

WiBro 다운링크 환경에서 여러 가지 MIMO 기법의 성능 및 연산량에 대한 비교 연구*

홍경화**·오태열**·최승원**

A comparison study of the performance and computational complexity of various MIMO techniques in WiBro downlink system

Hong, Gyeong-Hua · Oh, Tae-Youl · Choi, Seung-Won

〈Abstract〉

Combining OFDMA with MIMO is the key technology for the 4G mobile communication. OFDMA can relieve inherent difficulties of high-speed transmission. MIMO technology can be largely categorized into two techniques: one is STC for diversity gain and the other is SM for high frequency efficiency. In this paper, we depict various MIMO techniques of two transmit antenna and compare the computational complexity of decoding process for the techniques. Then, we analysis the performance of the techniques in the WiBro downlink environment based on OFDMA. We prefer ML algorithm which is the optimum performance and ZF algorithm of least computational complexity for SM detection.

Key Words : OFDMA, MIMO, SM, STC, WiBro

I. 서론

차세대 이동통신 시스템에서는 현재 서비스 중인 음성 신호 뿐만 아니라, 영상 및 기타 고속 데이터를 높은 신뢰도로 송수신해야 한다. 이와 같이 다양한 서비스를 제공하기 위하여, 각 가입자는 현재보다 훨씬 넓은 대역폭을 차지할 수밖에 없는데, 전체 시스템의 할당 주파수

가 한정되어 있으므로 통신용량이 현저히 줄어들 수밖에 없다. OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 전송방식은 다수의 부반송파를 이용하여 고속의 데이터를 병렬로 전송함으로써 각 부반송파에의 지속 전송효과를 얻을 수 있게 한다. 저속의 병렬 반송파의 심벌구간이 증가하게 되므로 ISI (Inter-Symbol Interference)의 영향이 줄어들고 또한 보호구간(guard interval)의 사용으로 제거된다.

기존 OFDMA 시스템에 MIMO(Multiple Input Multiple Output)기술을 도입하여 한정된 주파수대역에

* 본 논문은 대학 IT 연구센터 육성지원사업의 연구결과로써 HY-SDR연구센터의 연구비 지원과 2단계 두뇌 한국 21사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

** 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 통신신호처리연구실

서의 통신용량을 늘이고 시스템 성능을 개선하게 된다.

OFDMA를 기반으로 하는 WiBro(Wireless Broadband) 기술은 한국이 독자적으로 개발한 4세대 이동통신기술의 국제 표준이다. WiBro는 현재 세계 최초로 한국에서 상용화되고 있으며, WiBro Wave 2 표준에는 MIMO 기술이 적용된다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II 장에서는 여러 가지 MIMO 기법에 대해 설명하고 여러 가지 MIMO 기법별 디코딩 과정의 연산량을 비교하며, III 장에서는 WiBro 환경에서의 MIMO 시스템 구조를 제시하고, IV 장에서는 다운링크 시뮬레이션 결과를 분석하고 마지막으로 V 장에서는 결론을 내린다.

II. MIMO(Multiple Input Multiple Output)

MIMO는 다이버시티이득[1]을 목적으로 하는 시간 공간 코딩(STC:Space Time Coding) 기법, 주파수 효율을 증가시키는 공간 멀티플렉싱(SM:Spatial Multiplexing) 기법으로 분류할 수 있다. STC는 안테나 수가 증가할수록 시스템의 성능이 더 좋아지고 SM은 송신안테나수가 증가할수록 데이터 전송률이 커진다. 본장의 앞부분에서는 STC와 SM 기법에 대해 설명하고 마지막으로 MIMO 기법별 디코딩 과정의 연산량을 비교한다.

2.1 SM(Spatial Multiplexing)

2.1.1 수신 신호 모델링

SM 시스템에서는 N_T (송신안테나 개수)개의 서로 다른 신호가 동시에 페이딩(fading) 채널을 지나 N_R ($N_R \geq N_T$)개의 안테나에 수신된다. 송신신호 \underline{s} 는 $N_T \times 1$ 벡터로 표시되고 채널은 $N_R \times N_T$ 행렬 \underline{H} 로 표시되며 \underline{n} 은 수신 안테나에서의 AWGN (Additive White Gaussian Noise)로서 $N_R \times 1$ 벡터로 표시된다. 수신신호는 다음과 같다.

$$\underline{r} = \underline{H}\underline{s} + \underline{n} \quad (1)$$

$$\text{여기서 } \underline{s} = [s_1, s_2, \dots, s_{N_T}]^T \quad (2)$$

$$\underline{r} = [r_1, r_2, \dots, r_{N_R}]^T \quad (3)$$

$$\underline{n} = [n_1, n_2, \dots, n_{N_R}]^T \quad (4)$$

이고, $\underline{\cdot}$ 는 벡터, $\underline{\cdot}$ 는 행렬을 나타내며 $[\cdot]^T$ 는 행렬의 전치 연산자를 나타낸다. \underline{H} 의 (i, j) 번째 요소 $h_{i,j}$ 는 j 번째 송신안테나와 i 번째 수신 안테나 사이의 레일리 플랫 페이딩(Rayleigh flat-fading) 채널의 임펄스 응답이다.

그리고 다음과 같은 가정을 한다.

$$E[s_j] = 0, \quad j = 1, 2, \dots, N_T \quad (5)$$

$$E[n_i] = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N_R \quad (6)$$

$$E[\underline{s}\underline{s}^H] = \frac{P}{N_T} \underline{I} \quad (7)$$

$$n_i \sim N(0, \sigma^2) \quad (8)$$

여기서 $[\cdot]^H$ 은 행렬의 허미션(Hermitian) 연산자이고 \underline{I} 는 $N_R \times N_R$ 단위행렬이고 P 는 전체 송신전력이다.

2.1.2 SM에서의 송신데이터 검출알고리즘

본 논문에서는 SM 기법의 송신 데이터를 검출하기 위한 여러 가지 알고리즘 가운데서 ML(Maximum Likelihood)[2] 검출 알고리즘과 ZF(Zero Forcing)[2] 검출 알고리즘에 대해서 알아보도록 한다.

(1) ML(Maximum Likelihood)

ML알고리즘의 criteria는 유클리디안(Euclidean) 거리를 최소화 하는 것이다. 수신부에서의 검출 신호는 다음과 같이 표현 된다.

$$\hat{\underline{s}} = \arg \min_{\underline{s} \in S^N} \|\underline{r} - \underline{H}\underline{s}\|^2 \quad (9)$$

여기서 S 는 M -ary 송신신호의 성상도(constellation)

$\underline{\hat{s}}$ 를 원소로 하는 집합이다. $\underline{\hat{H}}$ 는 추정된 채널이다. ML 알고리즘은 SM 기법의 여러 가지 검출 알고리즘 가운데서 최적의 성능을 가지지만 연산량은 N_T 와 모듈레이션의 차수 M 의 증가에 의하여 지수 함수적으로 증가된다.

(2) ZF(Zero Forcing)

ZF은 수신신호에 가중치(Weight) 행렬을 곱해 주어 fading 채널에 의한 간섭을 줄이는 알고리즘이다. ZF의 가중치 행렬은 \underline{H} 의 pseudo-inverse 행렬로 표시된다.

$$\underline{H}^+ = (\underline{H}^H \underline{H})^{-1} \underline{H}^H \quad (10)$$

검출 신호는 다음과 같다.

$$\underline{\hat{s}} = \underline{H}^+ \underline{r} = \underline{s} + \underline{H}^+ \underline{n} \quad (11)$$

ZF알고리즘은 연산량이 적지만 \underline{H}^+ 에 의해 잡음의 영향이 커지게 되어 시스템의 성능이 저하된다.

2.2 STC(Space Time Coding)

본 논문에서는 송신안테나 수 N_T 가 2이고 부호화율이 1인 경우의 STC[3]에 대하여 서술한다.

심벌 주기 T 동안에 두 개의 심벌이 동시에 각 안테나로부터 전송된다. 첫 번째 심벌주기 동안 신호 s_1 이 첫 번째 안테나로부터 전송되고 신호 s_2 가 두 번째 안테나로부터 전송된다. 두 번째 심벌 주기에는 신호 $-s_2^*$ 와 신호 s_1^* 가 각각 첫 번째 안테나와 두 번째 안테나로부터 전송된다. 송신신호는 레일리 플랫폼 페이딩 채널을 지나 N_R 개의 수신 안테나에 수신된다. 각 안테나에서, 두 심벌 주기 동안의 채널은 변하지 않는다고 가정한다.

2.2.1 2x1 STC

$N_T=2, N_R=1$ 인 STC의 신호모델은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

STC의 송신신호에 대한 인코딩 특성을 채널에 적용하면 수신신호를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

수신부에서의 검출 신호는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \hat{s}_1 \\ \hat{s}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1^* & h_2 \\ h_2^* & h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (|h_1|^2 + |h_2|^2)s_1 + \hat{n}_1 \\ (|h_1|^2 + |h_2|^2)s_2 + \hat{n}_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.2.2 2x2 STC

$N_T=2, N_R=2$ 인 STC의 수신 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} \\ r_{12} & r_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} \\ h_{12} & h_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서 r_{ij} 는 i 번째 수신안테나에서 수신한 j 번째 송신안테나의 신호이다. $h_{i,j}$ 는 j 번째 송신안테나와 i 번째 수신 안테나 사이의 레일리 플랫폼 페이딩이며 두 심벌 주기 동안 변하지 않는다고 가정한다.

검출된 신호는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \hat{s}_1 \\ \hat{s}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (|h_{11}|^2 + |h_{12}|^2 + |h_{21}|^2 + |h_{22}|^2)s_1 + \hat{n}_1 \\ (|h_{11}|^2 + |h_{12}|^2 + |h_{21}|^2 + |h_{22}|^2)s_2 + \hat{n}_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

신호 모델링으로부터 알 수 있는바 STC 시스템은 안테나 수가 증가 될수록 다이버시티 이득이 증가 된다.

2.3 연산량 비교

MIMO 디코딩 모듈의 구현 복잡도는 시스템의 하드웨어 구현에 영향을 주게 되고 MIMO 기법의 선택에 의하여 구현복잡도가 달라진다. 본 절에서는 MIMO 디코딩 모듈에서 SM와 STC기법의 송신 데이터 검출 과정의 연산량을 비교한다.

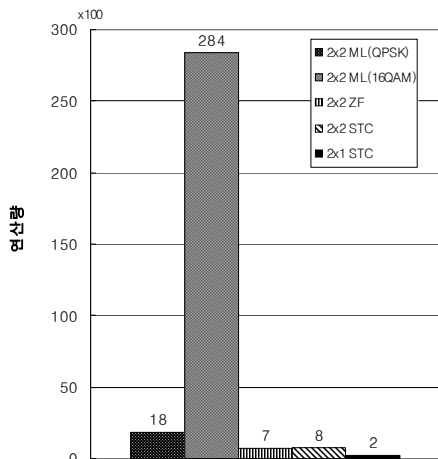
도표 1은 MIMO 기법별 디코딩 과정의 연산량 이고 그림 1은 QPSK와 16QAM 모듈레이션 환경에서의 2x2

ML, 2×2ZF, 2×2 STC, 2×1 STC의 연산량 비교 그림이다.

ML알고리즘의 연산량은 모듈레이션 차수 M 과 송신 안테나 수 N_T 에 의하여 지수 함수적으로 증가함을 알 수 있다. ZF와 STC는 ML에 비해 연산량이 적으며 모듈레이션 차수 M 의 영향을 받지 않는다.

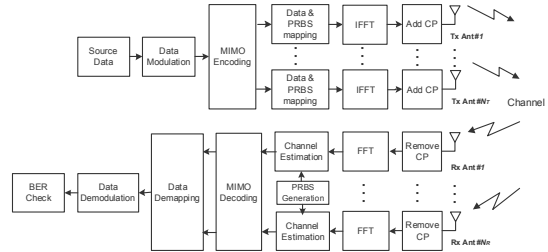
<표 1> MIMO 디코딩 방법별 연산량

	ML	ZF	STC
Real Multiplication	$4N_T N_R M^{N_T} + 2N_R M^{N_T}$	$8N_T^3 + 6N_T^2 N_R + 6N_T^2 + 11N_T N_R - 18N_T$	$4N_T^3 N_R^2 + N_T N_R + N_R$
Real Addition	$4N_T N_R M^{N_T} + 2N_R M^{N_T} - M^{N_T}$	$8N_T^3 + 4N_T^2 N_R + 4N_T^2 + 10N_T N_R - 7N_T$	$2N_T^3 N_R^2 + N_T N_R$
Read	$12N_T N_R M^{N_T} + 5N_R M^{N_T} + M^{N_T}$	$24N_T^3 + 12N_T^2 N_R + 4N_T^2 + 26N_T N_R - 24N_T$	$12N_T^3 N_R^2 + 4N_T N_R + 2N_R$
Write	$2N_T N_R M^{N_T} + 2N_R M^{N_T}$	$4N_T^3 + 4N_T^2 N_R + 4N_T^2 + 8N_T N_R - 9N_T$	$6N_T^3 N_R^2 + 3N_T N_R + 2N_R$
Total	$22N_T N_R M^{N_T} + 11N_R M^{N_T}$	$44N_T^3 + 26N_T^2 N_R + 10N_T^2 + 55N_T N_R - 58N_T$	$24N_T^3 N_R^2 + 9N_T N_R + 5N_R$



<그림 1> MIMO 디코딩 방법별 연산량

III. 시스템 구조



<그림 2> WiBro 환경에서의 MIMO 시스템 구조

그림 2는 WiBro 환경에서의 MIMO 시스템 구조도이다. 전체 시스템은 크게 송신부와 수신부로 나뉘며 각 모듈의 기능은 다음과 같다[4][5].

3.1 송신부

(1) Source Data

음성 정보를 포함한 고속의 데이터를 발생한다.

(2) Modulation

QPSK 또는 M-QAM과 같은 변조 방식을 사용하여, 비트 단위의 정보를 심벌 단위의 정보로 매핑 한다.

(3) MIMO Encoding

데이터 심벌들은 MIMO 인코딩을 거쳐 안테나별로 N_T 개의 직렬 스트림이 생성된다.

(4) Data and PRBS mapping

PRBS는 간 동기 및 주파수 동기과 채널 추정을 위한 파일럿이다. 파일럿과 MIMO 인코딩 후의 데이터는 OFDMA 프레임의 지정된 위치에 매핑 된다.

(5) IFFT

시간 영역에서의 OFDMA 심벌을 생성하기 위해서 각 안테나 별로 역푸리에 변환을 한다

(6) Add CP

ISI를 제거하기 위하여 CP(Cyclic Prefix)를 guard interval로 사용한다.

3.2 수신부

(1) Antenna Arrays

N_T 개의 배열 안테나에서 송신된 OFDM 신호를 N_R 개의 안테나 소자로 이루어진 배열 안테나로 수신한다.

(2) Remove CP

CP를 제거함으로써 ISI가 제거 된다.

(3) FFT

각 수신 안테나 별로 시간 단위 OFDM 샘플들을 푸리에 변환하여 각 부 반송파 별로 변조된 심벌 단위 정보를 생성한다.

(4) Channel Estimation

파일럿을 이용하여 각 수신 안테나 별로 채널추정을 진행한다.

(5) MIMO Decoding

SM시스템은 ZF, ML 알고리즘으로, STC는 각 수신 안테나에서 수신한 신호를 결합(combining)하여 송신 데이터를 검출한다.

(6) Data De-mapping

검출된 데이터 심벌은 프레임 구조에서 선출되어 직렬 스트림으로 된다.

(7) Demodulation

QPSK 또는 M-QAM과 같은 변조 방식으로 변조된 심벌을 다시 비트 단위의 신호로 복조한다.

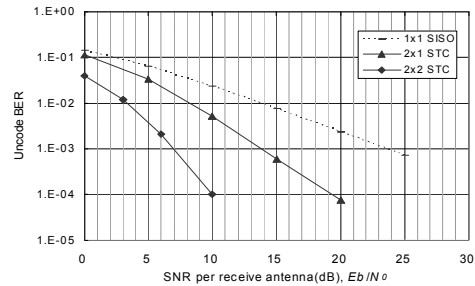
IV. 시뮬레이션 결과

WiBro MIMO 시스템의 성능을 분석하기 위한 다음과 같은 환경에서 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 파라미터는 표 2와 같다.

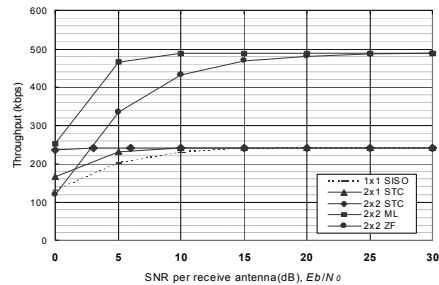
<표 2> 시뮬레이션 파라미터

파라미터	값
대역폭	8.75 MHz
반송파 주파수	2.3 GHz
FFT 사이즈	1024
도플러 주파수	128Hz
채널환경	Rayleigh flat-fading[6]
데이터 모듈레이션	QPSK, 16QAM
채널 코딩	CTC(1/2)
안테나 수($N_T \times N_R$)	1×1 , 2×1 , 2×2

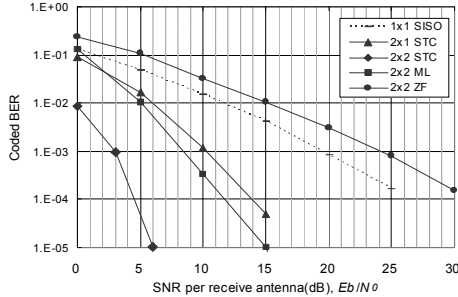
수신부에서 채널추정 에러가 발생하지 않는다고 가정한다.



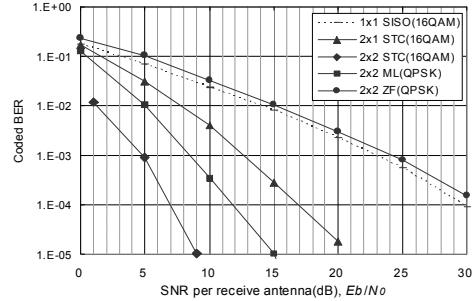
<그림 3> WiBro 다운링크 환경에서의 STC 성능(QPSK)



<그림 4> WiBro 다운링크 환경에서의 전송률 비교(QPSK)



<그림 5> WiBro 다운링크 환경에서의 MIMO 성능(QPSK)



<그림 6> WiBro 다운링크 환경에서의 동일한 전송률 MIMO 성능

그림 3은 WiBro 다운링크 환경에서 STC의 SNR에 따른 Uncoded BER(Bit Error Rate)성능 그래프이다. SISO(Single Input Single Output)의 성능은 비교를 목적으로 표현하였다. QPSK인 경우 비트 에러율 0.1%에서, 2x1 STC는 SISO에 비해 송신전력을 10dB 절감할 수 있다. 이것은 2x1STC가 다이버시티 차수 2의 다이버시티 이득을 얻기 때문이다. 2x2 STC는 SISO에 비해 송신전력을 17dB 절감할 수 있는데 이것은 다이버차수 4의 다이버시티 이득과 수신부에서의 MRC 처리 과정에 의한 SNR 이득을 얻기 때문이다.

그림 4는 WiBro 다운링크 환경에서 QPSK 변조 방식을 적용한 MIMO의 전송률 비교 그래프이다. 동일한 변조방식의 환경에서 2x2 SM의 데이터 전송률이 STC 및 SISO의 2배가 됨을 알 수 있다. 즉 SM의 주파수 효율은 STC의 2배이다.

그림 5는 WiBro 다운링크 환경에서 QPSK 변조 방식을 적용한 MIMO의 Coded BER(Bit Error Rate) 성능 그래프이다. 동일한 데이터 변조방식의 환경에서 2x2 ML은 SISO에 비해 성능이 제고 되는 반면 2x2 ZF은 SISO에 비해 성능이 저하된다. 그림5로부터 알 수 있는바 2x2 STC는 2x2 SM에 비해 송신전력을 절감할 수 있다.

그림 6은 데이터 전송률이 같은 경우, 여러 가지 MIMO 기법의 Coded BER 성능 그래프이다. 동일한 데이터 전송률을 유지하기 위하여 SM은 QPSK를 사용하고 SISO와 STC는 16QAM을 사용하도록 한다. QPSK 2x2

ZF은 16QAM SISO 보다 성능이 저하되며 제일 높은 송신 파워가 수요 된다. 다이버시티 이득에 의해 성능 개선도가 높은 2x2 STC의 성능이 제일 좋음을 알 수 있다.

VI. 결론

차세대 이동통신 핵심 기술인 WiBro기술과 MIMO기술의 결합은 무선통신에서 신호의 주파수, 시간 및 공간 차원의 특징의 조화를 이루어 고속 데이터 시스템의 성능과 주파수 효율을 개선한다.

본 논문에서는 2x1 STC, 2x2 STC, 2x2 ML, 2x2 ZF의 성능, 전송률, 연산량에 대하여 비교 분석하였다.

동일한 변조방식이 적용 될 때, 2x2 STC는 높은 차수의 다이버시티 이득으로 하여 최고의 성능을 보여 준다. SM은 주파 효율이 STC의 2배이다. 2x2 ML은 다이버시티 이득을 얻는 2x1 STC보다 성능이 좋으나 연산량이 많으며 모듈레이션 차수의 증가됨에 따라 지수 함수적으로 증가한다. 2x2 ZF은 연산량이 적지만 성능이 제일 저하 된다. 주파수 효율이 같은 환경에서도 2x2 STC는 최고의 성능을 나타낸다.

참고 문헌

- [1] John G. Proakis, Digital Communications, 4th Ed., Mc Graw Hill, 2001, pp. 821-839.
- [2] Jingming-Wang and Daneshrad, B., "A comparative study of MIMO detection algorithms for wideband spatial multiplexing systems," 2005 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Vol.1, March 2005, pp. 408-413.
- [3] S. M. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 16, Issue. 8, October 1998, pp. 1451-1458.
- [4] IEEE Standards Activities Department, "IEEE P802.16 Rev2/D2, DRAFT Standard for Local and metropolitan area networks, Air Interface for Broadband Wireless Access Systems," December 2007, pp. 910-914.
- [5] Richard Van Nee and Panjee Prasas, OFDM For Wireless Multimedia Communications, Artech House Publishers, 2000, pp. 47-48.
- [6] A. F. Naguib, "Adaptive antennas for CDMA wireless networks," Ph.D. dissertation, Stanford Univ., CA, Aug. 1996, pp. 13-26.

■ 저자소개 ■



홍경화
Hong, Gyeong hua

2006년~현재 한양대학교 전자통신공학과 석사과정
2005년 6월 중국연변과학기술대학교 전자통신공학과 (공학학사)

관심분야 : 스마트안테나, 이동통신, 신호처리
E-mail : hongkh@dsplab.hanyang.ac.kr



오탈열
Oh, Tae youl

2006년~현재 한양대학교 전자통신공학과 박사과정
2006년 2월 한양대학교 전자통신공학과 (공학석사)
2001년 2월 대구대학교 정보통신공학과 (공학학사)

관심분야 : 모뎀, 스마트안테나, SDR, 이동통신, 신호처리
E-mail : tyoh@dsplab.hanyang.ac.kr



최승원
Choi Seung Won

2002년~현재 HY-SDR 연구센터 센터장
1992년~현재 한양대학교 전자전기공학부 교수
1990년~1992년 일본 우정성 통신연구소 선임연구원
1989년~1992년 ETRI 선임연구원
1988년~1989년 미국 Syracuse대학 전기및전산과 교수
1988년 12월 미국 Syracuse대학 전기공학 (공학박사)
1985년 12월 미국 Syracuse대학 컴퓨터공학 (공학석사)
1982년 2월 서울대학교 전자공학 (공학석사)
1980년 2월 한양대학교 전자공학 (공학학사)

관심분야 : SDR, 스마트안테나, 이동통신, 신호처리
E-mail : choi@dsplab.hanyang.ac.kr

논문접수일 : 2008년 5월 20일, 수정일 : 2008년 6월 7일(1차)
계재확정일 : 2008년 6월 13일