

논문 2008-45TC-2-3

증폭 후 전달 릴레이 시스템을 위한 송신 Maximum-Ratio-Combining과 릴레이 선택 다이버시티에 대한 Outage 확률 분석

(Outage Probability of Transmit Maximum-Ratio-Combining and Relay
Selection Diversity for Amplify-and-Forward Relaying System)

민 현 기*, 이 성 은**, 홍 대 식***

(Hyunkee Min, Sungeun Lee, and Daesik Hong)

요 약

본 논문에서는 M 개의 전송 안테나를 가진 송신국 (source)이 단일 안테나를 가진 R 개의 릴레이 (relay)를 이용하여 단일 안테나를 가진 수신국 (destination)에 신호를 전송하는 증폭 후 전달 (amplify-and-forward, AF) 릴레이 시스템에서의 outage 확률 성능을 살펴본다. 이때, R 개의 릴레이 중에서 수신국에서의 수신 신호에 대한 가장 큰 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)를 보장하는 하나의 릴레이를 선택하는 최적 릴레이 선택 (best relay selection) 기법이 사용되고, 송신국과 선택된 릴레이 링크에서 송신 maximum-ratio-combining (transmit MRC)이 적용되었을 때의 AF 릴레이 시스템의 outage 확률을 분석한다. 또한, 분석의 타당성을 입증하기 위해 모의실험들을 제공한다.

Abstract

In this paper, we consider an amplifying-and-forward (AF) dual-hop relaying system where the source node transmits to a destination node with the help of R relay nodes. We assume that the source node equips M transmit antennas, but only one antenna is equipped at the each node of relay and destination. The outage probabilities are presented when the transmit maximum-ratio-combining (MRC) is used at the source-relay (S-R) links, and the best relay selection, which selects only one relay that contributes the most to the received signal-to-noise ratio (SNR) as active relay, is combined. Simulation results validate these analytical results.

Keywords : Amplifying-and-Forward, Transmit Maximum-Ratio-Combining, Best Relay Selection

I. 서 론

무선 통신에서 릴레이 (relay) 시스템은 송신단에서

큰 파워를 사용하지 않고도 통화 영역을 넓힐 수 있는 장점을 가지고 있다^[1~2]. 또한, 페이딩 채널에서 무선 통신의 용량과 신뢰성을 증대시킬 수 있는 협력 다이버시티를 위해 이용할 수 있다^[3~4]. 릴레이 시스템은 동작 방식에 따라 릴레이에서 수신 신호를 복호화하지 않고, 단순히 수신 신호의 파워만 증폭하여 다시 목적지로 전송하는 증폭 후 전달 (amplify-and-forward, AF) 릴레이 시스템과 수신 신호를 복호화하고 다시 변조하여 목적지로 전송하는 디코딩 후 전달 (decoded-and-forward, DF) 릴레이 시스템으로 구분할 수 있다. 이 중 AF 릴레이 시스템은 릴레이에서의 복호화가 필요 없으므로 릴레이를 하드웨어 측면에서 더 간단하게 구

* 학생회원, ** 정회원, *** 평생회원, 연세대학교
전기전자공학부

(Dept. of Electrical and Electronic Engin., Yonsei
University)

※ 본 과제(결과물)는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실 지원사업의 연구결과임.

※ 이 논문은 한국과학재단이 주관하는 국가지정연구실사업(NRL:R0A-2007-000-20043-0)의 지원을 받아 연구되었음.

접수일자: 2007년9월14일, 수정완료일: 2008년2월14일

성할 수 있다는 장점을 가진다^[4].

AF 릴레이 시스템에 대하여, Hasna는 송신국에서 하나의 릴레이를 이용하여 수신국으로 신호를 전송하는 시스템의 성능을 분석하였다^[1-2]. Laneman은 R 개의 릴레이와 송신국-수신국 (S-D) 링크의 직경로를 모두 이용하여 공간 시간 코딩 프로토콜 (space-time-coded protocol)을 구성하면 $(R+1)$ 차의 다이버시티 이득을 얻을 수 있음을 보였다^[4]. 그리고 Zhao는 송신국 및 릴레이가 사용할 수 있는 파워가 제한되어 있을 때에는 R 개의 릴레이 중 수신국에 최대의 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio, SNR)를 보장하는 단 하나의 릴레이만을 선택하여 사용하는 최적 릴레이 선택 (best relay selection) 기법을 적용하는 것이 R 개의 릴레이를 모두 사용하는 것보다 뛰어난 성능을 얻을 수 있음을 보였다^[6]. 위의 연구들은 송신국, 릴레이, 수신국이 모두 단일 안테나를 장비하고 있을 때의 성능 분석들이다. 그러나 각 노드들이 다중 안테나를 장비할 수 있다면, 더 큰 이득을 얻을 수 있다^[6]. 따라서 본 논문에서는 송신국이 다중 안테나를 장비할 수 있는 환경에서 AF 릴레이 시스템의 성능을 유도한다.

본 논문에서는 송신국이 R 개의 단순한 릴레이를 이용하여 수신국으로 신호를 전송하는 AF 릴레이 시스템을 고려한다. 이 때, 송신국은 하드웨어 측면에서 크기의 제한이 크지 않으므로 여러 개의 전송 안테나를 장비할 수 있고, 각각의 릴레이 및 수신국은 작은 사이즈를 유지하기 위하여 단일 안테나만 장비할 수 있다고 가정한다. 또한 릴레이는 통화 영역 중대 혹은 S-D 링크가 깊은 페이딩을 겪을 때 이를 극복하기 위하여 사용되므로, 직경로는 사용할 수 없다고 가정한다. 이러한 환경에서 릴레이를 거쳐 수신국으로 전송된 신호의 순시 SNR을 고려하여 최적 릴레이 선택 기법이 적용되고, 이와 함께 송신국과 선택된 릴레이 사이의 링크에 대한 송신 maximum-ratio-combining (transmit MRC)^[7]이 사용되었을 때의 outage 확률을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 분석하려는 릴레이 시스템의 모델을 설명한다. III장에서는 이 시스템의 outage 확률을 분석한다. IV장에서는 컴퓨터 모의실험을 바탕으로 분석의 타당성을 입증하고, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

전송 안테나가 M 개인 송신국이 단일 안테나를 가

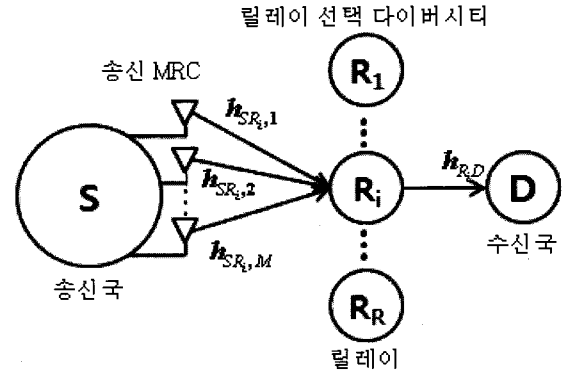


그림 1. $M-R-1$ 모바일 릴레이 시스템 모델

Fig. 1. The system model of $M-R-1$ mobile relaying system.

진 R 개의 릴레이를 이용하여 단일 안테나를 가진 하나의 수신국에 신호를 전송하는 AF 릴레이 시스템을 고려한다. 본 논문에서는 이 시스템을 $M-R-1$ 시스템이라 정의하며, M 은 송신국의 전송 안테나의 개수, R 은 릴레이의 개수, 1은 수신국의 개수를 각각 의미하며 그림 1과 같이 표현할 수 있다.

$R=1$ 의 경우 (즉, $M-1-1$), 송신국-릴레이 (S-R) 링크의 채널 상태 정보를 송신국이 모두 알고 있다고 가정하고, 송신국에서 릴레이로 전송을 할 때 송신 MRC를 사용한다. 그리고 릴레이는 수신 신호를 단순히 증폭만 하여 수신국으로 다시 전송한다. 이 때, 수신국에서 수신 SNR은 아래와 같이 표현할 수 있다^[1].

$$\gamma_{eq}^{(M-1-1)} = \frac{\frac{h_{SR}^H h_{SR} E_S |h_{RD}|^2 E_R}{N_{SR} N_{RD}}}{\frac{h_{SR}^H h_{SR} E_S}{N_{SR}} + \frac{|h_{RD}|^2 E_R}{N_{RD}} + 1} \quad (1)$$

여기서 $h_{SR} = [h_{SR,1}, h_{SR,2}, \dots, h_{SR,M}]$ 과 h_{RD} 는 각각 S-R 및 릴레이-수신국 (R-D) 링크의 독립적이고 동일한 복소 가우시안 분포를 가지는 채널 계수이다. E_S 와 E_R 는 각각 송신국과 릴레이의 평균 전송 에너지이다. N_{SR} 와 N_{RD} 는 각각 해당하는 채널에 대한 부가 백색 가우스 잡음 (additive white Gaussian noise, AWGN)의 평균 파워이다.

$M-R-1$ 시스템의 경우, R 개의 릴레이 후보 중에서 수신국에서의 수신 SNR을 최대로 만들어 주는 릴레이만을 선택하고, 선택된 릴레이와 송신국 사이의 채널을 고려하여 송신 MRC를 이용한다. 수신국에서의 수신 SNR은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\gamma_{eq}^{(M-R-1)} = \max_i \frac{\frac{h_{SR_i}^H h_{SR_i} E_S |h_{R,D}|^2 E_R}{N_{SR_i} N_{R,D}}}{\frac{h_{SR_i}^H h_{SR_i} E_S |h_{R,D}|^2 E_R}{N_{SR_i}} + \frac{|h_{R,D}|^2 E_R}{N_{R,D}} + 1} \quad (2)$$

III. Outage 확률 분석

1. M-1-1 시스템의 Outage 확률

이번 장에서는 M-1-1 시스템의 outage 확률을 유도하기 위해 먼저 수신국에서의 수신 SNR의 확률 누적 분포 함수 (cumulative distribution function, cdf)를 유도하고, outage 확률과 수신 SNR의 확률 누적 분포 함수와의 관계를 이용한다. 먼저 송신국과 릴레이는 동일한 전송 파워를 사용한다고 가정한다. 따라서 모든 링크의 평균 SNR은 균일하다. 즉, 아래의 수식이 성립한다.

$$\frac{E_S}{N_{SR}} = \frac{E_R}{N_{RD}} = \bar{\gamma} \quad (3)$$

여기서 $\bar{\gamma}$ 는 홉 당 평균 SNR을 의미한다. (3)을 (1)에 대입하고 높은 SNR에서의 근사화^[1]를 이용하면 $\gamma_{eq}^{(M-1-1)}$ 은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \gamma_{eq}^{(M-1-1)} &\approx \frac{(h_{SR}^H h_{SR} \bar{\gamma})(|h_{RD}|^2 \bar{\gamma})}{h_{SR}^H h_{SR} \bar{\gamma} + |h_{RD}|^2 \bar{\gamma}} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{h_{SR}^H h_{SR} \bar{\gamma}} + \frac{1}{|h_{RD}|^2 \bar{\gamma}}} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 각각의 채널 계수는 $CN(0,1)$ 형태로 나타나고, 따라서 $x_1 = h_{SR}^H h_{SR}$ 은 감마 분포를 따르며 x_1 의 확률 밀도 함수 (probability density function, pdf)는

$f_{X_1}(x) = \frac{x^{M-1}}{\Gamma(M)} \exp(-x) U(x)$ 이다. 여기서 $U(\cdot)$ 은 단위 계단 함수 (unit step function)를 의미한다. 그리고 $y_1 = |h_{RD}|^2$ 은 지수 분포를 따르고, y_1 의 pdf는 $f_{Y_1}(y) = \exp(-y) U(y)$ 이다.

$\gamma_{eq}^{(M-1-1)}$ 의 cdf를 유도하기 위하여 먼저 $x = \frac{1}{h_{SR}^H h_{SR} \bar{\gamma}}$, $y = \frac{1}{|h_{RD}|^2 \bar{\gamma}}$ 로 둔다. 이 때, x 와 y 의 pdf는 x_1 과 y_1 의 pdf로부터 [10, 식. (5-18)]과 [10, 식.

(5-20)]을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_X(x) = \frac{x^{-M-1}}{\Gamma(M)(\bar{\gamma})^M} \exp\left(-\frac{1}{\bar{\gamma}x}\right) U(x) \quad (5)$$

$$f_Y(y) = \frac{1}{\bar{\gamma}y^2} \exp\left(-\frac{1}{\bar{\gamma}y}\right) U(y) \quad (6)$$

이 때, x 와 y 의 모멘트 생성 함수 (moment generating function, MGF)는 [8, 식. (3.471.9)]와 [8, 식. (8.486.16)]을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M_X(s) = \frac{2}{\Gamma(M)} (\sqrt{\beta s})^M K_M(2\sqrt{\beta s}) \quad (7)$$

$$M_Y(s) = 2(\sqrt{\beta s}) K_1(2\sqrt{\beta s}) \quad (8)$$

여기서 $K_v(\cdot)$ 는 v 차의 2종 변형된 베셀 함수이고, $\beta = 1/\bar{\gamma}$ 이다. x 와 y 는 서로 독립적이므로, $z = x + y$ 에 대한 MGF는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$M_Z(s) = M_X(s)M_Y(s) = \frac{4}{\Gamma(M)} (\sqrt{\beta s})^{M+1} \times K_M(2\sqrt{\beta s}) K_1(2\sqrt{\beta s}) \quad (9)$$

이 때, $\gamma_{eq}^{(M-1-1)} = 1/z$ 이므로, M-1-1 시스템의 수신 SNR의 cdf와 z 의 cdf는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{eq}^{(M-1-1)}}(\gamma) &= \Pr(\gamma_{eq}^{(M-1-1)} < \gamma) \\ &= \Pr\left(\frac{1}{\gamma_{eq}^{(M-1-1)}} > \frac{1}{\gamma}\right) = \Pr\left(z > \frac{1}{\gamma}\right) \\ &= 1 - \Pr\left(z < \frac{1}{\gamma}\right) = 1 - F_Z\left(\frac{1}{\gamma}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

라플라스 변환의 미분 특성을 이용하면, $F_Z(z)$ 를 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_Z(z) &= L^{-1}\left(\frac{M_Z(s)}{s}\right) \\ &= L^{-1}\left(\frac{4\beta^{\frac{M+1}{2}} s^{\frac{M-1}{2}}}{\Gamma(M)} K_M(2\sqrt{\beta s}) K_1(2\sqrt{\beta s})\right) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $L^{-1}\{\cdot\}$ 는 라플라스 역변환을 의미한다. (11)을 (10)에 대입하면 $F_{\gamma_{eq}^{(M-1-1)}}(\gamma)$ 를 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$F_{\gamma_{eq}}^{(M-1-1)}(\gamma) = 1 - L^{-1} \left(\frac{4}{\Gamma(M-1)} \beta^{\frac{M}{2}} s^{\frac{M-2}{2}} K_{M-1}(2\sqrt{\beta s}) K_1(2\sqrt{\beta s}) \right) \Bigg|_{z=\frac{1}{\gamma}} \quad (13)$$

$$- L^{-1} \left(\frac{4}{\Gamma(M)} \beta^{\frac{M+1}{2}} s^{\frac{M-1}{2}} K_{M-2}(2\sqrt{\beta s}) K_1(2\sqrt{\beta s}) \right) \Bigg|_{z=\frac{1}{\gamma}}$$

$$F_{\gamma_{eq}}^{(M-1-1)}(\gamma) = F_{\gamma_{eq}}^{((M-1)-1-1)}(\gamma) - L^{-1} \left(\frac{4}{\Gamma(M)} \beta^{\frac{M+1}{2}} s^{\frac{M-1}{2}} K_{M-2}(2\sqrt{\beta s}) K_1(2\sqrt{\beta s}) \right) \Bigg|_{z=\frac{1}{\gamma}} \quad (14)$$

$$F_{\gamma_{eq}}^{(M-1-1)}(\gamma) = 1 - \frac{4}{\Gamma(M)} \times$$

$$L^{-1} \left(\beta^{\frac{M+1}{2}} s^{\frac{M-1}{2}} K_M(2\sqrt{\beta s}) K_1(2\sqrt{\beta s}) \right) \Bigg|_{z=\frac{1}{\gamma}} \quad (12)$$

그리고 [8, 식 (8.486.17)]에 주어진 $K_{v+1}(z) = \frac{2v}{z} K_v(z) + K_{v-1}(z)$ 인 관계를 이용하면 (12)는 (13) 같이 표현할 수 있다. (13)에서 오른쪽의 첫 2개의 항은 (12)와 비교해보면 $(M-1)-1-1$ 시스템의 수신 SNR의 cdf임을 알 수 있다. 따라서 $F_{\gamma_{eq}}^{((M-1)-1-1)}(\gamma)$ 을 $(M-1)-1-1$ 시스템의 수신 SNR의 cdf라고 할 때, $F_{\gamma_{eq}}^{(M-1-1)}(\gamma)$ 은 (14)와 같이 표현할 수 있다.

잡음 제한적인 (noise limited) 시스템에서 outage 확률은 수신 신호의 순시 SNR γ 가 미리 정해진 임의의 문턱값인 γ_{th} 보다 작을 확률을 의미한다. 즉, 아래의 수식이 outage 확률을 의미한다.

$$P_{out} = \Pr[\gamma < \gamma_{th}] = \int_0^{\gamma_{th}} \Pr[\gamma] d\gamma = F_{\gamma}(\gamma_{th}) \quad (15)$$

따라서 (14)를 (15)에 대입하면, $M-1-1$ 시스템의 outage 확률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{out}^{(M-1-1)} = P_{out}^{((M-1)-1-1)} - \frac{4}{\Gamma(M)} \times$$

$$L^{-1} \left(\beta^{\frac{M+1}{2}} s^{\frac{M-1}{2}} K_{M-2}(2\sqrt{\beta s}) K_1(2\sqrt{\beta s}) \right) \Bigg|_{z=\frac{1}{\gamma_{th}}} \quad (16)$$

이 결과로부터 $M-1-1$ 시스템의 outage 확률은 $(M-1)-1-1$ 시스템의 outage 확률과 안테나의 증가로 인한 outage 확률의 감소량으로 표현될 수 있음을 알 수 있다. 따라서 송신국의 전송 안테나가 증가할 때

마다 outage 확률이 감소하는 이득이 있다.

2. $M-R-1$ 시스템의 Outage 확률

여러 개의 릴레이 중에서 i 번째를 이용하여 신호가 전송되었을 때의 수신 SNR을 γ_{eq, R_i} 라고 한다면 (2)에서 표현된 $M-R-1$ 시스템의 수신 SNR은 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\gamma_{eq}^{(M-R-1)} = \max_i \{ \gamma_{eq, R_1}, \gamma_{eq, R_2}, \dots, \gamma_{eq, R_R} \} \quad (17)$$

그리고 [10, 식. (6.78)]을 이용하면, $\gamma_{eq}^{(M-R-1)}$ 의 cdf는

$$F_{\gamma_{eq}}^{(M-R-1)}(\gamma) = F_{\gamma_{eq, R_1}}(\gamma) \cdot F_{\gamma_{eq, R_2}}(\gamma) \cdot \dots \cdot F_{\gamma_{eq, R_R}}(\gamma) \quad (18)$$

이다. 또한 각 링크의 채널이 독립적이고 동일한 분포를 가지고, 각 링크의 평균 SNR이 균일하다고 가정하면, 각각의 γ_{eq, R_i} 에 대한 cdf는 $M-1-1$ 시스템의 수신 SNR의 cdf와 같은 통계적 특성을 따르기 때문에 $F_{\gamma_{eq}}^{(M-R-1)}(\gamma)$ 은

$$F_{\gamma_{eq}}^{(M-R-1)}(\gamma) = [F_{\gamma_{eq}}^{(M-1-1)}(\gamma)]^R \quad (19)$$

이다. 그리고 (19)를 (15)에 대입하면,

$$P_{out}^{(M-R-1)} = [P_{out}^{(M-1-1)}]^R \quad (20)$$

이다. 따라서 $M-R-1$ 은 최적 릴레이 선택 기법을 통하여 $M-1-1$ 시스템에 대하여 R 배의 다이버시티 이득을 얻을 수 있다.

IV. 실험 결과

이번 장에서는 컴퓨터 모의실험을 통해서 $M-1-1$ 및 $M-R-1$ 시스템의 outage 확률 성능을 검증한다.

그림 2는 전송 안테나의 수에 따른 outage 확률 성능을 보기 위해 모의실험을 통해 $M-1-1$ 시스템의 outage 확률을 그린 것이다. x 축은 홉 당 평균 SNR을 문턱값으로 정규화한 $\bar{\gamma}/\gamma_{th}$ 이고 y 축은 outage 확률이다. 그림에서 원하는 outage 확률을 보장하려 할 때, 송신국의 전송 안테나 수인 M 을 1에서 2로 증가시키면 약 3dB의 SNR 이득이 발생한다. 또한, M 을 1에서 2, 3, 4로 증가 시킬 때, 낮은 SNR에서는 outage 확률 성능이 개선된다. 이는 III장 1절에서 언급한바와 같이 M 을 증가시킬 때 발생하는 outage 확률의 감소 때문이다. 그러나 높은 SNR에서는 M 을 3 이상으로 증가시켜도 $M=2$ 일 때의 성능보다 큰 이득을 얻지 못한다. 따라서 높은 SNR이 보장될 경우, 전송 안테나를 3 개 이상 사용하는 것은 복잡도의 증가에 비해 얻어지는 성능 개선 효과가 거의 없다.

그림 3에서는 릴레이 수의 증가에 따른 outage 확률 성능을 관찰하기 위해 $1-R-1$ 시스템과 $2-R-1$ 시스템의 outage 확률을 비교하고 있다. 그림을 통해 $1-1-1$ 시스템에서 $1-2-1$ 시스템으로 릴레이 후보가 1 개에서 2 개로 증가하게 되면 최적 릴레이 선택 기법에 의하여 다이버시티 이득이 1에서 2로 증가함을 확인할 수 있다. 이는 $2-1-1$ 시스템과 $2-2-1$ 시스템의 경우에도 마찬가지이다. 3.2절에서 언급한 바와 같이 최적 릴레이 선택 기법이 적용되었을 때의 다이버시티 이득은 M 과 관계없이 릴레이 후보의 개수인 R 에 의하여 결정되기 때문이다. 그리고 $1-R-1$ 시스템과 $2-R-1$ 시스템의 outage 확률

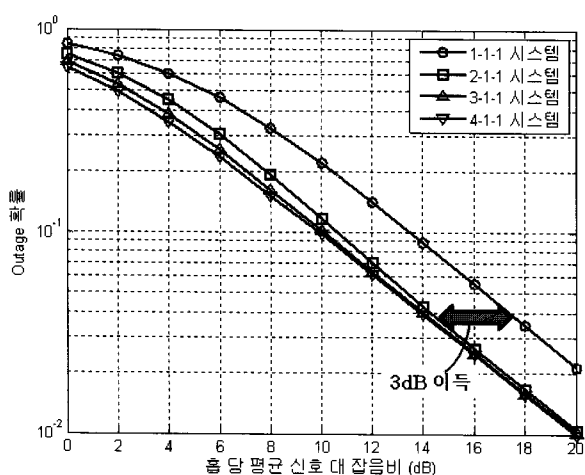


그림 2. $\gamma_{th} = 0\text{dB}$ 일 때의 홉 당 평균 신호 대 잡음비에 따른 $M-1-1$ 시스템의 outage 확률
Fig. 2. Outage probability of $M-1-1$ system. ($\gamma_{th} = 0\text{dB}$)

을 비교해보면, $2-R-1$ 시스템은 송신국의 다중 전송 안테나에 의한 효과로 인해 $1-R-1$ 시스템보다 약 3dB의 SNR 이득도 동시에 얻을 수 있음을 관찰할 수 있다.

위의 결과들은 $M-R-1$ 시스템에서 S-R 링크에서의 송신 MRC와 최적 릴레이 선택 기법이 동시에 적용될 때, 송신국에서 전송 안테나를 $M=2$ 로 증가시키면 $M=1$ 일 때보다 약 3dB의 SNR 이득이 발생하지만, 높은 SNR에서 M 을 3 이상으로 증가시켜도 $M=2$ 일 때의 성능보다 이득이 크지 않음을 보여준다. 그리고 $M-R-1$ 시스템은 릴레이 선택 다이버시티에 의해 $M-1-1$ 시스템보다 R 배의 다이버시티 이득을 얻을 수 있음을 보여준다.

IV. 결 론

본 논문에서는 $M-R-1$ AF 릴레이 시스템에 대하여 outage 확률 성능에 대하여 분석하였다. 분석을 통해 S-R 링크에서 송신 MRC가 적용될 때, $M-1-1$ 시스템의 outage 확률을 $(M-1)-1-1$ 시스템의 outage 확률과 추가적인 outage 확률의 감소량으로 표현하였다. 그리고 $M-R-1$ 시스템에서 최적 릴레이 선택 기법이 적용될 때, $M-R-1$ 시스템은 $M-1-1$ 시스템의 다이버시티 이득보다 R 배의 다이버시티 이득을 얻을 수 있음을 보였다. 모의실험 결과를 통해 이를 입증하였으며, 송신국의 전송 안테나 수를 1에서 2로 증가

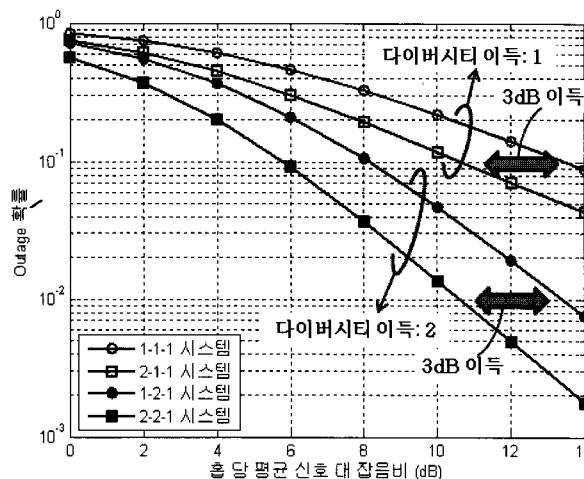


그림 3. $\gamma_{th} = 0\text{dB}$ 일 때의 홉 당 평균 신호 대 잡음비에 따른 $1-R-1$ 시스템과 $2-R-1$ 시스템의 outage 확률 비교
Fig. 3. Comparison of outage probabilities between $1-R-1$ and $2-R-1$ systems. ($\gamma_{th} = 0\text{dB}$)

시키면 $M-R-1$ 시스템은 약 3dB의 SNR 이득을 얻을 수 있음을 보였다. 그리고 전송 안테나 수를 3 이상으로 증가시키면, 낮은 SNR에서는 약간의 SNR 이득을 얻을 수 있지만 높은 SNR에서는 $M=2$ 에 비하여 큰 이득이 없음을 확인하였다.

참고 문헌

[1] M. O. Hasna and M. S. Alouini, "End-to-End Performance of Transmission Systems with Relays Over Rayleigh-Fading Channels," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 2, no. 6, pp. 1126-1131, Nov. 2003.

[2] M. O. Hasna and M. S. Alouini, "Harmonic Mean and End-to-End Performance of Transmission Systems With Relays," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 52, no. 1, pp. 130-135, Jan. 2004.

[3] Jemin Lee, Sungsoo Park, Hano Wang, and Daesik Hong, "QoS-guaranteed Transmission Scheme Selection for OFDMA Multi-hop Cellular Networks", *IEEE ICC'07*, pp. 4587 - 4591, 24-28 June 2007.

[4] J. N. Laneman and G. W. Wornell, "Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, pp. 2415-2425, Nov. 2003.

[5] Yi Zhao, Raviraj Adve, and Teng Joon Lim, "Symbol Error Rate of Selection Amplify-and-Forward Relay Systems," *IEEE Commun. Letters*, vol. 10, no. 11, pp. 757-759, Nov. 2006.

[6] B. Wang, J. Zhang, and A. Host-Madsen, "On the capacity of MIMO relay channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 51, pp. 29-43, Jan. 2005.

[7] M. Gudmundson, "Maximum Ratio Transmission," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 47, pp.1458-1461, Oct. 1999.

[8] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*, 6th ed. San Diego, CA: Academic, 2000.

[9] A. Erdelyi, W. Magnus, F. Oberhettinger, and F. Tricomi, *Table of Integral Transforms*, New York: McGraw-Hill, 1954, vol. 1.

[10] A. Papoulis and S. U. Pillai, *Probability, Random Variables and Stochastic Process*, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

저 자 소 개



민 현 기(학생회원)
 2005년 연세대학교 전기전자 공학과 학사 졸업.
 2007년 연세대학교 전기전자 공학과 석사 졸업.
 2007년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사 과정
 <주관심분야 : 이동통신시스템, OFDM, MIMO, 멀티홉 시스템>



이 성 은(정회원)
 2002년 연세대학교 전기전자 공학과 학사 졸업.
 2004년 연세대학교 전기전자 공학과 석사 졸업
 2004년~현재 연세대학교 전기 전자공학과 박사 과정.
 <주관심분야 : 이동통신시스템, MIMO, 다중 반송파 시스템, 멀티홉 시스템>



홍 대 식(평생회원)
 1990년 Purdue University Electrical Engineering 박사 졸업
 1991년~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수
 <주관심분야 : 디지털통신, 통신신호처리, 4G시스템, OFDM, 멀티홉 시스템>