

논문 2005-42TC-4-3

공간적 채널 상관도에 따른 통계적인 채널 특성을 이용한 다중 안테나 선택 및 스위칭 시스템의 성능 분석

(Theoretical Analysis of MIMO Antenna Selection & Switching System
to Spatial Channel Correlation using Channel Statistics)

이 학 주*, 박 승 일**, 이 충 용*, 박 현 철***, 홍 대 식*

(Hakju Lee, Seungil Park, Chungyong Lee, Hyuncheol Park, and Daesik Hong)

요 약

일반적으로 공간적 상관도가 존재하는 채널에서 다중 안테나 시스템은 그 성능이 열화되는 것으로 알려져 있다. 이를 극복하기 위한 방안으로 안테나 선택을 통해 공간적 상관도를 극복하고 다이버시티와 공간 다중화의 스위칭을 통해서 시스템의 에러 확률을 개선하는 안테나 선택 및 스위칭 시스템 방식을 들 수 있다. 그러나 이러한 시스템의 경우 채널의 공간적 상관도에 대한 모델링의 어려움으로 인해 이론적인 분석이 미비한 실정이다. 본 논문에서는 채널의 Frobenius norm과 최소 고유치들의 통계적인 특성을 이용하여 안테나 선택 및 스위칭 시스템의 성능을 이론적으로 분석하고, 모의 실험 결과와의 비교를 통해 유사한 성능을 보이고 있음을 확인한다.

Abstract

Multi-Input, Multi-Output system suffers for the spatial channel correlation due to lack of spatial diversity. To overcome this defect, the antenna selection and switching system is proposed which selects the adequate antenna subset with highest channel diversity gain and switches the transmission techniques according to channel environments. However, its performance analysis is insufficient due to the difficulty of modeling the spatial channel correlation. In this paper, the theoretical upper bound of symbol error probability is derived by using the statistical properties of Frobenius norm and minimum eigen-value of channel matrix. By computer simulation, it is shown that the derived theoretical upper bound is similar to the simulation results.

Keywords: 다중 안테나, 공간 다중화, 다이버시티, 안테나 선택-스위칭, 채널 상관도 모델링

I. 서 론

다중 안테나 시스템(MIMO; Multi-Input, Multi-Output)은 추가적인 대역폭 확장이 없이도 전송용량을 크게 확장시키고 전송품질을 향상시킬 수 있는 잠재력

때문에 지금까지 다양한 연구가 진행 되고 있다^[1]. 다중 안테나 시스템은 이러한 두 가지 목표에 따라 크게 전송 다이버시티 기법(transmit diversity technique)과 공간 다중화 기법(spatial multiplexing technique)으로 분류할 수 있는데, 전송 다이버시티 기법은 채널의 다이버시티를 다양한 기법을 통해 이용함으로써 시스템의 전송품질 성능을 증가시키는 방법이다. 다이버시티 기법은 시공간 부호화를 통해 데이터 전송을 측면에서는 공간적 다중화 방식에 비해 떨어지지만, 다이버시티 이득을 이용하여 오차 확률 측면에서 우수한 성능을 보이는 방식이다. 이에 비해 공간 다중화 방식은 전송용량 측면에서 최대의 효과를 얻기 위해 입력 신호를 전송 안테나의 수만큼 병렬 신호로 나누어 다중 안테나로 송

* 정회원, 연세대학교

(Dept. of EE Eng., Yonsei Univ.)

** 정회원, 삼성전자

(Samsung Electronics)

*** 정회원, 한국정보통신대학교

(School of Eng., Information and Comm. Univ.)

※ 본 논문은 한국과학재단의 목적 기초 연구 사업

(R01-2002-000-00153-0)의 지원으로 수행되었습니다

접수일자: 2005년3월10일, 수정완료일: 2005년4월16일

수신하는 기법이다^[2]. 이러한 경우 데이터 전송율은 크게 증가시킬 수 있지만, 오차 확률 측면에서 다이버시티 이득을 얻지 못함으로 해서 보다 낮은 성능을 보인다. 이러한 두 가지 기법을 채널의 상태에 따라 가변적으로 운용함으로써 전송품질과 전송용량 측면에서 타협점을 얻을 수 있는데, 그러한 방식의 안테나 스위칭 기법(antenna switching technique)이 연구되었다^[3].

그러나 이때 다이버시티를 이용하는 기법이나 공간적 다중화를 이용하는 시스템의 경우 공간적인 채널간의 상관도에 따라 심각한 성능 저하를 보이게 된다. 이러한 공간적 상관도 문제를 해결하기 위한 방안으로 채널 정보에 따라 안테나 조합을 선택하여 상대적으로 독립적인 채널을 보장하는 전송 안테나를 통해서만 정보를 전송하여, 정보 전송 용량을 증가 시키는 안테나 선택 기법(antenna selection technique)을 들 수 있다^[4]. 이러한 경우 모든 전송 안테나를 사용하지는 못하지만 비교적 쉽게 공간적 채널 상관도 문제를 해결할 수 있다. 이와 같이 안테나 선택 및 스위칭 기법을 이용하여 주어진 채널 환경에 적합한 전송 모드를 제안하였다. 앞서 제안한 안테나 선택 및 스위칭 기법은 그러나 채널 상관도를 모델링하는데 있어 수학적 어려움으로 인해 모의 실험을 통해서만 성능을 분석하였다. 따라서 이 기법을 다양한 환경에 적용시키기에 이론적인 한계를 안고 있다.

본 논문에서는 안테나 선택 및 스위칭 기법의 비용함수인 채널의 Frobenius norm과 최소 고유치를 공간적인 상관도에 따라 그 통계적인 특성을 추출해 내고 이를 이용하여 안테나 선택 및 스위칭 기법의 성능을 이론적으로 분석하도록 한다. 또한 분석한 이론적인 성능과 실제 모의실험 결과를 비교하여 유사함을 확인한다.

II. 안테나 선택 및 스위칭 기법의 동작 원리

1. 안테나 스위칭 기법

안테나 스위칭은 수신 성상도의 최소 거리를 기준으로 하여, 다이버시티와 공간 다중화 방식을 스위칭 해 줌으로써 성능을 개선시키는 기법이다. 안테나 스위칭에서 다이버시티와 다중화 방식간의 공정한 기준을 마련하기 위해서는 전송율을 일치 시켜야 한다. 따라서, 전송 다이버시티 시스템에서는 심볼당 R 비트를 갖는 심볼을 가정한다면, 공간 다중화 방식에서는 전송 안테나 수만큼 분할된 비트를 갖는 심볼 변조 방식을 택한다. 본 논문에서는 그림 1과 같이 전송 안테나 4개와 수

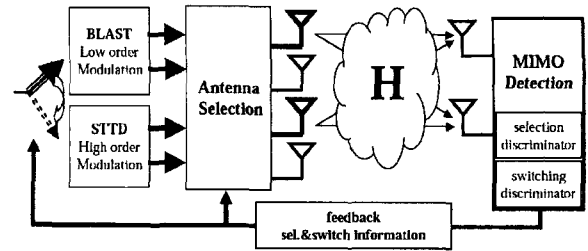


그림 1. 4개의 전송 안테나와 2개의 수신 안테나를 갖는 안테나 선택 및 스위칭 시스템

Fig. 1. Antenna selection and switching system with 4 transmit antennas and 2 receive antennas.

신 안테나 2개를 갖는 시스템에서 2개의 전송 안테나를 선택하는 시스템을 고려한다. 또한 안테나 스위칭을 위한 두 가지 전송모드로는 2×2 시스템에서 다이버시티 기법으로는 최적의 성능을 갖는 것으로 알려진 STTD (Space-Time Transmit Diversity), 그리고 공간 다중화 방식으로는 BLAST기법(Bell-lab Layered Architecture of Space-Time technique)을 적용하였다.

다이버시티에서 심볼 에러 확률의 상위 한계는 다음과 같다.

$$P_{div} \leq N_e Q \left(\sqrt{\frac{E_s}{2N_o}} d_{min, div}^2 \right) \quad (1)$$

여기서 N_e 는 평균 인접 심볼 수이며, $d_{min, div}^2$ 은 다이버시티에서, 수신 성상도의 최소 거리(Squared minimum Euclidean distance)를 나타낸다.

마찬가지로, 공간 다중화 기법에서 심볼 에러 확률의 상위 한계는 다음과 같다.

$$P_{mux} \leq N_e Q \left(\sqrt{\frac{E_s}{2N_o}} d_{min, mux}^2 \right) \quad (2)$$

안테나 스위칭 시스템에서, 수신기는 순시 채널 정보에 따라 심볼 에러 확률을 기준으로 기법을 선택한다. 이때, 두 기법의 심볼 에러 확률은 d_{min}^2 에 의존하므로, 두 기법의 d_{min}^2 만을 비교함으로써 전송 모드를 선택할 수 있다.

$$d_{min, mux}^2 \geq d_{min, div}^2 \quad (3)$$

위 식을 만족시키는 채널에 대해, 송신단에서는 다중화 기법을 선택하고, 그렇지 않은 경우 다이버시티 기법을 선택한다. 수신 성상도는 채널의 함수이므로, d_{min}^2 은 매 채널마다 계산한다.

2. 안테나 선택 기법

가. 공간 다중화 기법

공간 다중화 기법에서 안테나 선택은 채널의 최소 고유치의 최대값을 선택하는 방식으로 이루어진다^[7]. 본 논문에서 BLAST 기법을 적용하기 위한 안테나 선택 기법으로, 이 기준을 이용한다. 다중화 기법에서 전송신호에 대한 추정, 선택된 채널을 고려하면 다음과 같이 식을 정리할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} \left\| \mathbf{y} - \sqrt{\frac{E_s}{M}} \mathbf{H}_{p, \max} \mathbf{x} \right\|^2 \quad (4)$$

\mathbf{x} 는 전송신호, \mathbf{y} 는 수신신호이며, $\hat{\mathbf{x}}$ 는 복원신호이고 $\mathbf{H}_{p, \max}$ 는 다중화 기법에서 안테나 선택을 통해 선택된 안테나에 의한 채널이다. M 는 선택한 안테나의 수이다. 따라서 다중화 기법에서, 안테나 선택은 $\hat{\mathbf{x}}$ 과 \mathbf{x} 의 거리를 가장 적은 값으로 만드는 $\mathbf{H}_{p, \max}$ 를 선택하는 것이다.

이를 위한 방법이, 안테나 선택 후 수신 정상도의 최소거리 $d_{min, MUX}^2$ 을 기준으로 하는 기법이다. 다음 수식을 통해, 모든 안테나 서브셋에 대한 수신 정상도 최소거리 $d_{min, MUX}^2$ 의 하위 한계값을 계산한다.

$$d_{min, MUX}^2(\mathbf{p}) \geq \frac{\lambda_{min}^2(\mathbf{p}) d_{min, max}^2}{M} \quad (5)$$

이때, $d_{min, max}^2$ 은 안테나 선택 전 송신 정상도의 최소 거리이며, \mathbf{p} 는 안테나 선택에 의해 결정된 안테나 서브셋을 의미한다. 또한 $\lambda_{min}^2(\mathbf{p})$ 는 선택된 안테나 서브셋으로 구성된 채널 행렬의 최소 고유치를 나타낸다. 따라서 이로부터 $\lambda_{min}^2(\mathbf{p})$ 를 최대화할 수 있는 서브셋 \mathbf{p} 를 선택하도록 한다.

나. 전송 다이버시티 기법

다이버시티 기법에서 안테나 선택은 각 기법의 코드 특성에 의존하기 때문에, 임의의 다이버시티 기법에 대해 최소 유클리디언 거리를 계산하는 것은 어렵다. 그러나, STTD와 같은 선형 다이버시티 기법에 대한 최소 거리는 다음과 같이 상위 한계를 표현할 수 있다.

$$d_{min, DIV}^2(\mathbf{p}) \geq \frac{\| \mathbf{H}_{div}(\mathbf{p}) \|_F^2 d_{min, div}^2}{M} \quad (6)$$

여기서 $\| \cdot \|_F^2$ 은 Frobenius norm을 의미하며, $d_{min, DIV}^2(\mathbf{p})$ 는 안테나 선택 후 송신 정상도의 최소 거리, $\mathbf{H}_{div}(\mathbf{p})$ 는 다이버시티에서 각 안테나 서브셋에 대응되는 채널이다. STTD 기법에서 안테나 선택은 선형 다이버시티 기법 중, 2개의 안테나를 사용하므로 위 식으로부터 각 서브셋에 대한 $d_{min, DIV}^2(\mathbf{p})$ 을 구하고, 이 값들 중 가장 큰 값을 가지는 서브셋을 선택한다.

III. 성능 분석

1. STTD 기반 안테나 선택 기법의 성능 분석

STTD기반의 전송 모드를 결정하기 위한 비용함수는 앞서 살펴본 바와 같이 채널 행렬의 Frobenius norm을 통해 결정된다. 일반적으로 $2 \times N$ 의 크기를 갖는 채널 행렬을 \mathbf{H} 라 할 때 공간적 상관도를 다음과 같이 상관행렬 \mathbf{R} 로 모델링할 수 있다.

$$\mathbf{R} = E\{\tilde{\mathbf{h}}\tilde{\mathbf{h}}^H\} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{U}^H \quad (8)$$

이때, $\tilde{\mathbf{h}} = \text{vec}\{\mathbf{H}\}$ 이고 \mathbf{U} 는 행렬 \mathbf{R} 의 고유벡터행렬, $\mathbf{\Sigma}$ 는 σ_i , ($i=1, \dots, 2N$)의 고유치를 갖는 고유치행렬이라 정의할 때, 채널 \mathbf{H} 의 Frobenius norm $\| \mathbf{H} \|_F^2$ 의 PDF(Probability Density Function)를 Laplace 변환한 결과는 다음과 같다^[5].

$$\psi(s) = \frac{1}{\prod_{j=1}^{2N} (1 + s\sigma_j)} \quad (9)$$

\mathbf{R} 의 0이 아닌 고유치들 중에서 서로 다른 값들을 $\tilde{\sigma}_j$ ($j=1, \dots, L, 1 \leq L \leq 2N$)이라 하고 그때의 다중도(multiplicities)를 m_j ($j=1, \dots, L$)라고 할때 위 식을 inverse Laplace 변환을 위해 다음과 같이 부분함수로 확장할 수 있다.

$$\psi(s) = \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^{m_j} \frac{A_{jk}}{(1 + s\tilde{\sigma}_j)^k} \quad (10)$$

이때 A_{jk} 는 선형방정식의 근으로 구할 수 있는 값이다. 따라서 다음과 같이 inverse Laplace 변환을 이용하여 $\| \mathbf{H} \|_F^2$ 의 PDF를 구할 수 있다.

$$f_{div}(x) = \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^{m_j} \frac{A_{jk} x^{k-1}}{(k-1)! \tilde{\sigma}_j^k} \exp\left[-\frac{x}{\tilde{\sigma}_j}\right] u(x) \quad (11)$$

식(11)은 안테나 선택을 하지 않은 경우 Frobenius norm의 PDF를 나타낸다. 따라서 안테나 선택 후 성능을 분석하기 위해서는 고려하는 시스템이 전송 안테나 4개 중에서 2개만을 사용하므로 다음과 같이 ordered statistics를 이용하여 구할 수 있다.

$$f_{div,sel}(x) = 6F_{div}^5(x)f_{div}(x) \quad (12)$$

이때 $F_{div}(x)$ 는 식(11)을 적분하여 구한 $\|H\|_F^2$ 의 CDF(Cumulative Density Function)으로 다음과 같이 나타난다.

$$F_{div}(x) = \left(1 - \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^{m_j} A_{jk} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(x/\sigma_j)^{k-1-i}}{(k-1-i)!} \exp\left[-\frac{x}{\sigma_j}\right]\right) \alpha(x) \quad (13)$$

2. BLAST 기반 안테나 선택 기법의 성능 분석

식(5)로부터 공간 다중화 방식에서의 비용함수는 채널 행렬 H 의 최소 고유치의 제곱값에 의해 결정되는 것을 확인하였다. 따라서 Wishart 행렬, $H^H H$ 의 특성을 이용하여 $\lambda_{\min}^2(\mathbf{p})$ 의 통계적 특성을 구하도록 한다. 상관관계를 갖고 있는 Wishart 행렬의 정렬된 고유치들은 다음과 같은 joint PDF를 갖는다^[6].

$$f_X(x_1, \dots, x_{N_t}) = K_{\Sigma} |\mathbf{V}_1(\mathbf{x})| \cdot \prod_{i,j} |e^{-x_i/\sigma_i}| \prod_{j=1}^{N_t} x_j^{N_t - N_r} \quad (14)$$

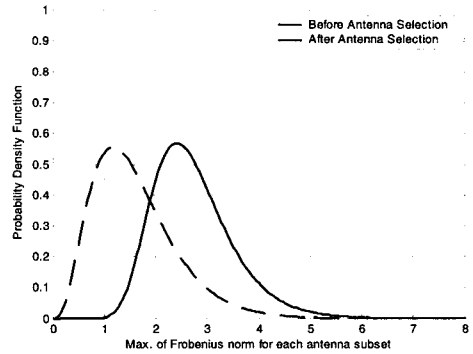
이때 N_t, N_r 은 각각 전송, 수신 안테나의 개수 ($N_t \leq N_r$), K_{Σ} 는 PDF 특성을 맞추기 위한 상수, $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_{N_t}]^T$, $\sigma_i (i = 1, \dots, N_t)$ 는 상관관계 행렬 $E\{H^H H\}$ 의 고유치들이다. 따라서 본 논문에서 고려하고 있는 (2,2) 공간 다중화 방식에 식(14)를 적용하면 최소 고유치의 PDF는 다음과 같다.

$$f_{mux}(x_2) = \int_{x_1}^{\infty} f_X(x_1, x_2) dx_1 = K_{\Sigma} (\sigma_1^2 - \sigma_2^2) \exp\left[-\left(\frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2}\right)x_2\right] \quad (15)$$

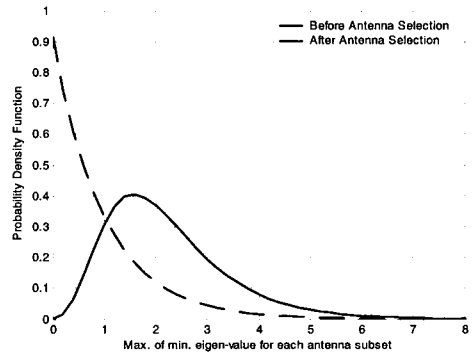
유사한 방식으로 안테나 선택 기법이 적용된 경우 최소 고유치의 PDF는 다음과 같다.

$$f_{mux,sel}(x) = 6F_{mux}^5(x)f_{mux}(x) \quad (16)$$

그림 2의 (a)와 (b)는 각각 전송 모드별로 구한



(a) Frobenius norm의 PDF
(a) PDF of Frobenius norm



(b) 최소 고유치의 PDF
(b) PDF of minimum eigenvalue

그림 2. 안테나 선택 전/후 향상된 PDF 성능(전송 안테나 4개, 수신 안테나 2개)

Fig. 2. Enhanced PDF according to antenna selection technique. (4 transmit antennas and 2 receive antennas)

Frobenius norm과 최소 고유치의 PDF를 그린 것이다. 이때 채널간의 공간적 상관관계는 angle spread를 이용하여 적용하였고 중간정도의 상관도라고 할 수 있는 15도(°)를 사용하였다^[7]. 그림으로부터 안테나 선택 후 채널의 공간적 상관도를 줄임으로써 다이버시티 기법 및 공간 다중화 방식 모두 평균값이 증가함을 알 수 있다. 각각의 평균적인 값들은 식(5)와 (6)에서의 수신 성상도에서의 최소값을 증가시켜 결국 식(1)과 (2)에서의 심볼 에러 확률을 줄이는 역할을 하는 것을 알 수 있다.

최종적으로 우리가 고려하고 있는 안테나 선택 및 스위칭 시스템의 성능을 분석하기 위해서는 각각 구해낸 PDF들로부터 최대값을 구해내는 문제로 귀결될 수 있다. 두 개의 독립적인 확률변수의 최대값의 CDF는 각각의 CDF의 곱으로 구성되므로 다음과 같이 나타난다.

$$F_{swit+sel}(x) = F_{div}(x) \times F_{mux}(x) \quad (17)$$

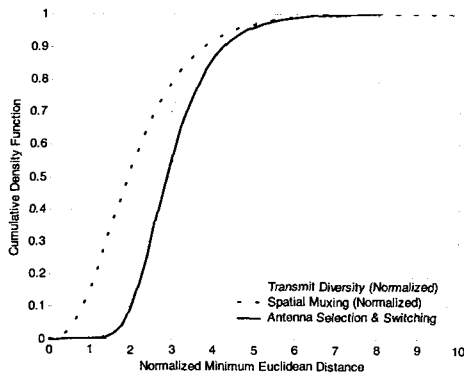
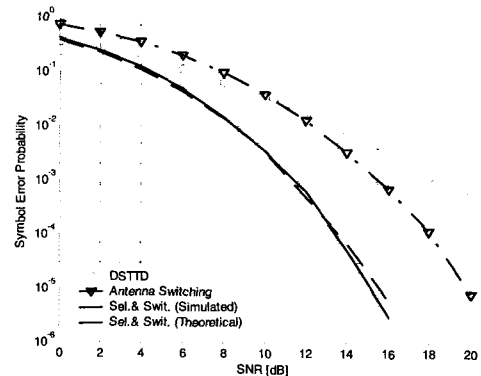


그림 3. 안테나 스위칭 기법을 사용하여 구한 수신 성상도 최소 거리의 CDF
 Fig. 3. CDF of minimum distance obtained by antenna switching technique.

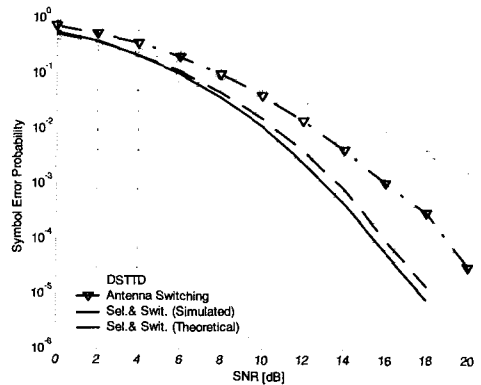
따라서 식(17)을 미분하여 안테나 선택 및 스위칭 시스템의 수신 성상도 최소 거리에 대한 PDF를 얻을 수 있다. 이 경우 전송율을 맞추기 위해 각각의 변조계수가 다르므로 정규화시키는 과정이 필요하다. 그림 3은 각각의 전송 모드에서 식(7)의 분자성분으로 표현된, 정규화된 수신 성상도 최소 거리에 대한 CDF를 그린 것이다. 이때 실험환경은 그림 2의 상황과 동일하다. 이 결과로부터 다중 다이버시티 기법과 공간 다중화 기법을 선택하여 사용하는 안테나 스위칭 방식을 적용함으로써 성능이 향상되고 있음을 알 수 있다.

IV. 실험 결과

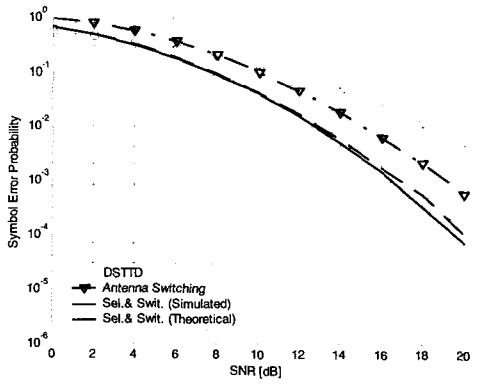
앞서 이론적으로 분석한 안테나 선택 및 스위칭 시스템의 성능을 모의 실험을 통해 얻은 결과와 비교하였다. 실험 환경으로는 4개의 전송 안테나와 2개의 수신 안테나를 사용하였고 안테나 선택 기법을 통해 2개의 전송 안테나를 결정하였다. 안테나 스위칭 시스템으로는 전송 다이버시티 기법에는 STTD기법을, 공간 다중화 기법으로는 BLAST방식을 적용하였다. 공간적 상관도는 angle spread를 통해 부여하였고, 그림 4의 (a), (b), (c)와 같이 독립적인 채널과 적은 상관도를 갖는 채널(angle spread = 15°), 그리고 높은 상관도를 갖는 채널(angle spread = 5°)인 경우에 대해 심볼 에러 확률을 도시하였다. 또한 비교를 위해 DSTTD (Double STTD)기법을 도시하였고, 안테나 스위칭만 적용하였을 경우를 일점쇄선으로 나타내었다. 그림으로부터 공간적 상관도가 높아질 수록 전반적인 시스템의 에러 확률 성능은 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 또한 공간적 상관도가 적을 경우 안테나



(a) 공간적 상관도가 없는 경우
 (a) No spatial correlation



(b) 적은 공간적 상관도를 갖는 경우 (AS=15°)
 (b) Low spatial correlation (AS=15°)



(c) 높은 공간적 상관도를 갖는 경우 (AS=5°)
 (c) High spatial correlation (AS=5°)

그림 4. 안테나 선택 및 스위칭 기법의 여러 확률
 Fig. 4. BER performance of antenna selection & switching technique

선택 기법에 의해 더욱 많은 이득을 얻을 수 있는데, 이는 안테나 서브셋간의 채널 다이버시티가 높아지기 때문에 그만큼 더욱 높은 이득을 갖는 채널을 선택할 확률이 높아져서로 해석할 수 있다. 그림에서 실선은 모의 실험을 통한 결과이고 점선은 본 논문에서 이론적으로 구한 상위 한계를 나타낸 것으로 거의 일치하고 있음을

확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 공간적 상관도를 갖는 채널에서도 효율적으로 적용할 수 있는 안테나 선택 및 스위칭 기법의 이론적인 심볼 에러 함수의 상위 한계를 유도했다. 이를 위해서 안테나 선택 및 스위칭을 위한 비용함수인 채널의 Frobenius norm과 최소 고유치를 공간적인 상관도에 따라 그 통계적인 특성을 추출해 내고 이를 이용하여 수신 성상도 최소 거리의 평균값을 도출했다. 또한 이렇게 분석한 이론적인 성능과 실제 모의 실험 결과를 비교해 본 결과 공간적 상관도에 관계없이 유사한 성능을 보이고 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] S. M Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, pp. 1451-1458, vol. 16, issue: 8, Oct. 1998.
- [2] G. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environments using multi-element antennas," Bell Labs Technical Journal, vol.1, pp.41-59, Aug. 1996.
- [3] R. W. Heath Jr. and A. Paulraj "Switching between spatial multiplexing and transmit diversity based on constellation distance," in Proc. of Allerton Conf. on Comm. Cont. and Comp., Oct. 2000.
- [4] D. A. Gore, R. U Nabar, A. Paulraj, "Selecting an optimal set of transmit antennas for a low rank matrix channel," in Proc. of IEEE Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp. 2785-2788, vol. 5. Jun. 2000.
- [5] R. U. Nabar, H. Bolcskei, and A. J. Paulaj, "Outage properties of space-time block codes in correlated Rayleigh or Rician fading environments," in Proc. of IEEE Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. 3, pp. 2381-2384, May 2002.
- [6] M. Chiani, M. Z. Win, and A. Zanella, "The distribution of eigenvalues of a Wishart matrix with correlation and application to MIMO capacity," in Proc. of IEEE GLOBECOM, vol. 4, pp. 1802-1805, Dec. 2003.
- [7] J. Salz and J. H. Winters, "Effect of Fading correlation on adaptive arrays in digital mobile radio," IEEE Trans. on Vehicular Tech., vol. 43, issue 4, pp. 1049-1057, Nov. 1994.

저 자 소 개



이 학 주(정회원)

1999년 연세대학교 전자공학과
학사 졸업.

2001년 연세대학교 전자공학과
석사 졸업.

2001년~현재 연세대학교
전자공학과 박사과정

<주관심분야 : 통신신호처리, MIMO 시스템>



박 승 일(정회원)

2001년 연세대학교 전자공학과
학사 졸업.

2003년 연세대학교 전자공학과
석사 졸업.

2004년~현재 삼성전자 연구원.

<주관심분야 : 어레이 신호처리, MIMO 시스템>



이 충 용(정회원)

1995년 Georgia Institute of
Technology 박사 졸업.

1996년~1997년 7월 삼성전자

1997년 9월~현재 연세대학교
전자공학과 부교수

<주관심분야 : 통신신호처리, 어
레이 신호처리, MIMO 시스템>



박 현 철(정회원)

1997년 Georgia Institute of
Technology 박사 졸업

1997년~2002년 삼성전자

2002년~현재 ICU 조교수

<주관심분야: 변조 및 코딩, 정보
이론>



홍 대 식(정회원)

1990년 Purdue University

Electrical Eng. 박사 졸업

1991년~현재 연세대학교

전기전자공학과 교수

<주관심분야 : 디지털통신, 통신
신호처리, 4G시스템, OFDM시스템>