

논문 2005-42TC-1-9

수신 신호 대 잡음비에 기반한 안테나 셔플링을 적용 DSTTD 시스템

(An Antenna Shuffling Scheme for DSTTD System Based on
Post-processing Signal to Noise Ratio)

정 성 현*, 심 세 준*, 이 충 용**, 윤 대 회**

(Sunghun Jung, Seijoon Shim, Chungyong Lee, and Dae Hee Youn)

요 약

본 논문에서는 Double Space-Time Transmit Diversity(DSTTD) 시스템의 수신 오차 확률(bit error rate; BER)에 효율적인 shuffling pattern 결정 알고리즘을 제안한다. 기존 shuffling pattern 결정 알고리즘이 채널 상관도를 측정해서 상관도를 최소화하는 기법인 반면, 본 기법은 수신 안테나별 최소 수신 신호 대 잡음비(signal to noise ratio; SNR)를 최대화하는 shuffling pattern을 결정하는 기법이다. 제안된 기법은 수신 오차 확률에 직접적인 영향을 주는 수신 신호 대 잡음비로부터 pattern을 결정하므로, 기존 기법에 비해서 향상된 수신 오차 확률을 보여준다. Monte Carlo 모의 실험을 통해 제안된 기법의 성능을 살펴보면, 강한 상관도를 갖는 단일 클러스터 채널 모델에서 제안된 shuffling pattern 결정 알고리즘을 이용한 DSTTD 시스템이 10^{-3} 오차 확률에 대해서 기존 기법에 비해 3 dB 수신 신호 대 잡음비의 향상이 있음을 알 수 있었다.

Abstract

A new antenna shuffling scheme for double space time transmit diversity is proposed. The proposed method obtains the shuffling pattern directly from the estimated channel by maximizing minimum post-processing signal to noise ratio(SNR), while the conventional method minimizes channel correlation. Since the minimum post-processing SNR is directly related with error performance, the proposed method shows better bit error rate performance than the conventional method. Monte Carlo simulations showed that the proposed scheme has more 3 dB SNR gain than the conventional scheme for 10^{-3} bit error rate in spatially correlated fading caused by a single cluster model.

Keywords : DSTTD, STBC, antenna shuffling, spatial correlation, MIMO

I. 서 론

Double Space-Time Transmit Diversity(DSTTD) 시스템^[1]은 4개의 안테나를 이용하는 open-loop 다중 안테나 시스템(multiple-input multiple-output; MIMO)

으로써, 송신단에서 2개의 Space-Time Block Code (STBC)^[2]를 사용한다. 이러한 DSTTD 시스템은 많은 산란체에 의한 독립적인 페이딩 채널 환경에서 최적의 성능을 얻을 수 있지만, 채널간의 공간적 상관도가 높은 페이딩 채널에서는 시스템의 성능이 열화된다.

안테나 셔플링(antenna shuffling) 기법은 송신단에서 적당한 안테나 짝(pair)을 선택함으로써 공간 상관 페이딩 채널에서 DSTTD 시스템의 성능을 향상시키기 위해 연구되어진 기법이다^[1]. 기존의 셔플링 기법은 수신기에서 전송된 공간적 상관 정보를 이용해서 최소 공간적 상관 정보를 갖는 송신 안테나 짝을 선택한다. 공간

* 학생회원, ** 정회원, 연세대학교 전기전자공학부
(Dept. of Electrical and Electronic Eng., Yonsei University)

※ 본 논문은 4G wireless communication systems에 관한 과제 일부로서 (주) 삼성 전자의 지원으로 수행되었습니다.

접수일자: 2004년9월13일, 수정완료일: 2005년1월11일

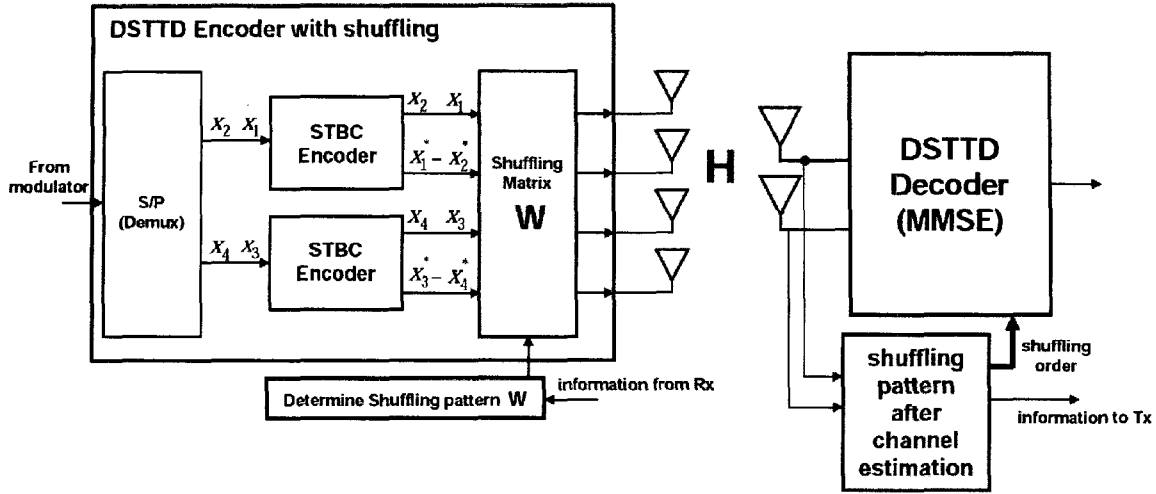


그림 1. 안테나 셔플링 구조를 갖는 2×4 DSTTD 송수신 시스템

Fig. 1. A transmitter and receiver structure for 2×4 DSTTD system with antenna shuffling scheme.

상관 정보는, 수신기의 성능에 직접적인 영향을 미치는 수신 신호대 잡음비(post-processing signal to noise ratio; P-SNR)와 밀접한 관련이 있으나, P-SNR의 정확한 기준이 될 수 없으므로, 기존 안테나 셔플링 기법은 수신 비트 오차 확률(bit error rate; BER)을 최소화하기 위한 적당한 방법이라고 할 수 없다.

따라서, 본 논문에서는 최소 수신 신호 대 잡음비의 관점에서 적당한 안테나 셔플링 패턴을 찾아내는 기법을 제안한다. 최소 수신 신호 대 잡음 잡음비는 수신 신호를 복원하는 과정에서 생기는 서브 스트림별 SNR 중 가장 작은 수신 SNR을 가리키며, 셔플링 패턴에 따라 다른 값을 갖고 BER에 직접적인 영향을 끼치는 값이다. 그러므로, 본 논문에서는 셔플링 패턴에 따라 다른 값을 갖는 최소 SNR 중 가장 큰 최소 SNR을 갖는 셔플링 패턴을 선택하는 기법을 제안한다.

제안된 기법을 설명하기 위한 본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 기존의 셔플링 기법에 대해서 설명하고 기법의 문제점을 살펴본다. III 장에서는 최소 수신 신호 대 잡음비를 최대화 하는 안테나 셔플링을 제안하고, IV 장에서 Monte Carlo 모의 실험을 통해서 제안된 기법의 성능을 기존 기법과 비교한다. 마지막으로 V 장에서 결론을 맺는다.

II. 기존의 안테나 셔플링 기법

일반적인 다중 안테나 페이딩 채널 모델은 랜덤 행렬

\mathbf{H} 로 모델링된다. 특히, N_T 개의 송신 안테나와 N_R 개의 수신 안테나를 갖는 다중 안테나 시스템에서 채널의 특성이 주파수 대역에 평탄(flat)하다고 가정하면, \mathbf{H} 는 다음과 같은 $N_R \times N_T$ 채널 응답 행렬로 표현할 수 있다.^{[3]-[6]}

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}_R^{1/2} \mathbf{H}_w \mathbf{R}_T^{1/2} \quad (1)$$

여기서, \mathbf{R}_T 와 \mathbf{R}_R 은 송수신 안테나의 채널 상관도 행렬을 각각 나타내고^{[5][6]}, \mathbf{H}_w 는 i.i.d (identically independent distributed) 복소 가우시안 랜덤 변수를 행렬 구성 요소로 갖는 행렬을 나타낸다. 실제 전파 환경에서는 산란체 클러스터 개수가 제한되고 안테나간의 거리가 충분히 떨어져있지 않기때문에 채널 페이딩을 독립적인 채널 페이딩으로 모델링할 수 없다. 이렇게 채널 페이딩의 상관도를 \mathbf{R}_T 와 \mathbf{R}_R 로 모델링 할 수 있다.

이제 그림 1과 같은 2×4 DSTTD 시스템을 고려해 보자. 송신기에서 변조기로부터 발생하는 데이터 스트림은 2개의 스트림으로 분배되고, 분배된 각 스트림은 다시 각각의 STBC에 의해 부호화되므로, 시스템 채널 모델을 약간 변형시키면 DSTTD 복호기에서 수신되는 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다^[1].

$$\begin{bmatrix} y_1(0) \\ y_1(1) \\ y_2(0) \\ y_2(1) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{N_T}} \begin{bmatrix} h_{1,1} & -h_{1,2} & h_{1,3} & -h_{1,4} \\ h_{1,2}^* & h_{1,1}^* & h_{1,4}^* & h_{1,3}^* \\ h_{2,1} & -h_{2,2} & h_{2,3} & -h_{2,4} \\ h_{2,2}^* & h_{2,1}^* & h_{2,4}^* & h_{2,3}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1(0) \\ w_1(1) \\ w_2(0) \\ w_2(1) \end{bmatrix} \stackrel{\Delta}{=} \mathbf{H}_D \mathbf{x}_D + \mathbf{w}_D \quad (2)$$

이때 $h_{i,j}$ 는 i^{th} 송신안테나로부터 j^{th} 수신안테나로 신호의 채널 응답을 나타내고, $w(\bullet)$ 는 정규화 분포를 따르는 AWGN(additive white Gaussian noise)을, \mathbf{x}_D 는 DSTTD 부호화된 송신 신호를 나타낸다. 그리고, $\sqrt{2/N_T}$ 는 전송 파워 정규화 인자이다. 그림 1에서 \mathbf{W} 는 서플링 연산을 수행하는 6개의 4×4 치환 행렬(permutation matrix) 중 하나이다. 6개의 치환 행렬 중 어떤 \mathbf{W} 에 따라서 \mathbf{H}_D 행렬의 원소는 재배치 된다^[1].

안테나 서플링은 공간 상관 페이딩을 극복하기 위해서 2개의 STBC 부호화기의 출력 스트림의 최적 순서를 선택하는 기법이다. 기존 안테나 서플링 기법의 핵심 파라미터는 다음과 같은 채널 상관도 특성이다^[1].

$$\mathbf{C} = E\{\mathbf{H}_D \mathbf{H}_D^\dagger\} = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & a & b \\ 0 & c_1 & -b^* & a^* \\ a^* & -b & c_2 & 0 \\ b^* & a & 0 & c_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, $E\{\bullet\}$ 는 기대치 연산이고, $(\bullet)^\dagger$ 는 Hermitian 전치 행렬을 뜻한다. 채널 상관도 특성은 기존 서플링 행렬 \mathbf{W}_{con} 을 찾을 때 이용된다. 즉, \mathbf{W}_{con} 은 다음 조건을 만족하는 서플링 패턴으로 결정되어진다^[1].

$$\mathbf{W}_{con} = \arg \min_{\mathbf{W}} (|a|^2 + |b|^2) \quad \text{s.t. } c_1 = c_2 \quad (4)$$

(4)를 최소화하는 것은 \mathbf{C} 에서 채널 상관도로부터 유도된 장기간에 걸쳐서 지속되는 간섭을 억제하는 것과 같다. 그러나, (4)와 같은 서플링 패턴 기법은 BER 성능에 직접적인 영향을 주는 수신 SNR로부터 얻어진 것이 아니므로, 오차 확률을 최소화하는 관점에서 최적 기법이라고 할 수 없다.

III. 제안하는 안테나 서플링 기법

제안하는 안테나 서플링 기법은 최적 서플링 패턴을 찾기 위해서 최소 P-SNR을 이용한다. 최소 P-SNR은 가장 수신 SNR의 성능이 안 좋은 스트림에 해당하는 P-SNR을 뜻한다. 수신 오차 확률은 가장 안 좋은 스트림에 직접적인 영향을 받기 때문에 최소 P-SNR은 수신기의 성능에 가장 중요하고 직접적인 연관이 있는 파라미터 중에 하나이다.

DSTTD 복호화기는 zero-forcing(ZF)나 최소 평균 자승 오차(minimum mean squared error; MMSE) 검출기를 사용할 수 있고, 각 검출기는 스트림 별로 데이터를 복호화 한다. (2)에서 송신 신호가 정규화 분포를 따르는 신호라고 가정하고 송신 신호의 SNR을 ρ 라고 가정하자. 이때, MMSE 검출기에 대해서, 잡음 신호에 대한 영향을 없앤 k^{th} 스트림 별 P-SNR은 다음과 같이 주어진다^{[6]-[8]}.

$$\text{SNR}_k = \frac{1}{\left[\left(\mathbf{I}_{N_T} + \frac{\rho}{N_T} \mathbf{H}_D^\dagger \mathbf{H}_D \right)^{-1} \right]_{k,k}} - 1 \quad (5)$$

(5)로부터 최소 P-SNR의 하위 한계치는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \text{SNR}_{\min} &\geq \lambda_{\min} \left\{ \mathbf{I}_{N_T} + \frac{\rho}{N_T} \mathbf{H}_D^\dagger \mathbf{H}_D \right\} - 1 \\ &= \frac{\rho}{N_T} \lambda_{\min} \{ \mathbf{H}_D^\dagger \mathbf{H}_D \} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $\lambda_{\min} \{ \mathbf{H}_D^\dagger \mathbf{H}_D \}$ 는 $\mathbf{H}_D^\dagger \mathbf{H}_D$ 의 최소 고유치를 뜻한다. 따라서, 제안하는 안테나 서플링 행렬 \mathbf{W}_{new} 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\mathbf{W}_{new} = \arg \max_{\mathbf{W}} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \lambda_{\min,n} \{ \mathbf{H}_D^\dagger \mathbf{H}_D \} \quad (7)$$

여기서, $\lambda_{\min,n} \{ \mathbf{H}_D^\dagger \mathbf{H}_D \}$ 는 n^{th} 순서 채널 행렬의 최소 고유치를 뜻하고, N 은 독립 시행 횟수를 나타낸다. \mathbf{W}_{new} 는 최소 P-SNR을 최대화하는 방법으로 얻어지므로, BER을 최소화하려는 방향으로 안테나 서플링 패턴을 결정 짓는다. 또한, λ_{\min} 이 수신 안테나의 공간 상관도 뿐만 아니라 송신 안테나의 공간 상관도에도 상관없

표 1. 각 시나리오에 대한 제안된 기법과 기존 기법의 판별값 비교

Table 1. The comparison of discriminant values between the proposed and the conventional schemes for each scenario.

Shuffling Pattern	Scenario I		Scenario II	
	Proposed	Conventional	Proposed	Conventional
(1,2) (3,4)	0.0514	0.0309	0.1543	0.0082
(1,3) (2,4)	0.5836	0.0096	0.3496	0.0035
(1,4) (2,3)	0.6198	0.0101	0.3703	0.0072
(1,2) (4,3)	0.0570	0.0135	0.1570	0.0372
(1,3) (4,2)	0.5535	0.0032	0.3390	0.0088
(1,4) (3,2)	0.5642	0.0117	0.3721	0.0042

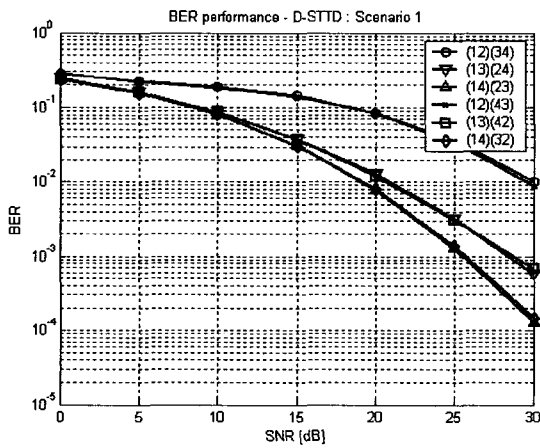


그림 2. 시나리오 I에서 각 안테나 셔플링에 대한 DSTTD 시스템 성능

Fig. 2. The performance of the DSTTD system for each shuffling pattern in the scenario I.

이 수신 신호의 SNR 성능에만 영향을 받는 파라미터이므로, \mathbf{W}_{new} 는 \mathbf{W}_{con} 과는 달리 두 가지 상관도가 모두 고려된 안테나 셔플링 패턴이다.

$\lambda_{\min,n} \{ \mathbf{H}_D^\dagger \mathbf{H}_D \}$ 은 DSTTD 채널의 구조적인 특징을 이용하면 다음과 같이 행렬 구성 요소를 이용해서 간단히 계산된다. $\mathbf{H}_D^\dagger \mathbf{H}_D$ 는 (2)와 (3)에 의해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{H}_D^\dagger \mathbf{H}_D = \begin{bmatrix} c_{1,n} & 0 & a_n & b_n \\ 0 & c_{1,n} & -b_n^* & a_n^* \\ a_n^* & b_n & c_{2,n} & 0 \\ b_n^* & a_n & 0 & c_{2,n} \end{bmatrix} \quad (8)$$

(8)로부터 $\lambda_{\min,n} \{ \mathbf{H}_D^\dagger \mathbf{H}_D \}$ 을 구하면 다음과 같다.

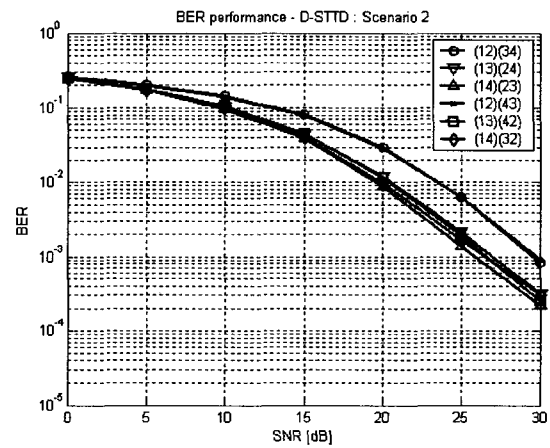


그림 3. 시나리오 II에서 각 안테나 셔플링에 대한 DSTTD 시스템 성능

Fig. 3. The performance of the DSTTD system for each shuffling pattern in the scenario II.

$$\lambda_{\min,n} \{ \mathbf{H}_D^\dagger \mathbf{H}_D \} = \frac{(c_{1,n} + c_{2,n}) - \sqrt{(c_{1,n} - c_{2,n})^2 + 4(|a_n|^2 + |b_n|^2)}}{2} \quad (9)$$

IV. 모의 실험 결과

Monte Carlo 모의 실험을 통해서 제안된 시스템의 성능을 확인하였다. 우선, 2×4 DSTTD 시스템을 고려하고 송수신 안테나에 모두 등간격 선형 안테나를 사용하였고, 각 안테나의 간격은 반송파 파장의 0.5배를 가정하였다.

공간 상관 채널 페이딩은 두가지 시나리오를 고려하였다. 첫번째 시나리오에서는 한 개의 클러스터 모델에 의한 송신 안테나의 채널 상관도를 가정하였고, 상관도

모델의 DoA(departure of angle)과 AoS(angle of spread)를 $\pi/3$, $\pi/20$ 으로 각각 설정하였다^[6]. 두번째 시나리오에서는 임의의 송신 안테나 채널 상관도를 발생하여 실험하였고, $R_T = TPL([1.0.9.0.81.0.729])$ 이다^[8].

이때, $TPL(\mathbf{g})$ 은 함수 인자를 원소로 갖는 toeplitz 행렬 연산이다. 두 시나리오에서 모두 수신기 주변에서는 풍부한 산란체가 존재한다고 가정할 수 있고, $\mathbf{R}_R = \mathbf{I}$.

표 1에서는 제안된 기법과 기존 기법에 대한 모든 서플링 패턴에 대한 판별값(discriminant value)을 보여준다. 제안된 기법과 기존 기법에서, 판별값은 각각 최소 P-SNR과 상관도 특성을 나타낸다. 따라서, 제안된 기법에서는 여러 판별값 중에 최대값을 선택하는 반면, 기존 기법에서는 최소 판별값을 선택하게 된다. 모든 판별값들은 100,000 번의 독립 시행을 통해서 얻어진 값들이다.

첫번째 시나리오대해서 서플링 패턴 $\{(1,4) (2,3)\}$ 과 $\{(1,4) (3,2)\}$ 가 가장 좋은 성능을 보여준다. 그런데, 표 1에서 볼 수 있듯이 기존 기법은, 그림 2에서 보여주는 성능과 달리, $\{(1,3) (4,2)\}$ 서플링 패턴을 선택한 반면, 제안된 기법은 그림에서와 같이 $\{(1,4) (2,3)\}$ 서플링 패턴을 선택하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 10^{-3} BER을 기준으로 3dB 수신 신호대 잡음비의 성능 향상이 있음을 알 수 있다. 시나리오 2에 대해서는 그림 3에서 보여지는 것과 같이 제안된 기법과 기존 기법의 BER 성능이 비슷함을 알 수 있다. 그러나, 표에서의 서플링 판별값을 비교하면 매우 흥미로운 결과를 볼 수 있다. 그림 3의 결과를 보면 서플링 패턴 $\{(1,3) (2,4)\}$, $\{(1,4) (2,3)\}$, $\{(1,3) (4,2)\}$, $\{(1,4) (3,2)\}$ 가 비슷한 BER성능을 보여주고 있음을 알 수 있다. 그러나, 표 1에서의 판별값을 관찰해 보면, 위에서 언급한 서플링 패턴에 대해서 제안된 기법의 판별값도 매우 비슷한 값을 가지는 반면, 기존 기법의 판별값은 그렇지 않다는 것을 알 수 있다. 그러므로, 제안된 기법이 서플링 패턴을 선택함에 있어서 기존 기법에 비해서 좀 더 신뢰할 수 있는 판별값을 제공한다고 말할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 최소 수신 신호대 잡음비에 기반한 DSTTD 시스템용 안테나 서플링 기법을 제안하였다. 모의 실험을 통하여 단일 클러스터 모델의 공간 상관

채널 페이딩 모델에 대해서 10^{-3} BER을 기준으로 3dB 수신 신호대 잡음비의 성능 향상이 있음을 알 수 있다. 또한, 제안된 기법이 기존 기법에 비해서 좀 더 신뢰할 수 있는 판별 기준을 제시하고 있음을 알 수 있다.

참고 문헌

- [1] E. N. Onggosanusi, A. G. Dabak and T. M. Schmidl, "High rate space time block coded scheme: performance and improvement in correlated fading channels," *Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, vol. 1, pp. 194-199, March 2002.
- [2] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communication," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16., pp. 1451-1458, October 1998.
- [3] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environments when using multiple antennas," *Wireless Personal Communications*, vol. 6, no. 3, pp. 311-335, March 1998.
- [4] D. Shiu, G. J. Foschini, M. J. Gans, and J. M. Kahn, "Fading correlation and its effect on the capacity of multi-element antenna systems," *IEEE Transaction on Communications*, vol. 48, pp. 502-513, March 2000.
- [5] Siemens, "Channel model for Tx diversity simulations using correlated antennas," *TSGR1#15(00)1067*, 22nd-25th, August, 2000, Berlin, Germany.
- [6] D. Gore, R. Heath and A. Paulraj, "Statistical antenna selection for spatial multiplexing systems," *Proc. IEEE ICC 2002*, New York, pp. 450-454, April 2002.
- [7] R. Heath, S. Sandhu, and A. Paulraj, "Antenna selection for spatial multiplexing systems with linear receivers," *IEEE Communication Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 2276-2280, April 2001.
- [8] A. Paulraj, R. Nabar and D. Gore, *Introduction to space-time wireless communications*, chapter 8, Cambridge university press, 2003.

저 자 소 개



정 성 현(학생회원)
1992년 연세대학교 전자공학과 석사.
1992년~현재 (주)삼성 탈레스 수석 연구원.
2000년~현재 연세대학교 전기 전자 공학과 박사 과정.

<주관심분야: 통신신호처리, MIMO 시스템>



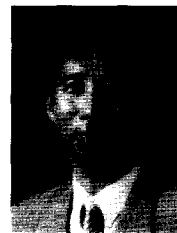
심 세 준(학생회원)
1999년 연세대학교 전자공학과 졸업.
2001년 연세대학교 전기전자 공학과 석사.
2001년~현재 연세대학교 전기 전자 공학과 박사 과정.

<주관심분야: 통신신호처리, MIMO 시스템>



이 충 용(정회원)
1995년 Georgia Institute of Technology 박사 졸업.
1996년~1997년 삼성전자 연구원.
2004년~현재 연세대학교 전기 전자 공학과 부교수.

<주관심분야: 통신신호처리, 어레이 신호처리, MIMO 시스템>



윤 대 회(정회원)
1982년 Kansas State Univ 박사 졸업.
1985년~현재 연세대학교 전기 전자 공학과 교수.
2001년~현재 연세대학교 공과대학 학장.

<주관심분야: 음향 음성 신호처리, 어레이 신호처리>