

## 무선 중계 시스템에서 선택적 MIMO 전송에 대한 아웃티지 성능 연구

이인호\*

### Outage Performance Study of Selective MIMO Transmission in Wireless Relaying Systems

In-Ho Lee\*

Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

#### 요 약

본 논문에서는 듀얼 홉 multiple-input multiple-output(MIMO) 중계 시스템에서 직교시공간블록코드 전송과 송신 안테나 선택 전송을 선택적으로 이용하는 선택적 MIMO 전송 기술을 제안한다. 독립적인 레일레이 페이딩 채널을 가정하여 선택적 MIMO 전송 기술 기반의 디코딩 후 전달 중계 시스템에 대한 아웃티지 확률을 분석하고, 수치적 결과들을 통해 직교시공간블록코드 전송 또는 송신안테나 선택 전송을 모든 홉에서 동일하게 이용하는 기존 시스템과 아웃티지 성능을 비교한다. 또한, 성능 비교를 통해 제안 기술이 아웃티지 성능의 저하 없이 시스템 오버헤드를 감소시킬 수 있음을 보인다.

#### ABSTRACT

In this paper, a selective multiple-input multiple-output(MIMO) transmission scheme is proposed in dual-hop MIMO relaying systems, in which orthogonal space-time block code(OSTBC) transmission and transmit antenna selection(TxAS) transmission are selectively used. Assuming independent Rayleigh fading channels, the outage probability is analyzed for a decode-and-forward(DF) relaying system using the selective MIMO transmission scheme. Also, through numerical investigation, the outage performance for the DF relaying system using the selective MIMO transmission scheme is compared with that for the conventional DF relaying system using OSTBC or TxAS. Moreover, from the performance comparison, it is shown that the proposed scheme can reduce the system overhead without outage performance degradation.

**키워드** : 듀얼 홉 중계 시스템, MIMO 전송, 시공간블록코드, 안테나선택, 아웃티지 확률

**Key word** : Dual-hop relaying system, MIMO transmission, Space-time block code, Antenna selection, Outage probability

접수일자 : 2013. 06. 08 심사완료일자 : 2013. 07. 13 게재확정일자 : 2013. 07. 26

\* **Corresponding Author** In-Ho Lee (E-mail:ihlee@hknu.ac.kr, Tel:+82-31-670-5197)

Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

**Open Access** <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.10.2259>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서론

무선 중계 시스템에서는 소스 노드와 목적지 노드 사이에 위치한 중계 노드가 소스 노드의 신호를 수신하여 목적지 노드로 전달한다[1]. 이 같은 무선 중계 시스템은 소스 노드와 목적지 노드간 통신거리가 먼 경우에 경로손실의 영향을 감소시킬 수 있고, 장애물로 인한 소스 노드와 목적지 노드간 통신두절을 해결할 수 있다.

무선 중계 시스템의 링크 성능을 개선하기 위하여 다중 안테나 노드를 가정한 multiple-input multiple-output (MIMO) 전송 기술이 연구되어 왔다[2-4]. MIMO 전송 기술로는 최대 공간 다이버시티 이득을 제공하는 직교시공간블록코드 전송[2,3]과 송신안테나 선택 전송[4]이 고려되어 왔다. 직교시공간블록코드 전송은 [5]에서 제시하는 정해진 코드를 이용하여 신호를 전송하며 송신기는 수신기로부터 피드백 정보를 요구하지 않는다. 반면에, 송신안테나 선택 전송은 송신기에서 최대 채널 전력을 제공하는 송신안테나를 선택해야 하므로 수신기로부터 최대 채널 전력을 제공하는 송신안테나 정보를 받아야 한다. 따라서, 피드백 오버헤드 측면에서는 직교시공간블록코드 전송이 송신안테나 선택 전송 보다 우수하다. 그러나, 링크 성능 측면에서는 송신안테나 선택 전송이 직교시공간블록코드 전송 보다 우수하다. 그 이유는 직교시공간블록코드 전송은 모든 송신안테나에 송신전력을 분산시켜 신호를 전송하는 반면에 송신안테나 선택 전송은 최대 채널 전력을 제공하는 하나의 송신안테나에 송신전력을 집중하여 신호를 전송하기 때문이다.

지금까지 무선 중계 시스템에서 MIMO 전송 기술 연구는 모든 홉에서 동일한 MIMO 전송을 가정하였다 [2-4]. 그러나, 무선 중계 시스템에서의 종단간 성능은 홉들 중에 가장 나쁜 성능을 갖는 홉의 성능에 지배적이기 때문에[6,7], 모든 홉에 대해 동일한 MIMO 전송을 이용하기 보다는 각 홉에 대한 성능을 고려한 선택적인 MIMO 전송이 효율적이다. 따라서, 본 논문에서는 듀얼 홉 중계 시스템을 가정하여 첫 번째 홉과 두 번째 홉에 대한 평균 채널 전력을 비교하여 낮은 평균 채널 전력을 갖는 홉에서는 링크 성능 개선을 위하여 송신안테나 선택 전송을 이용하고 상대적으로 높은 평균 채널 전력을 갖는 홉에서는 피드백 오버헤드 관점에서

이득이 되는 직교시공간블록코드 전송을 이용하는 선택적 MIMO 전송 기술을 제안한다. 여기서, 소스 노드에서 MIMO 전송의 선택을 위하여 이용되는 평균 채널 전력 정보는 시간에 따른 변화가 작으므로 추가적인 피드백 오버헤드는 무시할 수 있다.

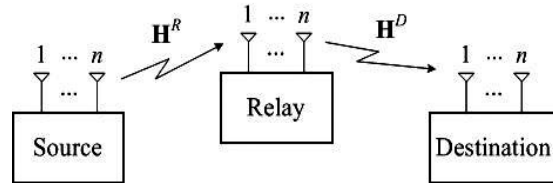


그림 1. 정보통신망 흐름도 듀얼 홉 MIMO 중계 시스템  
Fig. 1 Dual-hop MIMO relaying system

본 논문에서는 디코딩 후 전달 중계 방식을 이용하는 듀얼 홉 중계 시스템에서 레일레이가 페이딩 채널을 가정하여 제안한 선택적 MIMO 전송 기술의 아웃티지 확률을 분석하고, 수치적 결과를 통해 직교시공간블록코드 전송 또는 송신안테나 선택 전송을 모든 홉에서 동일하게 이용하는 기존 시스템과 성능을 비교한다.

## II. 시스템 모델

그림 1과 같이, 하나의 소스 노드, 하나의 중계 노드, 하나의 목적지 노드로 구성된 듀얼 홉 중계 시스템을 고려한다. 여기서, 각 노드는  $n$ 개의 송수신안테나를 갖고 있고, 소스 노드와 목적지 노드간 직접 통신은 불가능하다고 가정한다. 본 논문에서는 중계 방식으로 디코딩 후 전달 중계 방식을 이용한다. 따라서, 중계 노드는 소스 노드로부터 수신한 신호를 디코딩한 후 그 디코딩된 신호를 다시 인코딩하여 목적지 노드로 전달한다.

본 논문에서는 MIMO 전송 기술로 직교시공간블록코드 전송과 송신안테나 선택 전송을 고려한다. 직교시공간블록코드 전송을 이용할 경우, 송신 노드는 미리 정해진 직교시공간블록코드[5]를 이용하여 수신 노드로 신호를 전송하고, 수신 노드는 이 신호를 [8]의 방법으로 디코딩한다. 반면에, 송신안테나 선택 전송을 이용할 경우, 송신 노드는 최대 채널 전력을 제공하는 하나의 송신안테나를 이용하여 신호를 수신 노드로 전송

하고, 수신 노드는 이 신호를 디코딩한다. 만일, 수신 노드가 중계 노드일 경우, 디코딩된 신호를 다시 인코딩하여 직교시공간블록코드 전송 또는 송신안테나 선택 전송을 이용하여 목적지 노드로 전달한다.

본 논문에서는 무선 중계 시스템에서의 종단간 성능이 홉들 중에 가장 나쁜 성능을 갖는 홉의 성능에 의해 결정됨[6,7]을 이용하여 각 홉에 대한 성능을 고려한 선택적 MIMO 전송 기술을 제안한다. 선택적 MIMO 전송 기술 기반의 듀얼 홉 중계 시스템에서는 소스 노드가 첫 번째 홉과 두 번째 홉의 평균 채널 전력을 비교하여 평균 채널 전력이 작은 홉에는 링크 성능 개선을 위하여 송신안테나 선택 전송을 지정하고, 평균 채널 전력이 큰 홉에는 피드백 오버헤드를 요구하지 않는 직교시공간블록코드 전송을 지정한다. 여기서, 평균 채널 전력은 시간에 따른 변화가 작으므로, 첫 번째 홉과 두 번째 홉의 평균 채널 전력 정보를 소스 노드로 피드백할 때 요구되는 오버헤드는 무시할 수 있다.

그림 1과 같이, 소스 노드와 중계 노드간 채널 행렬을  $\mathbf{H}^R = \{h_{ij}^R\}_{n \times n}$  라 하고, 중계 노드와 목적지 노드간 채널 행렬을  $\mathbf{H}^D = \{h_{ij}^D\}_{n \times n}$  라 한다. 여기서,  $h_{ij}^R$  와  $h_{ij}^D$  는 첫 번째 홉과 두 번째 홉에서의 j번째 송신안테나와 i번째 수신안테나간 복소 채널 계수를 각각 의미하며, 각 채널들은 독립적인 레일리 분포를 따른다. 따라서, 채널 전력인  $|h_{ij}^R|^2$  와  $|h_{ij}^D|^2$  은 각각 평균 채널 전력  $\beta^R$  과  $\beta^D$  를 갖는 지수 분포를 따른다. 여기서, 첫 번째 홉에 대한 평균 채널 전력은 모든 송수신안테나 쌍에 대해  $\beta^R$  으로 같고, 두 번째 홉에 대한 평균 채널 전력은 모든 송수신안테나 쌍에 대해  $\beta^D$  으로 같다. 본 논문에서는  $\beta^R$  와  $\beta^D$  가 같지 않다고 가정한다.

### III. 아웃티지 확률 분석

모든 송신 노드에서의 송신 전력은 P로 동일하고, 모든 수신 노드에서의 잡음 전력은  $\sigma^2$ 으로 동일하다고 가정한다.

첫 번째 홉과 두 번째 홉에서 직교시공간블록코드 전송이 이용될 경우, 각 홉에 대한 신호 대 잡음비는 다음과 같이 주어진다[2].

$$\gamma_{ST}^R = \frac{\rho}{nR_c} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n |h_{ij}^R|^2 \quad (1)$$

$$\gamma_{ST}^D = \frac{\rho}{nR_c} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n |h_{ij}^D|^2 \quad (2)$$

여기서,  $\rho = P/\sigma^2$  이고,  $R_c$ 는 직교시공간블록코드의 코드율을 의미한다.  $n=2$ 일 때,  $R_c=1$ 이고,  $n=3,4$ 일 때,  $R_c=3/4$ 이다[5].

첫 번째 홉과 두 번째 홉에서 송신안테나 선택 전송이 이용될 경우, 각 홉에 대한 신호 대 잡음비는 다음과 같이 주어진다[4].

$$\gamma_{AS}^R = \max_{j=1, \dots, n} \sum_{i=1}^n \rho |h_{ij}^R|^2 \quad (3)$$

$$\gamma_{AS}^D = \max_{j=1, \dots, n} \sum_{i=1}^n \rho |h_{ij}^D|^2 \quad (4)$$

여기서, 최대비율결합 방식[9]이 수신 노드에서 이용되었다.

식(1)-(4)를 [6]의 식(15)에 적용하여, 제안하는 선택적 MIMO 전송 기술 기반의 디코딩 후 전달 중계 시스템에 대한 종단간 용량을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C^{SA} = \frac{1}{2} \min \{ R_c \log_2(1 + \gamma_{ST}^R), \log_2(1 + \gamma_{AS}^D) \}, \quad \beta^R > \beta^D \quad (5)$$

$$C^{SA} = \frac{1}{2} \min \{ \log_2(1 + \gamma_{AS}^R), R_c \log_2(1 + \gamma_{ST}^D) \}, \quad \beta^R < \beta^D \quad (6)$$

여기서, 직교시공간블록코드 전송에 대한 용량은 [10]로부터 주어진다.

종단간 용량이 목표 용량 보다 낮은 확률을 아웃티지 확률이라고 정의하고, 식(5)와 식(6)을 이용하여 선택적 MIMO 전송 기술 기반의 디코딩 후 전달 중계 시스템에 대한 아웃티지 확률을 다음과 같이 표현한다.

$$O^{SA} = \Pr \{ C^{SA} < R_{th} \} \quad (7)$$

여기서,  $R_{th}$ 는 목표 용량을 의미하고 단위는 bps/Hz이다.  $\beta^R > \beta^D$ 일 때, 식(5)를 식(7)에 대입하여 아웃티지 확률을 다음과 같이 얻는다.

$$\begin{aligned}
 O^{SA} &= \Pr\left\{\frac{1}{2} \min\{R_c \log_2(1 + \gamma_{ST}^R), \right. \\
 &\quad \left. \log_2(1 + \gamma_{AS}^D)\} < R_{th}\right\} \\
 &= 1 - \Pr\left\{\min\{R_c \log_2(1 + \gamma_{ST}^R), \right. \\
 &\quad \left. \log_2(1 + \gamma_{AS}^D)\} > 2R_{th}\right\} \\
 &= 1 - \Pr\left\{R_c \log_2(1 + \gamma_{ST}^R) > 2R_{th}\right\} \\
 &\quad \times \Pr\left\{\log_2(1 + \gamma_{AS}^D) > 2R_{th}\right\} \\
 &= 1 - \Pr\left\{\gamma_{ST}^R > 2^{2R_{th}/R_c} - 1\right\} \\
 &\quad \times \Pr\left\{\gamma_{AS}^D > 2^{2R_{th}} - 1\right\} \tag{8}
 \end{aligned}$$

$\beta^R < \beta^D$ 일 때, 식(6)을 식(7)에 대입하여 식(8)과 유사하게 아웃티지 확률을 다음과 같이 얻는다.

$$\begin{aligned}
 O^{SA} &= 1 - \Pr\left\{\gamma_{AS}^R > 2^{2R_{th}} - 1\right\} \\
 &\quad \times \Pr\left\{\gamma_{ST}^D > 2^{2R_{th}/R_c} - 1\right\} \tag{9}
 \end{aligned}$$

레이레이 페이딩 채널에 대한  $\gamma_{ST}^R$ 와  $\gamma_{AS}^R$ 의 누적분포 함수는 [11]과 [12]를 이용하여 다음과 같이 각각 얻어진다.

$$F_{\gamma_{ST}^R}(x) = 1 - e^{-x n R_c / (\rho \beta^R)} \sum_{i=0}^{2n-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{x n R_c}{\rho \beta^R}\right)^i \tag{10}$$

$$F_{\gamma_{AS}^R}(x) = \left\{1 - e^{-x / (\rho \beta^R)} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{x}{\rho \beta^R}\right)^i\right\}^n \tag{11}$$

$\gamma_{ST}^D$ 와  $\gamma_{AS}^D$ 의 누적분포함수는 식(10)과 식(11)에서  $\beta^R$ 을  $\beta^D$ 로 대체하여 얻는다.

$\gamma_{ST}^R$ 와  $\gamma_{AS}^D$ 의 누적분포함수를 이용하여 식(8)을 다음과 같이 유도한다.

$$\begin{aligned}
 O^{SA} &= 1 - \left\{1 - F_{\gamma_{ST}^R}(2^{2R_{th}/R_c} - 1)\right\} \\
 &\quad \times \left\{1 - F_{\gamma_{AS}^D}(2^{2R_{th}} - 1)\right\} \tag{12}
 \end{aligned}$$

$\gamma_{AS}^R$ 와  $\gamma_{ST}^D$ 의 누적분포함수를 이용하여 식(9)를 다음과 같이 유도한다.

$$\begin{aligned}
 O^{SA} &= 1 - \left\{1 - F_{\gamma_{AS}^R}(2^{2R_{th}} - 1)\right\} \\
 &\quad \times \left\{1 - F_{\gamma_{ST}^D}(2^{2R_{th}/R_c} - 1)\right\} \tag{13}
 \end{aligned}$$

따라서, 선택적 MIMO 전송 기술 기반의 디코딩 후 전달 중계 시스템에 대한 아웃티지 확률은  $\beta^R > \beta^D$ 인 경우에 식(12)와 같이 얻어지고,  $\beta^R < \beta^D$ 인 경우에 식(13)과 같이 얻어진다.

#### IV. 수치적 결과

식(12)와 식(13)에서 보여주는 바와 같이, 선택적 MIMO 전송 기술 기반의 디코딩 후 전달 중계 시스템에 대한 아웃티지 확률은  $\beta^R$ 과  $\beta^D$ 가 서로 바뀌어도 동일하다. 따라서, 수치적 결과에서는  $\beta^R > \beta^D$ 인 경우에 대한 아웃티지 성능만을 비교 분석한다.

그림 2-4의 범례에서 Selective MIMO는 선택적 MIMO 전송 기술 기반의 중계 시스템을 의미하고, OSTBC only는 직교시공간블록코드 전송만을 이용하는 중계 시스템을 의미하며, TxAS only는 송신안테나 선택 전송만을 이용하는 중계 시스템을 의미한다. 직교시공간블록코드 전송만을 이용하는 중계 시스템에 대한 아웃티지 확률은 식(12)에서  $F_{\gamma_{AS}^D}(2^{2R_{th}} - 1)$ 을  $F_{\gamma_{ST}^D}(2^{2R_{th}/R_c} - 1)$ 으로 대체하여 얻어지고, 송신안테나 선택 전송만을 이용하는 중계 시스템에 대한 아웃티지 확률은 식(12)에서  $F_{\gamma_{ST}^R}(2^{2R_{th}/R_c} - 1)$ 을  $F_{\gamma_{AS}^R}(2^{2R_{th}} - 1)$ 으로 대체하여 얻어진다.

그림 2는  $n=2$ 이고,  $\beta^R=2$ ,  $\beta^D=1$ 일 때, 듀얼 홉 MIMO 중계 시스템에 대한 아웃티지 확률을 보여준다. 그림 2로부터, 식(12)로부터 얻은 결과와 시뮬레이션 결과가 정확히 일치함을 알 수 있고, 선택적 MIMO 전송 기술이 송신안테나 선택 전송 기술과 아웃티지 성능이 매우 유사함을 알 수 있다. 선택적 MIMO 전송 기술 기반의 시스템의 경우, 첫 번째 홉에서 직교시공간블록 코드 전송을 이용하고, 두 번째 홉에서 송신안테나 선

택 전송을 이용하기 때문에, 송신안테나 선택 전송만을 이용하는 시스템 보다 적은 피드백 오버헤드를 필요로 한다.

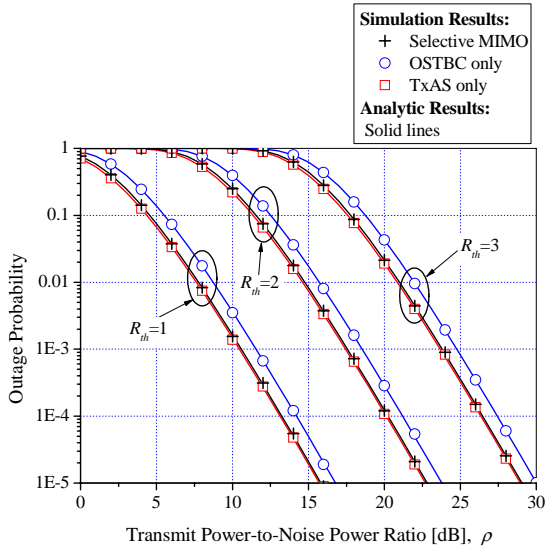


그림 2.  $n=2$ 이고,  $\beta^R=2$ ,  $\beta^D=1$ 일 때, 듀얼 홉 MIMO 중계 시스템의 아웃티지 확률

Fig. 2 Outage probability of dual-hop MIMO relaying systems when  $n=2$ ,  $\beta^R=2$ , and  $\beta^D=1$

그림 3과 그림 4에서는  $n=3$ 이고,  $\beta^R=2, 5$ ,  $\beta^D=1$ 일 때, 듀얼 홉 MIMO 중계 시스템에 대한 아웃티지 확률을 각각 보여준다. 그림 3과 그림 4로부터, 식(12)로부터 얻은 결과와 시뮬레이션 결과가 정확히 일치함을 알 수 있다.  $\beta^R=2$ 에 대한 아웃티지 성능을 보여주는 그림 3에서, 목표 용량이 증가할수록 선택적 MIMO 전송 기술과 송신안테나 선택 전송 기술의 성능 차이가 증가함을 확인할 수 있다. 그 이유는,  $n=3$ 일 때, 직교 시공간블록코드의 코드율이 3/4으로 감소하기 때문에 목표 용량이 증가함에 따라 선택적 MIMO 전송의 직교 시공간블록코드 전송에 대해 요구하는 용량이 증가하기 때문이다. 이러한 이유로, 그림 4에서 처럼  $\beta^R=2$ 를  $\beta^R=5$ 으로 증가시키면, 선택적 MIMO 전송의 직교 시공간블록코드 전송에 대해 요구하는 용량의 증가를 보완할 수 있다. 따라서, 그림 4에서 보여주는 바와 같이 선택적 MIMO 전송 기술이 송신안테나 선택 전송 기술의 성능과 매우 유사함을 확인할 수 있다.

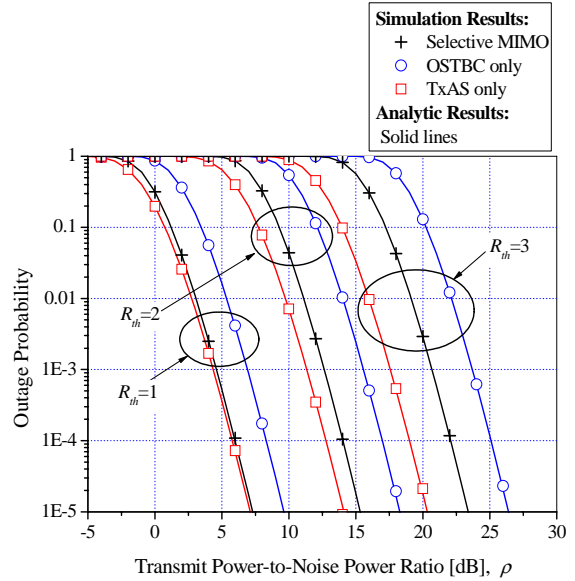


그림 3.  $n=3$ 이고,  $\beta^R=2$ ,  $\beta^D=1$ 일 때, 듀얼 홉 MIMO 중계 시스템의 아웃티지 확률

Fig. 3 Outage probability of dual-hop MIMO relaying systems when  $n=3$ ,  $\beta^R=2$ , and  $\beta^D=1$

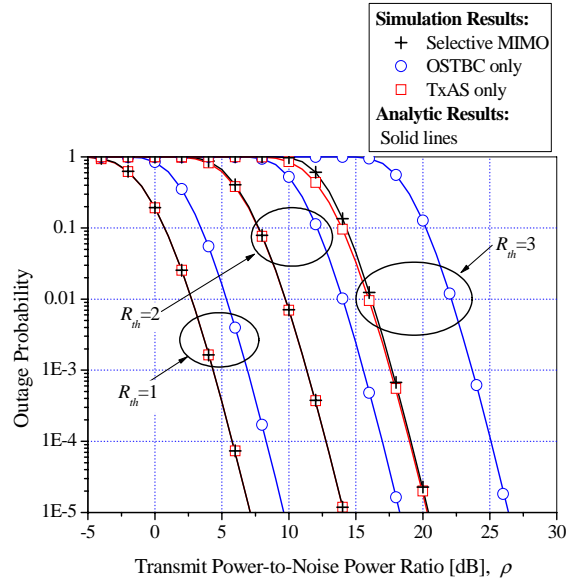


그림 4.  $n=3$ 이고,  $\beta^R=5$ ,  $\beta^D=1$ 일 때, 듀얼 홉 MIMO 중계 시스템의 아웃티지 확률

Fig. 4 Outage probability of dual-hop MIMO relaying systems when  $n=3$ ,  $\beta^R=5$ , and  $\beta^D=1$

그림 2-4에서 보여준 바와 같이, 선택적 MIMO 전송 기술은 안테나 개수가 작을수록 또는 첫 번째 홉과 두 번째 홉의 평균 채널 전력의 차이가 클수록 송신안테나 선택 전송 기술과 유사한 아웃티지 성능을 제공한다. 또한, 선택적 MIMO 전송 기술은 두 개의 홉 중 하나의 홉에 대해서만 송신안테나 선택을 위한 피드백을 사용하여 직교 시공간블록코드 전송 기술 보다 우수한 성능을 제공한다.

## V. 결 론

본 논문에서는 듀얼 홉 MIMO 중계 시스템에서 직교 시공간블록코드 전송과 송신안테나 선택 전송을 선택적으로 이용하는 선택적 MIMO 전송 기술을 제안하였다. 레일레이 페이딩 채널을 가정하여 선택적 MIMO 전송 기술 기반의 디코딩 후 전달 중계 시스템에 대한 아웃티지 확률을 분석하였다. 또한, 수치적 결과를 통해, 송신안테나 선택전송 기술 보다 피드백 오버헤드를 적게 요구하는 선택적 MIMO 전송 기술이 안테나 개수가 작을수록 또는 첫 번째 홉과 두 번째 홉의 평균 채널 전력의 차이가 클수록 송신안테나 선택 전송 기술과 유사한 아웃티지 성능을 제공함을 보여주었다.

## REFERENCES

[ 1 ] D. Gunduz, M. A. Khojastepour, A. Goldsmith, and H. V. Poor, "Multi-hop MIMO relay networks: diversity-multiplexing trade-off analysis," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 5, pp. 1738-1747, 2010.

[ 2 ] I.-H. Lee and D. Kim, "Coverage extension and power

allocation in dual-hop space-time transmission with multiple antennas in each node," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 56, no. 6, pp. 3524-3532, 2007.

[ 3 ] I.-H. Lee and D. Kim, "End-to-end BER analysis for dual-hop OSTBC transmissions over Rayleigh fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 56, no. 3, pp. 347-351, 2008.

[ 4 ] I.-H. Lee and D. Kim, "Outage probability of multi-hop MIMO relaying with transmit antenna selection and ideal relay gain over Rayleigh fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 2, pp. 357-360, 2009.

[ 5 ] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 45, pp. 1456-1467, 1999.

[ 6 ] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, 2004.

[ 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, 2003.

[ 8 ] X. Li, T. Luo, G. Yue, and C. Yin, "A squaring method to simplify the decoding of orthogonal space-time block codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 49, no. 10, pp. 1700-1703, 2001.

[ 9 ] S. Haykin and M. Moher, *Modern Wireless Communications*, Prentice Hall, 2004.

[10] E. G. Larsson, P. Stoica, *Space-time block coding for wireless communications*, Cambridge University Press, 2003.

[11] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

[12] H. A. David, *Order Statistics*, 2nd ed. New York: Wiley, 1981.



이인호(In-Ho Lee)

2003년 2월 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부 학사  
 2005년 2월 : 한양대학교 전자전기제어계측공학과 공학석사  
 2008년 8월 : 한양대학교 전자전기제어계측공학과 공학박사  
 2008년 9월 ~ 2010년 4월 : 삼성전자 DMC 연구소 책임연구원  
 2010년 4월 ~ 2011년 3월 : 한양대학교 ERICA 부설연구소 공학기술연구소 박사후과정  
 2011년 3월 ~ 현재 : 국립한경대학교 전기전자제어공학과 조교수  
 \*관심분야 : 무선 협력 통신 시스템, MIMO 전송 기술, 무선자원관리 기술