이 선택 기법에서의 아웃티지 확률은 지금까지 구한 아웃티지가 일어나지 않을 확률들의 합을 여집합의 확률을 이용하여 구할 수 있다. 이때의 결과는 다음 페이지의 식 (28)과 같다.

IV. 수치적 결과

본 논문에서는 III절에서 유도한 아웃티지 확률식을 기반으로 특정한 두 가지 경우에 대해 실험하였다. 이 때, 릴레이의 개수는 2개, 임계값 $R = 1 [bps/Hz]$, $\lambda_{i,j} = d_{i,j}^\alpha$ 가 가정하였다. 그림 3와 그림 5는 소스 노드와 목적지 노드, 그리고 두 개의 릴레이가 일직선상에 있고 서로 동일한 간격으로 위치해 있는 경우에 대하여 소수 노드와 목적지 노드 사이의 간격이 증가함에 따른 아웃티지 확률을 실험한 결과이다. 이 때 그림 3와 5의 차이점은 경로 감쇠 지수가 다르다는 점이다. 여기서 경로 감쇠 지수로 사용한 값은 각각 2와 4이다. 실험 결과 경로 감쇠 지수가 2인 경우, 3 hop을 이용하는 경우와 베스트 릴레이를 선택하는 경우가 비슷한 성

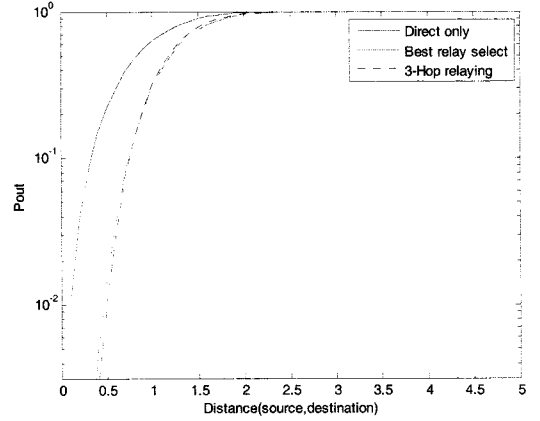


그림 3. S, R_1, R_2 그리고 D 사이의 간격이 동일하고 $\alpha=2$ 일때, S 와 D 사이의 거리에 따른 아웃티지 확률

능을 보이지만 경로 감쇠 지수가 4인 경우엔 3 hop을 이용하는 경우가 보다 성능이 우수한 것을 볼 수 있었다. 또한 그림 4과 6는 앞에서와 마찬가지로 소스 노드와 목적지 노드, 그리고 두 개의 릴레이가 일직선상에 있고, 소스 노드와 목적지 노드 사이의 거리가 d 일때, R_1 은 소스 노드로부터 $d/2$ 인 지점에, R_2 는 소스 노드로부터 $2d/3$ 인 지점에 위치한 경우에 대해 d 가 증가함에 따라 아웃티지 확률을 실험한 결과이다. 이 경우, 모든 간격이 동일한 경우와 달리 경로 감쇠 지수가 4인 경우에만 3 hop을 사용하여 전송하였을 때 좋은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 마지막으로 그림 7은

$$\Pr[I_{D_B} < R] = 1 - \Pr[\gamma_{D_B} > u_3]$$

$$= 1 - \left\{ \frac{\lambda_{r1d}\lambda_{r2d}e^{-\lambda_{sd}u_3}}{(\lambda_{r1d} - \lambda_{sd})(\lambda_{r2d} - \lambda_{sd})} + \frac{\lambda_{sd}\lambda_{r2d}e^{-\lambda_{r1d}u_3}}{(\lambda_{sd} - \lambda_{r1d})(\lambda_{r2d} - \lambda_{r1d})} + \frac{\lambda_{r1d}\lambda_{sd}e^{-\lambda_{r2d}u_3}}{(\lambda_{r1d} - \lambda_{r2d})(\lambda_{sd} - \lambda_{r2d})} \right\} e^{-\lambda_{sr1}u}$$

$$\times \left(\frac{\lambda_{r1r2}e^{-\lambda_{sr2}u} - \lambda_{sr2}e^{-\lambda_{r1r2}u}}{\lambda_{r1r2} - \lambda_{sr2}} \right) + \left(\frac{\lambda_{r1d}e^{-\lambda_{sd}u_3} - \lambda_{sd}e^{-\lambda_{r1d}u_3}}{\lambda_{r1d} - \lambda_{sd}} \right) e^{-\lambda_{sr1}u} \left(1 - \frac{\lambda_{r1r2}e^{-\lambda_{sr2}u} - \lambda_{sr2}e^{-\lambda_{r1r2}u}}{\lambda_{r1r2} - \lambda_{sr2}} \right) \quad (27)$$

$$+ \left(\frac{\lambda_{r2d}e^{-\lambda_{sd}u_3} - \lambda_{sd}e^{-\lambda_{r2d}u_3}}{\lambda_{r2d} - \lambda_{sd}} \right) \left(1 - e^{-\lambda_{sr1}u} \right) e^{-\lambda_{sr2}u} + e^{-\lambda_{sd}u_3} \left(1 - e^{-\lambda_{sr1}u} \right) \left(1 - e^{-\lambda_{sr2}u} \right).$$

$$\Pr[I_{D_C} < R] = 1 - \Pr[\gamma_{D_C} > u_2]$$

$$= 1 - \left\{ e^{-\lambda_{sd}u_2} \left(\frac{\lambda_{r1d}}{(\lambda_{r1d} - \lambda_{sd})} + \frac{\lambda_{r2d}}{(\lambda_{r2d} - \lambda_{sd})} - \frac{\lambda_{r1d} + \lambda_{r2d}}{(\lambda_{r1d} + \lambda_{r2d} - \lambda_{sd})} \right) - \lambda_{sd} \left(\frac{e^{-\lambda_{r1d}u_2}}{\lambda_{r1d} - \lambda_{sd}} + \frac{e^{-\lambda_{r2d}u_2}}{\lambda_{r2d} - \lambda_{sd}} - \frac{e^{-(\lambda_{r1d} + \lambda_{r2d})u_2}}{\lambda_{r1d} + \lambda_{r2d} - \lambda_{sd}} \right) \right\}$$

$$\times e^{-\lambda_{sr1}u} e^{-\lambda_{sr2}u} + \left(\frac{\lambda_{r1d}e^{-\lambda_{sd}u_2} - \lambda_{sd}e^{-\lambda_{r1d}u_2}}{\lambda_{r1d} - \lambda_{sd}} \right) e^{-\lambda_{sr1}u} \left(1 - e^{-\lambda_{sr2}u} \right) + \left(\frac{\lambda_{r2d}e^{-\lambda_{sd}u_2} - \lambda_{sd}e^{-\lambda_{r2d}u_2}}{\lambda_{r2d} - \lambda_{sd}} \right) \left(1 - e^{-\lambda_{sr1}u} \right) e^{-\lambda_{sr2}u}$$

$$+ e^{-\lambda_{sd}u_2} \left(1 - e^{-\lambda_{sr1}u} \right) \left(1 - e^{-\lambda_{sr2}u} \right).$$

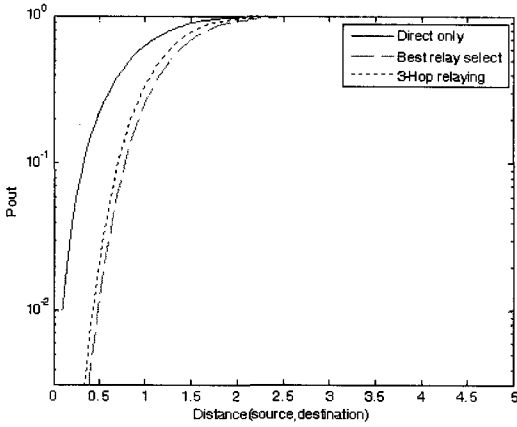


그림 4. S 와 D 사이의 간격이 d 일때, S 와 R_1, R_2 사이의 간격이 각각 $d/2, 2d/3$ 이고 $\alpha=2$ 일때 아웃티지 확률

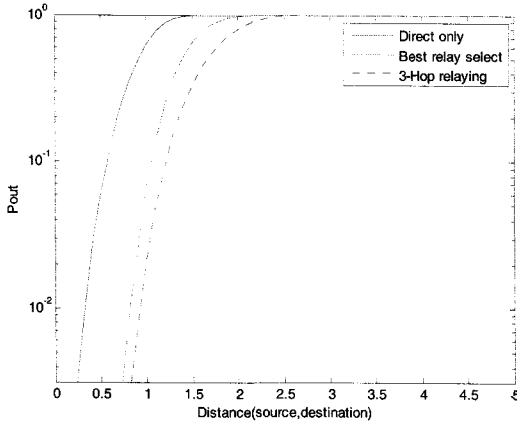


그림 5. S, R_1, R_2 그리고 D 사이의 간격이 동일하고 $\alpha=4$ 일때, S 와 D 사이의 거리에 따른 아웃티지 확률

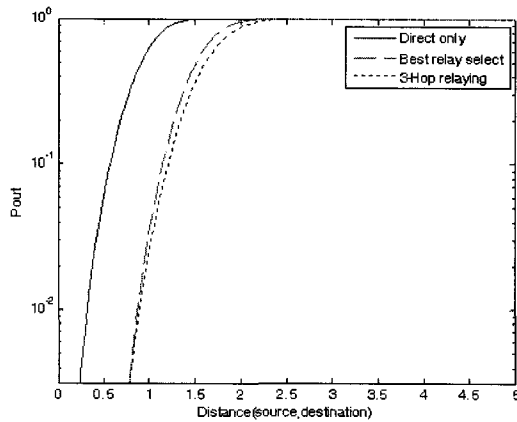


그림 6. S 와 D 사이의 간격이 d 일때, S 와 R_1, R_2 사이의 간격이 각각 $d/2, 2d/3$ 이고 $\alpha=4$ 일때 아웃티지 확률

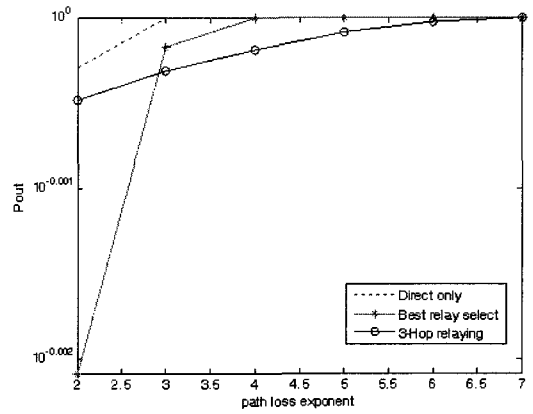


그림 7. S 와 D 사이의 간격 d 가 2.8이고 S 와 R_1, R_2 사이의 간격이 각각 $d/2, 2d/3$ 일때, 경로감쇠지수에 따른 아웃티지 확률

$d=2.8$ 이고 각 홉의 거리가 그림 4과 6의 실험에서와 같이 설정되었을 때, 경로 감쇠 지수가 증가함에 따른 다중 홉 중계 방식과 베스트 릴레이 선택 중계 방식의 아웃티지 확률을 표현한 그림이다. 실험 결과 경로 감쇠 지수가 증가함에 따라 베스트 릴레이 선택 중계 방식의 아웃티지 확률은 경로감쇠 지수가 2에서 3으로 증가할 때 급격하게 증가하는데 반해, 다중 홉 중계 방식은 다소 완만하게 증가함을 볼 수 있었다. 그 결과, 경로감쇠 지수가 3인 지점에서 부터는 3-hop 중계 방식의 아웃티지 확률이 베스트 릴레이 선택 중계 방식의 아웃티지 확률보다 낮게 나와 보다 좋은 성능을 보인다는 것을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 III절에서 유도한 아웃티지 확률을 통해 소스 노드와 목적지 노드 사이의 직접 경로만 존재할 경우와 2개의 릴레이를 모두 사용하여 협력하는 경우, 그리고 마지막으로 2개의 릴레이 중에서 베스트 릴레이를 선택하여 협력하는 경우에 대한 아웃티지 확률을 분석하였다. 분석 결과 2개의 릴레이가 있을 때, 2개의 릴레이 가운데 종단간 SNR이 가장 좋은 베스트 릴레이를 선택하는 경우가 항상 좋지않은 않다는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 2개의 릴레이만을 고려하였으나, 일반화된 M 개의 릴레이가 고려된 경우의 아웃티지 확률을 구하는 것과, 이 경우와 베스트 릴레이 선택 기법과의 비교는 앞으로의 연구가 될 것이다.

참고문헌

- [1] 김중빈, 김동우, “협력 다이버시티,” 한국통신학회지, 제25권, 제5호, pp.38-46, 2008년 4월.
- [2] 윤유선, 김중빈, 김동우, “간섭신호와 노이즈를 고려한 디코딩 후 전달 릴레이 시스템의 아웃티지 성능 분석,” 한국통신학회 추계종합학술대회, 2008년 11월 15일.
- [3] Y. Zhao, R. Adve, and T. J. Lim, “Symbol error rate of selection amplify-and-forward relay system,” *IEEE Communications Letters*, Vol. 10, No. 11, pp.757-759, 2006.
- [4] E. Beres and R. S. Adve, “Selection cooperation in multi-source cooperative networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 7, No.1, pp.118-127, 2008.
- [5] S. S. Ikki and M. H. Ahmed, “Performance of multiple-relay cooperative diversity systems with best relay selection over Rayleigh fading channels,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Article No.145, Jan. 2008.

윤유선 (You-Sun Youn)

준회원



2009년 2월 한양대학교 전자컴퓨터공학부 학사

2009년 3월 한양대학교 전자전기-제어계측공학 석사 과정
<관심분야> multi-hop relaying

김동우 (Dongwoo Kim)

정회원



1994년~2000년 Shinsegi

Telecom 선임과장
2000년~현재 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수
<관심분야> 이동통신채널 용량 증대 방법