

2차원 선형보간법을 이용한 OFDM MIMO 시스템에서의 채널 추정

오 태 열* · 안 성 수** · 최 승 원

A Novel Channel Estimation using 2-Dimensional Linear Interpolation for OFDM MIMO systems

Oh, Tae Youl · Ahn, Sung Soo · Choi, Seung Won

〈Abstract〉

An OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) includes a MIMO(Multi-Input Multi-Output) scheme for improving spectral efficiency and data throughput. Recognizing that the performance of MIMO system is heavily dependent upon the accuracy of channel estimation, we propose a novel channel estimation for the MIMO scheme based on OFDMA. Conventional interpolation-based channel estimation suffers from poor estimation error at specific subcarriers. Proposed scheme makes use of a planar interpolation instead of linear interpolation for those subcarriers of bad accuracy. Simulation results show that the proposed scheme improves the performance of MIMO system by improving the accuracy in channel estimation especially for the adverse subcarrier positions. It is observed that the proposed scheme outperforms the conventional method by about 2dB in terms of both mean squared error and overall bit error rate with a reasonable computational complexity.

Key Words : OFDM, MIMO, Channel Estimation, Linear Interpolation

I. 서론

송수신기에 여러 개의 안테나를 사용하는 MIMO (Multiple Input Multiple Output)는 다수의 각 송신 안테나에서 독립적인 데이터를 전송하고 수신기에서는 다수의 수신 안테나로부터 받은 신호로 MIMO 디코딩을 하여 송신 데이터를 알아내는 방법으로 대역폭의 증가

없이 데이터 전송률을 증가시킬 수 있는 기술이다. OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 고속의 데이터를 N개의 부반송파에 각각 데이터를 실어 병렬로 전송한다. OFDM은 N개의 부반송파 중 일부 부반송파는 채널 추정용 파일럿 심볼로 사용한다. OFDM 기반 MIMO 시스템에서 채널 추정에 관한 연구가 활발히 되고 있다[1-6]. 기존의 선형 보간법은 주파수 축과 시간축에 대해서 모두 보간법을 이용하는 채널 추정 방법으로, OFDM 심볼의 가장 자리에 채널 추정 오차가 심한 단점이 있다[1]. 본 논문에서는 OFDMA 기반 MIMO 시

* 한양대학교 전자통신공학과 박사과정

** 명지전문대학교 정보통신과 교수

*** 한양대학교 융합전자공학부 교수(교신저자)

시스템에서 기존 선형 보간법의 채널 추정에 대한 오차를 줄이는 개선된 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 OFDM 심볼 가장 자리의 채널 추정 오차를 줄여 시스템 전체의 성능을 향상시켰다. II장에서는 OFDMA 시스템에서 수신 신호 모델링에 대해서 설명하고, III장에서는 본 논문에서 제안하는 채널 추정 방법에 대해서 설명한다. IV장에서는 OFDMA 기반 MIMO 시스템에서 본 논문이 제안하는 채널 추정 방법과 종래의 채널 추정 방법에 대한 성능을 분석하고, V장에서 결론을 내린다.

II. 수신 신호 모델

N 점 FFT(Fast Fourier Transform) 기반의 OFDM 시스템에서, 송신신호의 등가 저역 통과 모델은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$x(m, n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(m, k) e^{j2\pi k n / N}, 0 \leq n < N \quad (1)$$

여기서 N 은 FFT 크기이며, m 은 OFDM 심볼 인덱스, k 는 부반송파 인덱스, n 은 OFDM 심볼 내에서의 샘플 인덱스이다. $X(m, k)$ 는 m 번째 OFDM 심볼 시간에 k 번째 부반송파의 신호이며, $x(m, n)$ 은 IFFT(Inverse FFT) 결과로 생성된 시스템의 송신신호이다.

OFDM 심볼 시간 동안에 채널의 임펄스 응답이 변하지 않는 느린 페이딩 채널을 가정하면, OFDM 시스템의 수신신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(m, n) = \sum_{l=0}^{L-1} h(m, l) x(m, n-l) + z(m, n) \quad (2)$$

여기에서, L 은 채널 임펄스 응답의 최대지연을 나타낸다. $h(m, l)$ 은 m 번째 OFDM 심볼 시간에서의 채널의

임펄스 응답이며, $z(m, n)$ 은 AWGN(Additive White Gaussian Noise)이다.

m 번째 OFDM 심볼 동안의 수신신호, $r(m, n)$ 을 FFT한 결과는 아래와 같다.

$$R(m, k) = FFT[r(m, n)] = H(m, k) X(m, k) + Z(m, k) \quad (3)$$

여기에서 $H(m, k)$ 은 채널의 임펄스 응답, $h(m, l)$ 을 FFT한 결과이다.

$$H(m, l) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h(m, l) e^{-j2\pi k l / N} \quad (4)$$

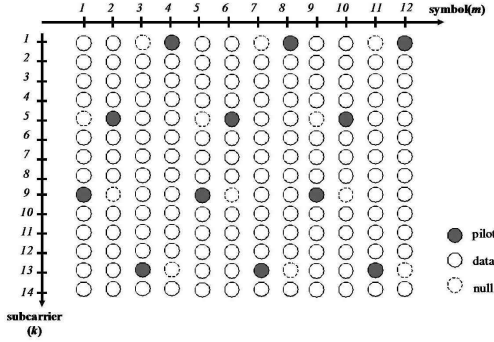
OFDM 시스템의 채널추정을 위하여 OFDM 심볼, 부반송파의 특정위치에 파일럿 신호를 삽입한다. 삽입하는 파일럿 신호의 위치는 스펙에서 정의한다.

III. 제안하는 채널 추정 방법

그림 1은 IEEE 802.16 규격에서 정의한 2개의 송신안테나를 가지는 MIMO 시스템을 위한 OFDM 심볼내에서의 파일럿과 데이터 심볼의 위치를 보여주고 있다[7]. 그림에서 널 신호 위치에는 다른 송신안테나에서 삽입한 파일럿 신호가 존재한다. 수신기에서는 각 안테나에서 삽입한 파일럿 신호를 이용하여 채널을 추정하게 된다. 먼저 일반적으로 시스템 구현에 적용된 선형 보간법을 기반한 채널 추정 방법에 대해 알아보고 본 논문에서 제안하는 채널 추정 방법에 대해 알아보기로 한다.

일반적인 선형 보간법을 기반한 채널 추정 방법은 아래와 같은 절차에 따라 진행된다. 먼저 파일럿 신호가 전송된 위치에서의 채널을 추정한다.

$$\hat{H}(m_p, k_p) = R(m_p, k_p) = H(m_p, k_p) + Z(m_p, k_p) \quad (5)$$



<그림 1> OFDM MIMO 시스템의 파일럿 위치

여기에서 (m_p, k_p) 의 m_p 는 파일럿 신호가 위치한 OFDM 심볼 인덱스, k_p 는 부반송파 인덱스이다. 그림 1을 예로 들면 (m_p, k_p) 는 다음과 같다.

$$(m_p, k_p) \in \{(1,9), (2,5), (3,13), (4,1), \dots\} \quad (6)$$

각 파일럿 신호가 삽입된 위치에서의 채널이 추정되면 특정 부반송파, $k_p (= 1,5,9,13, \dots)$ 에서 데이터 신호에서의 채널을 추정한다.

$$\hat{H}(m, k_p) = \begin{cases} \text{intpol}[\hat{H}(m_\alpha, k_p), \hat{H}(m_\beta, k_p)] \\ , m_\alpha < m < m_\beta \\ \text{extrapol}[\hat{H}(m_\alpha, k_p), \hat{H}(m_\beta, k_p)] \\ , m < m_\alpha, m > m_\beta \end{cases} \quad (7)$$

여기에서 $\text{intpol}[\cdot], \text{extrapol}[\cdot]$ 는 각각 선형 보간법과 선형 보외법 연산을 의미하는 것으로, 채널 추정하고자 하는 위치가 파일럿 신호의 사이에 있을 경우에는 선형 보간법 연산을 수행하고, 그렇지 않은 경우에는 선형 보외법 연산을 수행한다. 예를 들어, $\hat{H}(2,1)$ 의 경우 파일럿 신호들의 사이에 있지 않은 위치이기 때문에 이전 채널추정의 결과인 $\hat{H}(4,1)$ 과 $\hat{H}(8,1)$ 를 이용하여 선형 보외법을 수행하고,

$$\hat{H}(2,1) = \text{extrapol}[\hat{H}(4,1), \hat{H}(8,1)] \quad (8)$$

$\hat{H}(6,1)$ 의 경우 파일럿 신호들의 사이에 위치하기 때문에 이전 채널추정의 결과인 $\hat{H}(4,1)$ 과 $\hat{H}(8,1)$ 을 이용하여 선형 보간법을 수행한다.

$$\hat{H}(6,1) = \text{intpol}[\hat{H}(4,1), \hat{H}(8,1)] \quad (9)$$

선형 보간법과 선형 보외법은 아래와 같이 계산한다.

$$\text{intpol}[\hat{H}(m_\alpha, k_p), \hat{H}(m_\beta, k_p)] = \hat{H}(m_\alpha, k_p) \quad (10)$$

$$+ \frac{m - m_\alpha}{m_\beta - m_\alpha} (\hat{H}(m_\beta, k_p) - \hat{H}(m_\alpha, k_p))$$

$$\text{extrapol}[\hat{H}(m_\alpha, k_p), \hat{H}(m_\beta, k_p)] = \hat{H}(m_\alpha, k_p) \quad (11)$$

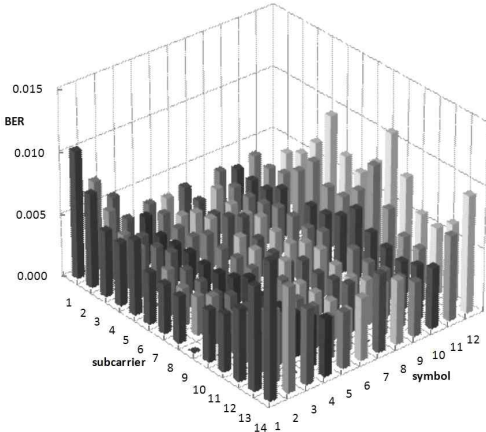
$$- \frac{m - m_\alpha}{m_\beta - m_\alpha} (\hat{H}(m_\beta, k_p) - \hat{H}(m_\alpha, k_p))$$

특정 부반송파, $k_p (= 1,5,9,13, \dots)$ 에서의 채널 추정 값을 이용하여 아래와 같이 나머지 부분에 대한 채널을 추정한다.

$$\hat{H}(m, k_p) = \begin{cases} \text{intpol}[\hat{H}(m, k_\alpha), \hat{H}(m, k_\beta)] \\ , k_\alpha < k < k_\beta \\ \text{extrapol}[\hat{H}(m, k_\alpha), \hat{H}(m, k_\beta)] \\ , k < k_\alpha, k > k_\beta \end{cases} \quad (12)$$

그림 2는 종래의 선형 보간법을 이용한 채널 추정 결과를 이용했을 때의 OFDM 심볼별, 부반송파별 BER(Bit Error Rate)을 분석한 그림이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 BER 성능은 심볼, 부반송파 인덱스에 따라 성능의 차이가 불균일하게 나타나는데, 특히 선형 보외법을 하는 위치, 예를 들어 $(m,k)=(1,1), (1,14), (12,14)$ 등에서의 BER 성능이 나빠짐을 알 수 있다. 특정 위치에서 BER 성능이 나빠지는 이유는 채널추정의 정확도가 떨어지기 때문이다. 본 논문에서 제안하는 채널추정 방식은 그림에

서와 같이 채널추정의 정확도도 비교적 좋은 선형 보간법을 하는 위치는 종래의 채널추정방법을 그대로 적용하고, 채널추정의 정확도가 떨어지는, 선형 보외법을 하는 위치에서 채널추정의 정확도를 높일 수 있는 채널추정 방법을 제안하고자 한다.



<그림 2> 일반적인 채널 추정에 의한 OFDM 심볼별, 부반송파별 BER 성능

본 논문에서 제안하는 채널추정방법은 수식 (7)에서 2개의 채널값을 이용한 선형 보외법에 의해 채널추정의 정확도가 떨어지는 것을 개선하기 위하여, 선형 보외법이 아닌 3개의 채널값을 이용하여 2차원 선형 보간법에 의해 채널을 추정하는 것이다.

$$\hat{H}(m, k_p) = \begin{cases} \text{intpol}[\hat{H}(m_\alpha, k_p), \hat{H}(m_\beta, k_p)], & m_\alpha < m < m_\beta \\ \text{intpol}2D[\hat{H}(m_\alpha, k_p), \hat{H}(m_\gamma, k_\gamma), \hat{H}(m_\delta, k_\delta)], & m < m_\alpha \\ \text{intpol}2D[\hat{H}(m'_\gamma, k'_\gamma), \hat{H}(m_\beta, k_p), \hat{H}(m'_\delta, k'_\delta)], & m > m_\beta \end{cases} \quad (13)$$

여기에서 $\text{intpol}2D[\cdot]$ 는 2차원 선형 보간법 연산을 의미하는 것으로 아래와 같은 과정을 통해 수행된다. 2

차원 선형 보간법은 기존 선형 보간법을 2차원에 적용한 것으로 4개의 3차원의 점이 하나의 평면 위에 존재한다는 가정에서 시작한다.

$$\hat{H}(m, k_p) = \text{intpol}2D[\hat{H}(m_\alpha, k_p), \hat{H}(m_\gamma, k_\gamma), \hat{H}(m_\delta, m_\delta)] \quad (14)$$

$$= \hat{H}(m_\alpha, k_p) + \frac{\Gamma_1}{\Gamma_2}(m_\alpha - m)$$

$$\Gamma_1 = (k_\delta - k_p) [\hat{H}(m_\gamma, k_\gamma) - \hat{H}(m_\alpha, k_p)] - (k_\gamma - k_p) [\hat{H}(m_\delta, k_\delta) - \hat{H}(m_\alpha, m_p)] \quad (15)$$

$$\Gamma_2 = (k_\delta - k_p)(m_\gamma - m_\alpha) - (k_\gamma - k_p)(m_\delta - m_\alpha) \quad (16)$$

예를 들어, $\hat{H}(2,1)$ 의 경우 채널값 $\hat{H}(4,1)$, $\hat{H}(2,5)$, $\hat{H}(6,5)$ 을 가지고 위에서 설명한 2차원 선형 보간법을 수행한다. 종래에 수식 (7)에서 선형 보간법을 통하여 채널 추정되는 부분을 수식 (13)과 같이 2차원 선형 보간법을 채택함으로써 복잡도의 증가 없이 채널추정의 정확도를 향상시킬 수 있다. 향상된 채널추정결과는 수식 (12)에 사용되어 다른 부분에서의 채널추정의 성능을 향상시킬 수 있다. 위에서 제안한 채널추정 성능을 알아보기 위하여 종래의 방식과 제안한 방식에 의한 채널추정의 정확도를 비교하기 위하여 시뮬레이션에 의한 MSE (Mean Square Error)와 BER를 비교 분석한다.

IV. 제안된 방법의 성능 분석

본 논문에서 제안한 채널추정 방법에 의한 채널추정의 정확도를 종래의 방법과 비교하기 위하여 채널 추정 오차의 MSE를 비교하였다. MSE는 아래와 같이 계산된다.

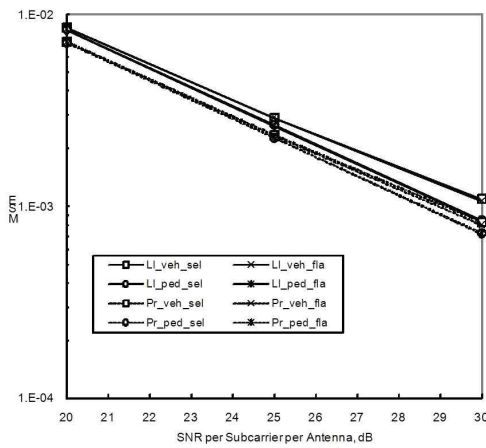
$$MSE = E \left[\frac{|\epsilon|^2}{|H(m, k)|^2} \right] = E \left[\frac{|H(m, k) - \hat{H}(m, k)|^2}{|H(m, k)|^2} \right] \quad (17)$$

$$= \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{NM} \sum_{m=1}^M \sum_{k=0}^{N-1} \left[\frac{|H(m, k) - \hat{H}(m, k)|^2}{|H(m, k)|^2} \right]$$

여기에서 $E[\cdot]$ 는 평균이다.

시뮬레이션은 IEEE 802.16에서 정의하는 OFDM MIMO 시스템에서 FFT 크기가 1024을 가정하여 수행하였다. 시뮬레이션에서 가정한 채널모델은 주파수 비선택적 채널과 ITU-R(International Telecommunication Union-Recommendations)에서 정의한 IMT2000(International Mobile Telecommunication) 주파수 선택적 채널[8]이며, 채널의 도플러 변이는 차량 속도(60km/hr), 보행자 속도(3km/hr)를 가정하였다.

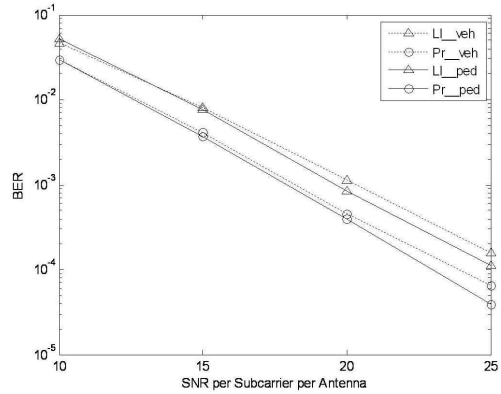
그림 3은 종래 채널추정 방법과 제안한 채널추정 방법의 MSE를 SNR(Signal To Noise Ratio)에 따라 비교한 그래프이다. 그림에서 실선은 종래의 채널추정 방법에 의한 MSE이며, 점선은 제안한 채널추정 방법에 의한 MSE이다. 사각형 및 원형은 주파수 선택적 채널을 가정한 환경의 결과 이고, x 및 *는 주파수 비선택적 채널 환경에서의 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 대부분의 채널환경에서 제안한 채널추정 방법에 의한 추정오차가 종래의 방법에 의한 추정오차보다 적음을 알 수 있다.



<그림 3> 채널 추정 방법에 대해서 신호대 잡음비에 따른 MSE 성능

그림 4는 종래의 채널추정 방법(LL_ped, LL_veh)과 제안한 채널추정 방법(Pr_ped, Pr_veh)을 SNR에 따라 BER

을 비교한 그래프이다. 그림에서 원형은 제안한 채널추정 방법을 적용했을 때의 BER이며, 삼각형은 종래의 채널추정 방법을 적용했을 때의 BER이다. 그림에서 알 수 있듯이 제안한 채널추정 방법을 적용한 MIMO 시스템의 BER 성능이 종래의 MIMO 시스템의 성능에 비해 약 2dB 정도 개선됨을 확인할 수 있다.

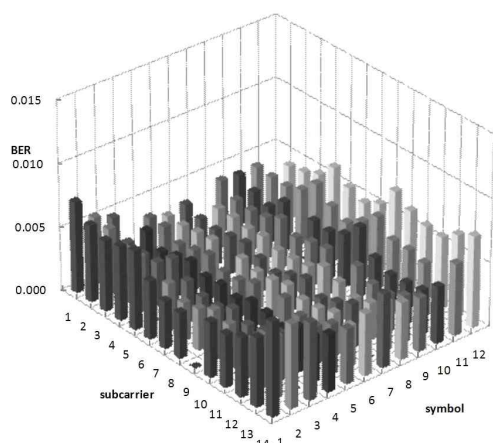


<그림 4> 페이딩 환경에서의 제안한 채널 추정 방법의 BER 성능

그림 5는 그림 2와 같이 OFDM 심볼별, 부반송파별 BER를 나타낸 그래프이다. 본 논문에서 제안한 채널추정 방법을 적용한 시스템에서는 그림 2에서 BER성능이 안 좋았던 선형 보외법 하는 위치에서의 성능 개선이 두드러지게 이루어졌음을 볼 수 있다. 즉 종래의 채널추정 방법을 적용한 시스템의 경우 심볼별, 부반송파별 BER 성능이 불균형했었는데, 제안한 채널추정방법을 적용하는 경우, BER 성능이 안 좋았던 특정 위치에서의 채널추정 정확도를 높일 수 있다.

V. 결론

본 논문은 OFDMA 기반 MIMO 시스템에서 채널 추정의 정확도를 높일 수 있는 기술을 제안하였다. 제안 기술은 기존의 선형 보간법을 기반으로 채널 추정 방법에



<그림 5> 제안한 채널 추정 방법의 각 부반송파별 BER 성능

서 정확도가 떨어지는 부분에서 2차원 선형 보간방법을 채택하였다. 종래 채널추정의 나쁜 정확도는 제안한 알고리즘을 통하여 개선시킬 수 있었다. 각 OFDMA 심볼별, 부반송파별 BER를 분석함으로써 종래기술에 비해 제안기술에 의한 채널추정 오차의 정도가 균등하게 분포됨을 확인할 수 있다. 채널추정의 정확도를 분석하기 위하여 채널추정 오차의 MSE를 다양한 채널 환경 하에서 시뮬레이션 하였다. 제안한 기술을 적용한 시스템의 BER 성능은 기존 MIMO 시스템에 비해 약 2dB 성능이 개선됨을 확인하였다. 추후 본 논문에서 제안한 알고리즘과 가우시안 보간법, cubic spline 보간법과 같은 다른 보간 기법에 대한 비교 연구가 필요할 것으로 보인다.

Acknowledgement

본 연구는 지식경제부의 지원을 받는 정보통신 표준화 및 인증 지원 사업에 연구 결과로 수행되었음.

참고문헌

[1] Meng-Han Hsieh, Che-H Wei, "Channel estimation for OFDM systems based on

comb-type pilot arrangement in frequency selective fading channels," IEEE Transactions on, Vol. 44, Issue.1, Feb. 1998, pp. 217-225.

- [2] Chen Weiwei, Zhu Qi, "Research on Interpolation Methods for Channel Estimation in the MIMO-OFDM Systems," WiCom 2007. International Conference on, Sept. 2007, pp. 306-309.
- [3] Cheng Xinmin, Xie Jianpin, "Two-Dimension Pilot-Symbol Channel Estimation Method for MIMO-OFDM System," ICMT, 2010 International Conference on, 29-31 Oct. 2010, pp. 1-3.
- [4] Sipila, T.; Haifeng Wang, "Time-domain interpolated channel estimation with noise suppression for multicarrier transmissions," Spread Spectrum Techniques and Applications, 2004 IEEE Eighth International Symposium on, 30 Aug.-2 Sept. 2004, pp. 462-466.
- [5] Zamiri-Jafarian, H.; Pasupathy, S., "Robust and Improved Channel Estimation Algorithm for MIMO-OFDM Systems," Wireless Communications, IEEE Transactions on, vol.6, no.6, June 2007, pp.2106-2113.
- [6] Doukopoulos, X.G.; Legouable, R., "Robust Channel Estimation via FFT Interpolation for Multicarrier Systems," Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th, 22-25 April 2007, pp.1861-1865, .
- [7] IEEE STD, "DRAFT Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems (Revision of IEEE Std 802.16-2004 and amended by Std 802.16f-2005 and IEEE Std 802.16e-2005)", Oct. 2007, pp.1069-1089.
- [8] International Telecommunication Union/ITU

Radiocommunication Sector, Guidelines for
Evaluation of Radio Transmission Technologies
for IMT-2000. IHS, Jan 1, 1997

■ 저자소개 ■



오 태 열
Oh, Tae Youl

2006년 3월~현재
한양대학교 전자통신공학과
박사과정
2006년 2월 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과
(이학석사)
2001년 2월 대구대학교 정보통신공학과
(이학사)

관심분야 : OFDM, MIMO, 이동통신
E-mail : tyoh@dsplab.hanyang.ac.kr



안 성 수
Ahn, Sung Soo

2002년 3월~현재
명지전문대학교 정보통신과 교수
2001년 2월 한양대학교 전자공학과(이학박사)
1990년 2월 한양대학교 전자공학과(이학석사)
1987년 2월 한양대학교 전자공학과(이학사)

관심분야 : 이동통신, MIMO, OFDMA
E-mail : ssan@mail.mjc.ac.kr



최 승 원
Choi, Seung Won

1992년 7월~현재
한양대학교 융합전자공학과 교수
1989년 12월 미국 Syracuse대학교
전자공학과(이학박사)
1985년 12월 미국 Syracuse대학교
전산학과(이학석사)
1982년 2월 서울대학교 전자통신학과(이학석사)
1980년 2월 한양대학교 전자공학과(이학사)

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

논문접수일 : 2011년 8월 18일
수정일 : 2011년 9월 8일
게재확정일 : 2011년 9월 12일