

디코딩 후 전달 중계 기반 다중 홉 시스템에서 하나의 홉 채널 정보를 이용하는 중계 경로 선택 기법 연구

Study on Relaying Path Selection Using One-Hop Channel Information in Decode-and-Forward Relaying Based Multi-Hop Systems

이 인 호*
(In-Ho Lee)

요 약

본 논문에서는 다중 홉 시스템에서 하나의 홉에 대한 채널 정보만을 이용하는 효율적인 부분 중계 노드 선택(*efficient partial relay selection, EPRS*) 기법에 대한 아웃티지 확률을 레일레이 페이딩 채널에서 분석한다. 특히, 디코딩 후 전달 중계 기반의 *EPRS* 기법에 대한 정확한 아웃티지 확률의 식을 유도한다. 또한, 다중 홉 시스템에서 *EPRS* 기법의 실효성을 확인하기 위하여, 임의의 중계 경로에서 종단간 신호 대 잡음비와 각 홉의 신호 대 잡음비의 상관관계를 분석한다. 그리고, 수치적 결과를 통해 *EPRS* 기법과 모든 채널 정보를 이용하는 중계 노드 선택 기법의 아웃티지 성능을 비교한다.

핵심어 : 다중 홉 시스템, 디코딩 후 전달 중계, 중계 노드 선택, 아웃티지 확률, 레일레이 페이딩 채널

Abstract

In this paper, the outage probability of *efficient partial relay selection (EPRS)* using only one-hop channel information in multi-hop systems is analyzed in Rayleigh fading channels. In particular, we derive an exact and closed-form expression for the outage probability of *decode-and-forward relaying based EPRS*. In order to prove the usefulness of *EPRS* in multi-hop systems, we also analyze the correlation between the end-to-end signal-to-noise ratio(SNR) and the SNR for each hop at an arbitrary relaying path. Furthermore, through numerical investigation, we compare the outage performances for *EPRS* and the best relay selection using all channel information.

Key words : multi-hop system, *decode-and-forward relaying*, relay selection, outage probability, Rayleigh fading channels

* 주저자 : 국립한경대학교 전기전자제어공학과 조교수

† 논문접수일 : 2013년 3월 4일

† 논문심사일 : 2013년 4월 27일

† 게재확정일 : 2013년 4월 27일

1. 서 론

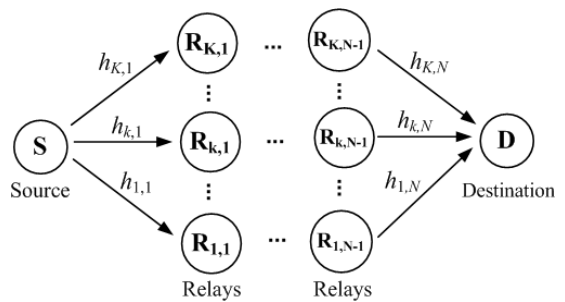
저전력 노드로 구성된 대규모 무선 네트워크에서는 먼 거리의 노드간 통신을 위해 다중 홉 전송이 필요하다. 최근 다중 홉 시스템의 단순한 형태인 듀얼 홉(dual-hop) 시스템에서 협력 다이버시티(diversity)를 얻을 수 있는 기술이 연구되었다[1-6].

[1]에서는 다수 중계 노드를 갖는 듀얼 홉 시스템에서 가장 좋은 종단간 성능을 제공하는 하나의 중계 노드만을 이용하여 신호를 전달하는 중계 노드 선택(best relay selection, BRS) 기법을 제안하였다. 이 BRS 기법은 최대 다이버시티 이득을 제공하지만, 모든 링크에 대한 채널 정보를 필요로 한다. 따라서, [2]에서는 듀얼 홉 시스템에서 첫 번째 홉에 대한 채널 정보만을 이용하여 하나의 중계 노드를 선택하는 부분 중계 노드 선택(partial relay selection, PRS) 기법을 제안하였다. 이 PRS 기법은 중계 노드 선택시 요구되는 채널 정보를 제한하여 피드백 오버헤드(feedback overhead) 및 복잡도를 낮춘다. 그러나, 최대 다이버시티 이득을 얻지 못하는 단점 때문에 아웃티지(outage) 성능이 저조하다. [3,4]에서는 디코딩 후 전달 및 증폭 후 전달 기반의 PRS 기법에 대한 아웃티지 확률을 레일레이 페이딩(Rayleigh fading) 채널과 나카가미 페이딩(Nakagami fading) 채널에서 각각 분석하였다.

PRS의 저조한 아웃티지 성능을 개선하기 위하여 [5]에서는 효율적인 부분 중계 노드 선택(efficient partial relay selection, EPRS) 기법을 제안하였다. EPRS 기법에서는 각각의 종단간 중계 경로에 대해 첫 번째 홉과 두 번째 홉중 평균 채널 전력이 작은 홉에 대한 채널 정보만을 이용하여 하나의 중계 노드를 선택한다. 이 기법은 종단간 성능이 평균 채널 전력이 작은 홉에 지배적인 사실을 이용한 것이다. [5,6]에서는 증폭 후 전달과 디코딩 후 전달 기반의 EPRS 기법에 대한 아웃티지 확률을 레일레이 페이딩 채널에서 각각 분석하였다. [5,6]에서의 성능 비교를 통해, EPRS 기법은 기존의 PRS 기법 보다 다소 복잡하지만 향상된 아웃티지 성능을 제공하고, EPRS 기법의 성능은 첫 번째 홉과 두 번째 홉의 평

균 채널 전력의 차이가 클 때 BRS 기법의 성능에 근접한다는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 EPRS 기법은 ITS(Intelligent Transportation Systems)를 위한 센서 네트워크 및 차량간 무선 통신에서 무선 자원 절약 및 통신 신뢰도 향상을 위하여 이용될 수 있다.

지금까지의 EPRS 기법 연구는 다중 홉 시스템의 단순한 형태인 듀얼 홉 시스템에 집중되어 왔다. 따라서, 세 개 이상의 홉을 갖는 다중 홉 시스템에서 EPRS 기법에 대한 성능 연구는 매우 미흡하다. 그러므로, 본 논문에서는 <그림 1>과 같이 다수의 홉과 다수의 중계 경로는 갖는 일반화된 다중 홉 시스템을 고려하여 디코딩 후 전달 중계 기반의 EPRS 기법에 대한 아웃티지 성능을 레일레이 페이딩 채널에서 분석한다. 또한, 본 논문에서는 일반화된 다중 홉 시스템에서 EPRS 기법의 실효성을 확인하기 위하여, 임의의 중계 경로에서 종단간 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)와 각 홉의 신호대 잡음비의 상관관계를 분석한다. 그리고, 수치적 결과를 통해 EPRS 기법과 BRS 기법의 아웃티지 성능을 비교한다.



<그림 1> 다수 중계 경로를 갖는 다중 홉 시스템
<Fig. 1> A multi-hop system with multiple relaying paths

II. 시스템 모델

본 논문에서는 <그림 1>과 같이 다수의 중계 경로를 갖는 다중 홉 시스템을 고려한다. 다중 홉 시스템에서는 하나의 소스 노드(S)와 하나의 목적지 노드(D)간 통신을 위한 K개의 가능한 중계 경로가 존재하고, 각 중계 경로는 N-1개의 중계 노드

$(R_{k,1}, \dots, R_{k,N-1})$ 로 구성된다. 여기서, k 는 중계 경로 인덱스를 의미한다. 이 같은 다중 홉 시스템에서 하나의 중계 경로를 선택하여, 소스 노드의 신호를 목적지 노드까지 전송한다. 이때, 인접한 노드간 전송만 가능하며, 각 중계 노드는 반이중 모드로 동작하여 송수신을 동시에 할 수 없다고 가정한다. 따라서, 첫 번째 시간 슬롯(slot)에서 소스 노드는 선택된 중계 경로의 첫 번째 중계 노드로 신호를 전송하고, 두 번째 시간 슬롯에서 신호를 수신한 첫 번째 중계 노드가 선택된 중계 경로의 두 번째 중계 노드로 신호를 전달한다. 이로써, 소스 노드의 신호가 목적지 노드까지 전송되기 위해서 N 개의 시간 슬롯이 필요하다. 본 논문에서는 중계 방식으로 디코딩 후 전달 중계 방식을 이용한다. 디코딩 후 전달 중계 방식에서는 각 중계 노드가 수신한 신호를 디코딩한 후 다시 인코딩하여 다음 중계 노드로 전달한다. 따라서, 수신 신호의 잡음을 제거할 수 있는 장점이 있다.

$h_{k,n} (k = 1, \dots, K, n = 1, \dots, N)$ 은 k 번째 중계 경로의 n 번째 홉에 대한 복소 채널 계수를 의미한다. 모든 채널들은 독립적인 레일리 페이딩 채널을 가정한다. 그리고, k 번째 중계 경로의 n 번째 홉에 대한 채널 전력인 $|h_{k,n}|^2$ 의 평균을 $\beta_{k,n}$ 이라 하자. 본 논문에서는 모든 송신 노드들의 송신 전력이 P 로 동일하고, 모든 수신 노드들의 잡음 전력이 σ^2 로 동일하다고 가정하여, 평균 송신 SNR인 ρ 가 모든 링크에서 $\rho = P/\sigma^2$ 로 동일하다고 가정한다. 따라서, k 번째 중계 경로의 n 번째 홉에 대한 수신 SNR을 $\gamma_{k,n}$ 으로 정의하여, $\gamma_{k,n} = \rho|h_{k,n}|^2$ 으로 표현한다.

[5]에서 제안하는 EPRS 기법을 다중 홉 시스템에 적용하면, 다음과 같이 중계 경로를 선택할 수 있다.

$$k_e = \arg \max_{k=1,2,\dots,K} \{\gamma_{k,i_k}\} \quad (1)$$

여기서,

$$i_k = \arg \min_{n=1,2,\dots,N} \{w_{k,n}\} \quad (2)$$

이고, $w_{k,n} = \rho\beta_{k,n}$ 이다. 식(1)에서와 같이, EPRS 기법은 각 중계 경로에서 하나의 홉에 대한 채널 정보만을 이용하여 중계 경로를 선택한다.

III. 상관관계 분석

듀얼 홉 시스템에서 제안된 EPRS 기법의 실효성 여부를 확인하기 위하여, 본 논문에서는 k 번째 중계 경로에서 종단간 SNR과 각 홉의 SNR의 상관관계를 분석한다.

k 번째 중계 경로에 대한 용량은 k 번째 중계 경로를 구성하는 홉중 가장 작은 용량을 제공하는 홉에 지배적이다[7]. 따라서, k 번째 중계 경로에 대한 용량은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} C_k^{DF} &= \min_{n=1,\dots,N} \left\{ \frac{1}{N} \log_2(1 + \gamma_{k,n}) \right\} \\ &= \frac{1}{N} \log_2(1 + \min_{n=1,\dots,N} \{\gamma_{k,n}\}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $1/N$ 은 다중 홉 전송시 소요되는 시간 슬롯을 반영한 부분이다. 그리고, 식(3)으로부터 k 번째 중계 경로에 대한 용량은 $\min_{n=1,\dots,N} \{\gamma_{k,n}\}$ 에 비례함을 알 수 있다. 따라서, $\min_{n=1,\dots,N} \{\gamma_{k,n}\}$ 을 종단간 성능을 대표하는 SNR로 간주할 수 있다.

$\gamma_k = \min_{n=1,\dots,N} \{\gamma_{k,n}\}$ 라 하여, k 번째 중계 경로에서, γ_k 과 $\gamma_{k,n}$ 에 대한 상관관계는 다음과 같이 얻어진다.

$$\lambda_{k,n} = \frac{E[\gamma_k \gamma_{k,n}] - E[\gamma_k] E[\gamma_{k,n}]}{\sqrt{\text{Var}[\gamma_k] \text{Var}[\gamma_{k,n}]}} \quad (4)$$

여기서, $E[\cdot]$ 와 $\text{Var}[\cdot]$ 은 평균과 분산을 의미한다. 그리고, $\gamma_{k,n}$ 의 확률 밀도 함수는 다음과 같이 주어진다[8].

$$f_{\gamma_{k,n}}(x) = \frac{1}{w_{k,n}} e^{-x/w_{k,n}} \quad (5)$$

식(5)의 확률 밀도 함수를 이용하여, γ_k 의 누적 분포 함수를 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} F_{\gamma_k}(x) &= \Pr\{\gamma < x\} \\ &= 1 - \Pr\{\min_{n=1, \dots, N}\{\gamma_{k,n}\} > x\} \\ &= 1 - \Pr\{\gamma_{k,1} > x, \gamma_{k,2} > x, \dots, \gamma_{k,N} > x\} \\ &= 1 - e^{-x\left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{w_{k,n}}\right)} \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)을 미분하여, γ_k 의 확률 밀도 함수를 다음과 같이 구한다.

$$f_{\gamma_k}(x) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{w_{k,n}} e^{-x\left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{w_{k,n}}\right)} \quad (7)$$

식(7)을 이용하여, γ_k 의 평균을 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} E[\gamma_k] &= \int_0^{\infty} x f_{\gamma_k}(x) dx \\ &= \int_0^{\infty} x \sum_{n=1}^N \frac{1}{w_{k,n}} e^{-x\left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{w_{k,n}}\right)} dx \\ &= \left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{w_{k,n}}\right)^{-1} \end{aligned} \quad (8)$$

식(5)의 확률 밀도 함수를 이용하여, $\gamma_{k,n}$ 의 평균을 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} E[\gamma_{k,n}] &= \int_0^{\infty} x f_{\gamma_{k,n}}(x) dx \\ &= \int_0^{\infty} \frac{x}{w_{k,n}} e^{-x/w_{k,n}} dx = w_{k,n} \end{aligned} \quad (9)$$

식(7)과 식(5)의 확률 밀도 함수를 이용하여, γ_k^2 과 $\gamma_{k,n}^2$ 의 평균을 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} E[\gamma_k^2] &= \int_0^{\infty} x^2 f_{\gamma_k}(x) dx \\ &= \int_0^{\infty} x^2 \sum_{n=1}^N \frac{1}{w_{k,n}} e^{-x\left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{w_{k,n}}\right)} dx \\ &= 2 \left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{w_{k,n}}\right)^{-2} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} E[\gamma_{k,n}^2] &= \int_0^{\infty} x^2 f_{\gamma_{k,n}}(x) dx \\ &= \int_0^{\infty} \frac{x^2}{w_{k,n}} e^{-x/w_{k,n}} dx = 2w_{k,n}^2 \end{aligned} \quad (11)$$

따라서, 식(8)부터 식(11)까지를 이용하여, γ_k 과 $\gamma_{k,n}$ 의 분산을 다음과 같이 구한다.

$$Var[\gamma_k] = E[\gamma_k^2] - E[\gamma_k]^2 = \left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{w_{k,n}}\right)^{-2} \quad (12)$$

$$Var[\gamma_{k,n}] = E[\gamma_{k,n}^2] - E[\gamma_{k,n}]^2 = w_{k,n}^2 \quad (13)$$

끝으로, 식(5)의 확률 밀도 함수를 이용하여, $\gamma_k \gamma_{k,n}$ 의 평균을 다음과 같이 유도한다.

$$\begin{aligned} E[\gamma_k \gamma_{k,n}] &= \int_0^{\infty} \dots \int_0^{\infty} [\min_{j=1, \dots, N}\{x_j\}] x_n \\ &\quad \times f_{\gamma_{k,1}}(x_1) \dots f_{\gamma_{k,N}}(x_N) dx_1 \dots dx_N \\ &= \sum_{j=1}^N \int_0^{\infty} \int_{x_j}^{\infty} \dots \int_{x_j}^{\infty} x_j x_n f_{\gamma_{k,1}}(x_1) \dots f_{\gamma_{k,N}}(x_N) \\ &\quad \times dx_1 \dots dx_{j-1} dx_{j+1} \dots dx_N dx_j \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, $n = j$ 일때,

$$\begin{aligned}
 & \int_0^\infty \int_{x_n}^\infty \cdots \int_{x_n}^\infty x_n^2 f_{\gamma_{k,1}}(x_1) \cdots f_{\gamma_{k,N}}(x_N) \\
 & \quad \times dx_1 \cdots dx_{n-1} dx_{n+1} \cdots dx_N dx_n \\
 &= \int_0^\infty \int_{x_n}^\infty \cdots \int_{x_n}^\infty x_n^2 \prod_{c=1}^N \frac{1}{w_{k,c}} e^{-x_c/w_{k,c}} \\
 & \quad \times dx_1 \cdots dx_{n-1} dx_{n+1} \cdots dx_N dx_n \\
 &= \int_0^\infty \frac{x_n^2}{w_{k,n}} e^{-x_n \left(\sum_{c=1}^N \frac{1}{w_{k,c}} \right)} dx_n \\
 &= \frac{2}{w_{k,n}} \left(\sum_{c=1}^N \frac{1}{w_{k,c}} \right)^{-3} \tag{15}
 \end{aligned}$$

그리고, $n \neq j$ 일때,

$$\begin{aligned}
 & \int_0^\infty \int_{x_j}^\infty \cdots \int_{x_j}^\infty x_j x_n f_{\gamma_{k,1}}(x_1) \cdots f_{\gamma_{k,N}}(x_N) \\
 & \quad \times dx_1 \cdots dx_{j-1} dx_{j+1} \cdots dx_N dx_j \\
 &= \int_0^\infty \int_{x_j}^\infty \cdots \int_{x_j}^\infty x_j x_n \prod_{c=1}^N \frac{1}{w_{k,c}} e^{-x_c/w_{k,c}} \\
 & \quad \times dx_1 \cdots dx_{j-1} dx_{j+1} \cdots dx_N dx_j \\
 &= \int_0^\infty \int_{x_j}^\infty \frac{x_j x_n}{w_{k,j} w_{k,n}} e^{-x_n/w_{k,n}} e^{-\left(\sum_{c=1, c \neq n}^N \frac{x_j}{w_{k,c}} \right)} dx_n dx_j \\
 &= \int_0^\infty \frac{x_j (x_j + x_n)}{w_{k,j}} e^{-x_j \left(\sum_{c=1}^N \frac{1}{w_{k,c}} \right)} dx_j \\
 &= \frac{2}{w_{k,j}} \left(\sum_{c=1}^N \frac{1}{w_{k,c}} \right)^{-3} + \frac{w_{k,n}}{w_{k,j}} \left(\sum_{c=1}^N \frac{1}{w_{k,c}} \right)^{-2} \tag{16}
 \end{aligned}$$

따라서, 식(15)와 식(16)을 식(14)에 대입하여, 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
 E[\gamma_k \gamma_{k,n}] &= \frac{2}{w_{k,n}} \left(\sum_{c=1}^N \frac{1}{w_{k,c}} \right)^{-3} + \sum_{\substack{c=1 \\ c \neq n}}^N \left[\frac{2}{w_{k,c}} \right. \\
 & \quad \left. \times \left(\sum_{c=1}^N \frac{1}{w_{k,c}} \right)^{-3} + \frac{w_{k,n}}{w_{k,c}} \left(\sum_{c=1}^N \frac{1}{w_{k,c}} \right)^{-2} \right] \tag{17}
 \end{aligned}$$

최종적으로, 식(8), 식(9), 식(12), 식(13), 식(17)을 식(4)에 대입하여, γ_k 과 $\gamma_{k,n}$ 에 대한 상관관계는 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
 \lambda_{k,n} &= \left(\sum_{c=1}^N \frac{1}{w_{k,c}} \right)^{-1} \frac{2}{w_{k,n}} + \left(\sum_{c=1}^N \frac{1}{w_{k,c}} \right)^{-1} \\
 & \quad \times \left(\sum_{\substack{c=1 \\ c \neq n}}^N \frac{1}{w_{k,c}} \right) - 1 \\
 &= \frac{1}{w_{k,n}} \left(\sum_{c=1}^N \frac{1}{w_{k,c}} \right)^{-1} \tag{18}
 \end{aligned}$$

식(18)로부터, γ_k 와 상관관계가 가장 높은 $\gamma_{k,n}$ 은 가장 작은 $w_{k,n}$ 을 갖는 $\gamma_{k,n}$ 임을 알 수 있다. 따라서, 식(2)에서 보여주는 k 번째 중계 경로에서 가장 작은 평균 채널 전력을 제공하는 홉에 대한 SNR이 종단간 SNR을 가장 잘 나타낸다고 할 수 있다. 결과적으로, 듀얼 홉 시스템의 EPRS 기법은 일반화된 다중 홉 시스템에서도 동일하게 적용될 수 있다.

IV. 아웃티지 성능 분석

본 논문에서는 아웃티지 확률을 종단간 용량이 용량의 목표치 보다 작은 확률로 정의한다. 따라서, 식(1)을 이용하여, 다중 홉 시스템에서 디코딩 후 전달 기반 EPRS 기법에 대한 아웃티지 확률을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{out} = \Pr\{C_{k_c}^{DF} < R\} = \Pr\{\gamma_{k_c} < 2^{NR} - 1\} \tag{20}$$

여기서, R 은 데이터율의 목표치를 의미한다. 그리고, 수식 표현의 편의를 위해 $z = 2^{NR} - 1$ 이라 하자.

[5]에서의 아웃티지 확률 분석과 유사하게, 식(20)을 다음과 같이 유도한다.

$$\begin{aligned}
 P_{out} &= \sum_{k=1}^K \Pr\{\gamma_k < z, \gamma_{k,i_k} > \gamma_{1,i_1}, \dots, \\
 &\quad \gamma_{k,i_k} > \gamma_{k-1,i_{k-1}}, \gamma_{k,i_k} > \gamma_{k+1,i_{k+1}}, \dots, \gamma_{k,i_k} > \gamma_{K,i_K}\} \\
 &= \sum_{k=1}^K \Pr\{\gamma_{k,i_k} > \gamma_{1,i_1}, \dots, \gamma_{k,i_k} > \gamma_{k-1,i_{k-1}}, \\
 &\quad \gamma_{k,i_k} > \gamma_{k+1,i_{k+1}}, \dots, \gamma_{k,i_k} > \gamma_{K,i_K}\} \\
 &\quad - \Pr\{\gamma_k > z, \gamma_{k,i_k} > \gamma_{1,i_1}, \dots, \gamma_{k,i_k} > \gamma_{k-1,i_{k-1}}, \\
 &\quad \gamma_{k,i_k} > \gamma_{k+1,i_{k+1}}, \dots, \gamma_{k,i_k} > \gamma_{K,i_K}\} \\
 &= 1 - \left(\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i_k}}^N \Pr\{\gamma_{k,j} > z\} \right) \sum_{k=1}^K \Pr\{\gamma_{k,i_k} > z, \\
 &\quad \gamma_{k,i_k} > \gamma_{1,i_1}, \dots, \gamma_{k,i_k} > \gamma_{k-1,i_{k-1}}, \\
 &\quad \gamma_{k,i_k} > \gamma_{k+1,i_{k+1}}, \dots, \gamma_{k,i_k} > \gamma_{K,i_K}\} \quad (21)
 \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 &\Pr\{\gamma_{k,i_k} > z, \gamma_{k,i_k} > \gamma_{1,i_1}, \dots, \gamma_{k,i_k} > \gamma_{k-1,i_{k-1}}, \\
 &\quad \gamma_{k,i_k} > \gamma_{k+1,i_{k+1}}, \dots, \gamma_{k,i_k} > \gamma_{K,i_K}\} \\
 &= \int_z^\infty \int_0^{x_k} \dots \int_0^{x_k} \prod_{j=1}^K \left(\frac{1}{w_{j,i_j}} e^{-x_j/w_{j,i_j}} \right) dx_1 \dots \\
 &\quad \times dx_{k-1} dx_{k+1} \dots dx_K dx_k \\
 &= e^{-z/w_{k,i_k}} + \sum_{j=1}^{K-1} \sum_{S_j \subseteq Q_k} \left(\frac{1}{w_{k,i_k}} + \sum_{q \in S_j} \frac{1}{w_{q,i_q}} \right)^{-1} \\
 &\quad \times \frac{(-1)^j}{w_{k,i_k}} e^{-z \left(\frac{1}{w_{k,i_k}} + \sum_{q \in S_j} \frac{1}{w_{q,i_q}} \right)} \quad (22)
 \end{aligned}$$

여기서, $Q_k = \{1, \dots, k-1, k+1, \dots, K\}$, S_j 는 Q_k 의 모든 가능한 부분집합들을 의미하며, S_j 의 원소 개수는 j 이다.

최종적으로, 식(22)을 식(21)에 대입하여 아웃티지 확률을 다음과 같이 얻는다.

$$P_{out} = 1 - \sum_{k=1}^K \left[e^{-z \left(\sum_{c=1}^N \frac{1}{w_{k,c}} \right)} + \sum_{j=1}^{K-1} \sum_{S_j \subseteq Q_k} \left(\frac{1}{w_{k,i_k}} \right. \right.$$

$$\left. \left. + \sum_{q \in S_j} \frac{1}{w_{q,i_q}} \right)^{-1} \frac{(-1)^j}{w_{k,i_k}} e^{-z \left(\sum_{c=1}^N \frac{1}{w_{k,c}} + \sum_{q \in S_j} \frac{1}{w_{q,i_q}} \right)} \right] \quad (23)$$

V. 수치적 결과

아웃티지 성능 검증 및 비교를 위하여 <표 1>과 같이 네가지 시뮬레이션 조건을 고려한다.

<표 1> 시뮬레이션 조건
(Table 1) Simulation cases

Case	Description	Value
I	$\beta_{1,1}, \beta_{1,2}, \beta_{1,3}$	5, 5, 1
	$\beta_{2,1}, \beta_{2,2}, \beta_{2,3}$	5, 5, 1
II	$\beta_{1,1}, \beta_{1,2}, \beta_{1,3}$	15, 15, 1
	$\beta_{2,1}, \beta_{2,2}, \beta_{2,3}$	15, 15, 1
III	$\beta_{1,1}, \beta_{1,2}, \beta_{1,3}$	5, 5, 1
	$\beta_{2,1}, \beta_{2,2}, \beta_{2,3}$	5, 5, 1
	$\beta_{3,1}, \beta_{3,2}, \beta_{3,3}$	5, 5, 1
IV	$\beta_{1,1}, \beta_{1,2}, \beta_{1,3}, \beta_{1,4}, \beta_{1,5}$	5, 5, 5, 5, 1
	$\beta_{2,1}, \beta_{2,2}, \beta_{2,3}, \beta_{2,4}, \beta_{2,5}$	5, 5, 5, 5, 1

Case I, II, IV는 두 개의 중계 경로를 가정하고, Case III은 세 개의 중계 경로를 가정한다. 그리고, Case I, II, III은 세 개의 홉을 가정하고, Case IV는 다섯 개의 홉을 가정한다. 실제 환경에서 평균 채널 전력은 통신 거리에 따른 경로 손실로 고려될 수 있으며[9,10], 따라서 평균 채널 전력과 통신 거리의 반비례 관계를 이용하여 노드간 평균 채널 전력값으로부터 노드간 상대적인 통신 거리를 추정할 수 있다. 그러므로, 모든 시뮬레이션 조건에서는 마지막 홉의 통신 거리가 다른 홉들에 비해 멀다고 할 수 있다. 특히, Case II는 마지막 홉의 통신 거리가 첫 번째 홉과 두 번째 홉의 통신 거리보다 상대적으로 매우 먼 경우를 나타낸다.

Case I과 III에서 가장 작은 평균 채널 전력을 갖는 세 번째 홉에 대한 상관관계는 $\lambda_{k,3}=0.71$ 이고, Case II에서 가장 작은 평균 채널 전력을 갖는 세 번째 홉에 대한 상관관계는 $\lambda_{k,3}=0.88$ 이며, Case IV에서 가장 작은 평균 채널 전력을 갖는 다섯 번째 홉에 대한 상관관계는 $\lambda_{k,5}=0.56$ 이다.

<그림 2>-<그림 4>에서는 네 가지 시뮬레이션 조건들에 대한 EPRS 기법과 BRS 기법의 아웃티지 확률을 보여준다. <그림 2>-<그림 4>로부터, 식(23) 으로부터 얻은 EPRS 기법에 대한 아웃티지 확률이 시뮬레이션 결과와 정확히 일치함을 확인할 수 있다. 모든 그림에서의 디코딩 후 전달 기반 BRS 기법에 대한 아웃티지 확률은 다음의 식의 시뮬레이션을 통해 얻어진다.

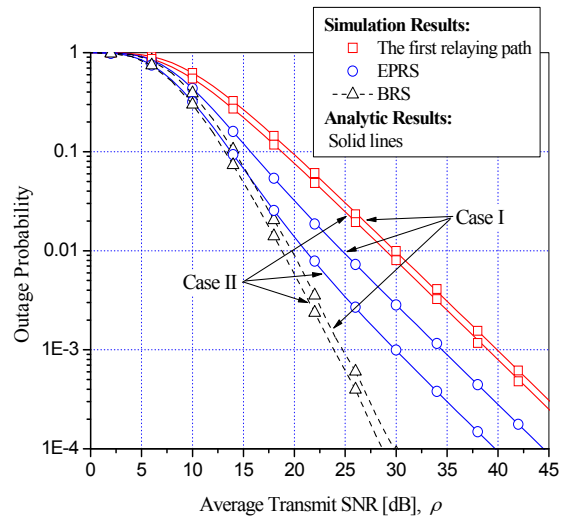
$$P_{out} = \Pr\{\max_{k=1, \dots, K}\{C_k^{DF}\} < R\} \quad (24)$$

식(24)와 같이, BRS 기법은 중계 경로 선택을 위하여 KN 개의 채널 정보를 필요로 한다. 그리고, 이것은 채널 정보의 피드백 오버헤드의 증가 및 중계 경로 선택 연산의 복잡도의 증가를 의미한다. 반면에, EPRS 기법은 식(1)과 같이 K 개의 채널 정보를 이용하여 중계 경로를 선택한다. 따라서, EPRS 기법은 BRS 기법보다 $1/N$ 배 만큼 적은 채널 정보의 피드백 오버헤드를 요구하며 중계 경로 선택 연산의 복잡도 또한 작다.

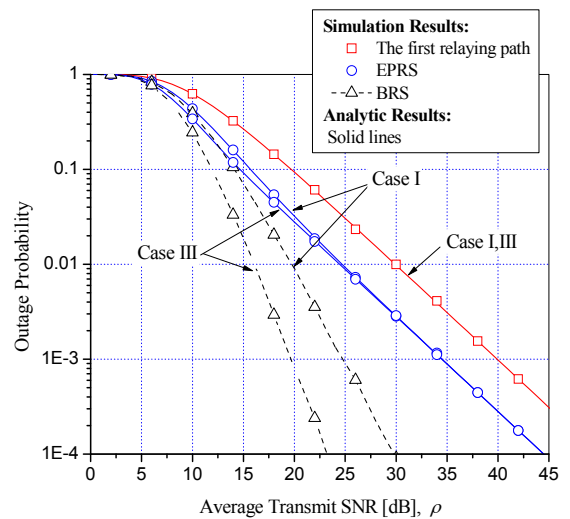
<그림 2>에서, Case I 보다 Case II 일 때 EPRS 기법의 아웃티지 성능은 BRS 기법의 아웃티지 성능에 더욱 근접한다. 또한, 첫 번째 중계 경로만을 이용하는 경우에 대한 아웃티지 성능과 비교할 때, Case I 보다 Case II에서 EPRS 기법의 성능 향상이 더욱 두드러진다. 그 이유는 Case I 보다 Case II에서 가장 작은 평균 채널 전력을 갖는 세 번째 홉에 대한 상관관계가 높기 때문이다. 그 상관관계는 가장 작은 평균 채널 전력과 그 외의 홉에 대한 평균 채널 전력의 차이가 클수록 증가한다. <그림 3>에서, Case I 보다 Case III 일 때 BRS 기법의 아웃티지 성능은 급격히 향상된다. 이는 중계 경로 개수의 증가로 다이버시티 이득이 증가했기 때문이다. 반면에, EPRS 기법의 아웃티지 성능은 중계 경로 개수에 영향을 크게 받지 않는다. <그림 4>에서, Case I 보다 Case IV 일 때 EPRS 기법과 BRS 기법의 아웃티지 성능 차이가 증가하고, EPRS 기법과 첫 번째 중계 경로만을 이용하는 경우에 대한 아웃

티지 성능 차이는 감소한다. 그 이유는, 홉 개수의 증가로 Case IV인 경우에 가장 작은 평균 채널 전력을 갖는 다섯 번째 홉에 대한 상관관계가 감소하기 때문이다.

<그림 2>-<그림 4>를 통해 식(18)에서 제공하는 가장 작은 평균 채널 전력을 갖는 홉에 대한 상관관계의 값이 EPRS 기법의 아웃티지 성능 이득과 비례함을 알 수 있다. 그리고, 그 상관관계는 가장

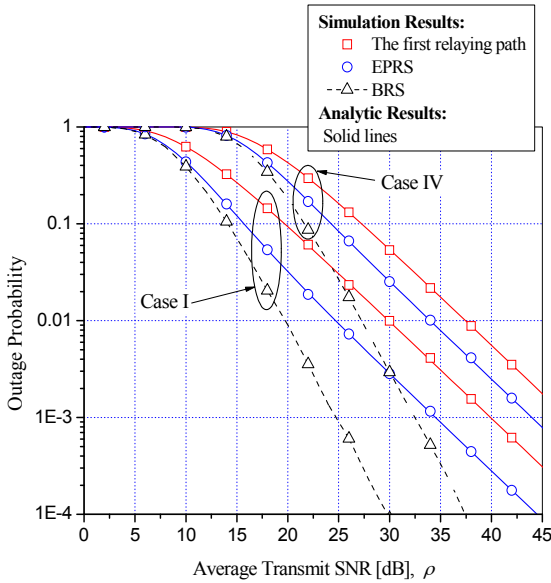


<그림 2> Case I과 Case II에 대한 아웃티지 확률 비교
(Fig. 2) Comparison of outage probabilities for Case I and Case II



<그림 3> Case I과 Case III에 대한 아웃티지 확률 비교
(Fig. 3) Comparison of outage probabilities for Case I and Case III

작은 평균 채널 전력과 그 외의 홉에 대한 평균 채널 전력의 차이가 클수록 증가하지만, 홉의 개수가 증가하면 그 상관관계는 감소한다. 여기서, 홉간의 평균 채널 전력 차이는 해당 홉들에 대한 통신 거리의 차이로 해석될 수 있다. 즉, 홉간의 평균 채널 전력 차이가 크다는 것은 해당 홉들에 대한 통신 거리의 차이가 크다고 할 수 있다.



〈그림 4〉 Case I과 Case IV에 대한 아웃티지 확률 비교
 〈Fig. 4〉 Comparison of outage probabilities for Case I and Case IV

VI. 결 론

본 논문에서는 다중 홉 시스템에서 디코딩 후 전달 기반 EPRS 기법에 대한 아웃티지 확률을 레일레이 페이딩 채널에서 분석하였다. 또한, 종단간 SNR과 각 홉의 SNR의 상관관계를 분석하여, EPRS 기법의 실효성을 증명하였다. 수치적 결과를 통해, 가장 작은 평균 채널 전력을 갖는 홉에 대한 상관관계의 값이 EPRS 기법의 아웃티지 성능 이득과 비례함을 확인하였고, 그 상관관계는 가장 작은 평균 채널 전력과 그 외의 홉에 대한 평균 채널 전력의 차이가 크고 홉의 개수가 작을 때 높음을 확인하였다. 실제 시스템에서 평균 채널 전력을 알고 있다면, 그 상관관계 값을 구하여 EPRS 기법의 사용

유무를 간단하게 결정할 수 있으며, 그 상관관계 값이 클 경우, EPRS 기법은 복잡한 BRS 기법과 근접한 성능을 제공할 수 있다.

참고문헌

- [1] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed, and A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 3, pp.659-672, Mar. 2006.
- [2] I. Krikidis, J. Thompson, S. McLaughlin, and N. Goertz, "Amplify-and-forward with partial relay selection," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no. 4, pp.235-237, Apr. 2008.
- [3] S.-I. Kim, Y.-C. Ko, and J. Heo, "Outage analysis of amplify-and-forward partial relay selection scheme with multiple interferers," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 12, pp.1281-1283, Dec. 2011.
- [4] C. Zhong, K.-K. Wong, S. Jin, M.-S. Alouini, and T. Ratnarajah, "Asymptotic analysis for Nakagami-m fading channels with relay selection," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Commun. (ICC)*, Kyoto, Japan, June 2011.
- [5] I.-H. Lee, "Outage performance of efficient partial relay selection in amplify-and-forward relaying systems over Rayleigh fading channels," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 10, pp.1644-1647, Oct. 2012.
- [6] I.-H. Lee, "Outage performance of partial relay selection in dual-hop decode-and-forward relaying systems," *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 11, no. 3, pp.40-47, June 2012.
- [7] M. O. Hasna and M.-S. Alouini, "Outage probability of multihop transmission over Nakagami fading channels," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 7, no. 5, pp.216-218, May 2003.
- [8] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th Ed.,

New York: McGraw-Hill, 2001.

- [9] V. Erceg, L. J. Greenstein, S. Y. Tjandra, S. R. Parkoff, A. Gupta, B. Kulic, A. A. Julius, and R. Bianchi, "An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 17, no. 7, pp.1205-1211, July 1999.
- [10] I.-H. Lee and D. Kim, "Probability of SNR gain by dual-hop relaying over single-hop transmission in SISO Rayleigh fading channels," IEEE Commun. Lett., vol. 12, no. 10, pp.734-736, Oct. 2008.

저자소개



이 인 호 (Lee, In-Ho)

2011년 3월 ~ 현 재 : 국립한경대학교 전기전자제어공학과 조교수
2010년 4월 ~ 2011년 3월 : 한양대학교 ERICA 부설연구소 공학기술연구소 박사후과정
2008년 9월 ~ 2010년 4월 : 삼성전자 DMC 연구소 책임연구원
2005년 3월 ~ 2008년 8월 : 한양대학교 전자전기제어계측공학과 박사 졸업
2003년 3월 ~ 2005년 2월 : 한양대학교 전자전기제어계측공학과 석사 졸업
1996년 3월 ~ 2003년 2월 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부 학사 졸업
E-mail : ihlee@hknu.ac.kr