

# 다중 입출력 시스템 MMSE 연판정 간섭 제거 기법의 검출 순서에 따른 통신 성능 분석

이희권\*, 김덕찬\*\*, 김태형\*\*\*, 김용갑\*\*\*\*

## Analysis of Communication Performance According to Detection Sequence of MMSE Soft Decision Interference Cancellation Scheme for MIMO System

Hee-Kwon Lee\*, Deok-Chan Kim\*\*, Tae-Hyeong Kim\*\*\*, Yong-Kab Kim\*\*\*\*

**요약** 본 논문에서는 다중 입출력 시스템을 위한 MMSE (Minimum Mean Square Error) 기반 연판정 간섭 제거 기법의 검출 순서에 따른 BER (Bit Error Rate) 통신 성능을 분석하였다. 검출 순서 방식으로 안테나 Index 순서 방식, 채널 원소들의 절대값 크기 순서 방식, 채널 원소들의 절대값 합인 크기 순서 방식, SNR (Signal Noise Ratio) 순서 방식에 대하여 제안하였으며, 시뮬레이션을 통해 각각의 제안된 검출 순서 방식에 대한 BER 성능을 측정 및 분석하였다. 시뮬레이션 환경으로  $M \times M$  다중 입출력 시스템의 비부호화 환경에서 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 변조 방식을 사용하였으며, 독립적 레일리 감쇄 채널이 고려되었다. 시뮬레이션 결과를 통해 SNR 기반의 검출 순서 방식이 M=4 일 때 성능이득은 약 1.5dB, M=8일 경우 성능이득은 약 3.5dB, M=16일 경우 성능이득은 약 3.5dB로 안테나 수가 증가할수록 더 큰 BER 성능 향상을 확인하였으며, 이는 수신 신호의 검출 순서 방식이 검출 과정에서 발생하는 간섭 및 오류 확산을 방지하고 있음을 나타낸다.

**Abstract** In this paper, we analyzed BER (Bit Error Rate) communication performance according to the detection order of MMSE (Minimum Mean Square Error) based soft decision interference cancellation. As the detection order method, antenna index order method, absolute value magnitude order method of channel elements, absolute value sum order method of channel elements, and SNR (Signal Noise Ratio) order method are proposed. BER performance for the scheme was measured and analyzed. As a simulation environment, 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) modulation is used in an uncoded environment of an  $M \times M$  multiple-input multiple-output system, and an independent Rayleigh attenuation channel is considered. The simulation results show that the performance gain is about 1.5dB when the SNR-based detection order method is M=4, and the performance gain is about 3.5dB when M=8 and about 3.5dB when M=16. The more BER performance was confirmed, the more the detection order method of the received signal prevented the interference and error spreading occurring in the detection process.

**Key Words** : MIMO, MMSE, Soft Decision, Detection Sequence, IC, BER

\*Department of Information and Communication Engineering, Korea Wonkwang University (gmlrnjs177@naver.com)

\*\*Department of Electronic Engineering, Korea Wonkwang University

\*\*\*Department of IT Applied System Engineering, Korea Jeonbuk National University

\*\*\*\*Corresponding Author : Department of Information and Communication Engineering, Korea Wonkwang University (ykim@wku.ac.kr)

Received November 19, 2019

Revised November 19, 2019

Accepted December 07, 2019

### 1. 서론

다중 입출력 시스템(MIMO, Multiple-Input Multiple-Output)은 송신단과 수신단 각각 복수의 안테나를 사용하여 단일 입출력 시스템(SISO, single-input single-output)에 비해 전송효율 및 채널 용량을 증가시키는 것으로 알려져 있다.[1-2].

다중 입출력 시스템에서 기존의 검출 기법으로 MMSE(Minimum Mean Squared Error), ZF(Zero-Forcing), MF(Matched Filter)를 이용한 선형 검출 기법과 최적의 성능을 보이는 ML(Maximum Likelihood) 검출 기법 및 OSIC(Ordered Successive Interference Cancellation)을 적용한 비선형 검출 기법 등이 연구되어왔다. 또한 최적의 성능을 보이는 ML 검출 기법과 유사한 성능을 보이면서 복잡도는 낮추기 위한 준 최적 기법에 대한 연구가 활발히 진행중이다[3-5].

다중 입출력 시스템에서 매 시간 각각의 송신 안테나로부터 서로 다른 신호가 전송되며, 각각의 수신 안테나는 수신된 신호들을 검출해야 한다. 터보 원리를 이용한 MMSE 기반 연판정 간섭 제거 기법은 수신된 비트들의 사후 정보 (Extrinsic Information)를 계산하고, 계산된 값은 다음 반복 검출 과정에서 사전 정보 (A Priori Information)로 활용하여 성능 개선을 도모한다. 이러한 MMSE 기반 연판정 간섭 제거 기법은 최적의 성능을 보이는 연판정 MAP (Maximum A Posteriori) 기반 검출 기법보다 낮은 연산량을 요구하는 준최적 검출 기법으로 알려져 있다[6-8].

다중 입출력 시스템에서 안테나의 개수가 증가할수록 전송시 수신되는 신호 또한 증가한다. 이는 수신된 신호를 검출하는 과정에서 서로 다른 신호들의 간섭 또한 증가하며 성능을 저하시키는 원인이 되기도 한다. 순차적 간섭제거(SIC, Successive Interference Cancellation) 기법은 수신된 신호를 순차적으로 검출하여 통신 성능을 향상시키는 기법으로 알려져있다. 수신된 신호를 검출하는 과정에서 발생하는 오류확산을 최소화 하여 수신 신호의 간섭 최소화 및 성능 저하를 예방할 수 있다[9-11].

본 논문에서는 기존에 연구된 MMSE 기반 연판정

간섭 제거 기법을 활용하여 검출 순서 방식에 대한 통신 성능을 분석하였다. 검출 순서 방식은 안테나 배열에 의한 안테나 index 순서 방식, 채널 원소들의 크기에 의한 순서 방식, SNR 크기에 의한 순서 방식을 제안한다. 비부호화 환경의  $M \times M$  MIMO 시스템에서 16-QAM(Quadrature Amplitude Modulation)을 변조 방식을 이용하였다. 시뮬레이션을 통해 제안된 검출 순서 방식 중 SNR 크기에 의한 순서 방식에서 안테나 수가 증가할수록 성능 개선에 우수함을 확인하였다.

### 2. 시스템 모델

#### 2.1 MIMO 시스템

송신 안테나 개수는  $N_T$ , 수신 안테나의 개수  $N_R$ 이다. 변조 방식으로는 16QAM 방식을 적용하였으며, 매 전송 과정의 송신 심볼 벡터  $s = [s_1, \dots, s_{N_T}]^T$  생성, 이때 수신 신호 벡터  $r$ 에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$r = Hs + n \tag{1}$$

$r$ 은  $N_R \times 1$ 의 수신 신호 벡터이며  $n$ 은  $N_R \times 1$ 의 잡음 벡터로 평균이 0이며  $\sigma^2$ 의 분산을 지닌다.  $H$ 는  $N_R \times N_T$ 의 채널 행렬이며  $h_i$ 는  $H$ 의  $i$ 번째 열을 나타내며 평균은 0이며 분산은 1을 지닌 복소 가우시안 확률 변수이다.

#### 2.2 경판정 MMSE 검출 기법

경판정 MMSE 검출 기법은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G_{MMSE} = (H^H H + \sigma_n^2 I)^{-1} H^H \tag{2}$$

MMSE 검출 기법은 선형 검출 기법 중 일반적인 통신 상황에서 복잡도 대비 우수한 성능을 보이며, 잡음에 강한 특징을 지닌다.

### 2.3 연판정 MMSE 검출 기법

연판정 MMSE 검출 과정은 다음과 같이 진행된다.

1) 연 판정 벡터  $\tilde{x} = [\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_{N_T}]^T$ 를 모두 0으로 초기화하고 나머지 간섭 분산 벡터  $v = [v_1, v_2, \dots, v_{N_T}]^T$ 를 모두 1로 초기화한다.

2)  $i = 1, 2, \dots, N_T$  (분석의 단순화를 위해 검출 순서가 있다고 가정한다.) 연판정 간섭 제거 된 신호 벡터는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$r_{IC,i} = r - \sum_{j=1, j \neq i}^{N_T} h_j \tilde{x}_j \quad (3)$$

식 (3)에서  $\tilde{x}_i$ 를 구하기 위한 MMSE 필터링 벡터는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_i^M = h_i^H (H D_i H^H + N_0 I_{N_r})^{-1} = h_i^H R_i^{-1} \quad (4)$$

식 (4)에서  $h_i$ 는  $H$ 의  $i$ 번째 열이고  $R_i = (H D_i H^H + N_0 I_{N_r})$ 이며,  $D_i$ 는  $i$ 번째 대각선 요소가 1로 설정되는 것을 제외하면 대각선에 간섭 분산 벡터  $v$ 를 갖는 대각 행렬이다. 연판정 벡터와 간섭 분산 벡터는 다음과 같이 정보를 업데이트 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varphi_{i,q}^M &= - |f_{i,q}^M r_{IC,i} - \mu_i^M a_q|^2 / [\mu_i^M (1 - \mu_i^M)] \\ \tilde{x}_i &= [\sum_{q=1}^Q a_q \exp(\varphi_{i,q}^M)] / [\sum_{q=1}^Q \exp(\varphi_{i,q}^M)] \\ v_i &= [\sum_{q=1}^Q |a_q - \tilde{x}_i|^2 \exp(\varphi_{i,q}^M)] / [\sum_{q=1}^Q \exp(\varphi_{i,q}^M)] \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 심볼 수  $q = [1, 2, 3, \dots, Q]$ 는 변조 방식에 의한 심볼 수에 해당한다.  $\mu_i^M = f_i^M h_i$ 이며,  $x_i, \varphi_{i,q}^M$ 를 검출하기 위한 MMSE 필터링의 바이어스이며 본 논문에서 MMSE-ISDIC의 메트릭이라고 한다.

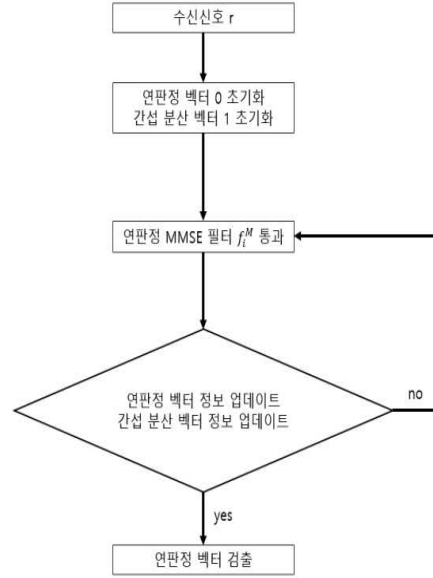


그림 1. 연판정 MMSE 검출 알고리즘  
Fig. 1. Soft decision MMSE detection algorithm

그림 1은 수신된 신호를 연판정 MMSE 필터를 통해 검출하는 과정을 나타낸다. 연판정 벡터  $\tilde{x}$  값을 0으로 초기화하고 간섭 분산 벡터  $v$ 를 1로 초기화한다. 초기화된 연판정 벡터와 간섭 분산 벡터를 이용하여 연판정 MMSE 필터를 통과하여 연판정 벡터 정보와 간섭 분산 벡터 정보를 업데이트한다. 업데이트된 연판정 벡터는 수신된 신호에 대한 검출 데이터로 비트오율을 측정하여 성능을 확인하였다. 업데이트된 연판정 벡터 정보와 간섭 분산 벡터 정보를 반복하여 반복 연판정 MMSE 검출을 수행할 수 있다. 본 논문에서는 검출 순서에 따른 통신 성능을 중점으로 해석하기 위해 결과값의 연판정 횟수는 1회로 설정하였다.

### 2.4 검출 순서 방식

#### 2.4.1 안테나 index 순서 방식

수신 안테나의 배열 또는 안테나에 수신된 신호의 순서대로 검출하는 방식이다. 송신 안테나의 개수에 따른 배열을 가정하고 배열된 안테나의 역순으로 검출을 진행하였다. 성능은 임의로 결정하는 방식과 동일하며, 다른 검출 순서 방식들에 비해 복잡도는 낮

으나 성능 개선의 영향 또한 낮다.

2.4.2 채널 원소들의 절대값 크기 순서 방식

송신 안테나의 개수와 수신 안테나의 개수가 같은 시스템 모델을 사용하였다. 이에 따라 채널  $H$ 는  $n \times n$  행렬을 가지게 된다. 채널  $H$ 의 절대값 중 가장 큰 값을 가지는  $n$ 번째 송신 안테나 순으로 검출을 진행하였다. 검출된 안테나의 채널 값은 채널  $H$ 의  $n$ 번째 열 벡터이다.

2.4.3 채널 원소들의 절대값 합 크기 순서 방식

송신 안테나의 개수와 수신 안테나의 개수가 같은 시스템 모델을 사용하였다. 이에 따라 채널  $H$ 는  $n \times n$  행렬을 가지게 된다. 채널  $H$ 의 절대값의 열 벡터를 합하여 가장 큰 값을 가지는  $n$ 번째 송신 안테나 순으로 검출을 진행하였다. 검출된 안테나의 채널 값은 채널  $H$ 의  $n$ 번째 열 벡터이다.

2.4.4 SNR 순서 방식

각각의 송신 안테나에 대한 정확한 SNR을 계산하기 위하여 식 (2)의 경판정 MMSE 필터를 이용하였다. 경판정 MMSE 필터의 행 벡터와 채널  $H$ 의 열 벡터를 곱한 뒤 실수를 취하여 얻은 결과를 ordermean이라고 하며, SNR 크기는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$SNR_{value} = ordermean./ (1 - ordermean) \quad (6)$$

식 (6)을 통해 얻은 SNR 값이 큰 송신 안테나 순서로 검출을 진행하였다. 매 전송시 안테나의 개수만큼 ordermean을 구하는 과정과 식 (6)의 과정을 반복하게 되면서 연산량이 증가하기 때문에 비교적 복잡도는 높으나, 다른 방식들과 비교시 안테나 수가 증가할수록 성능 개선에 우수한 효과를 보임을 확인하였다.

3. 시뮬레이션

본 논문에서는 MMSE 연판정 간섭 제거 기법에서 검출 순서에 따른 BER 성능을 분석하기 위하여

$M \times M$  MIMO 시스템을 고려하였다. 16-QAM 변조방식을 사용하였으며, 실험 채널은 독립적 레일리 감쇄 채널이 고려되었다. 안테나 Index 순서 방식, 채널 원소들의 절대값 크기 순서 방식, 채널 원소들의 절대값 합에 의한 순서 방식, SNR 순서 방식 총 4가지 방식에 대해 시뮬레이션을 진행하였다.

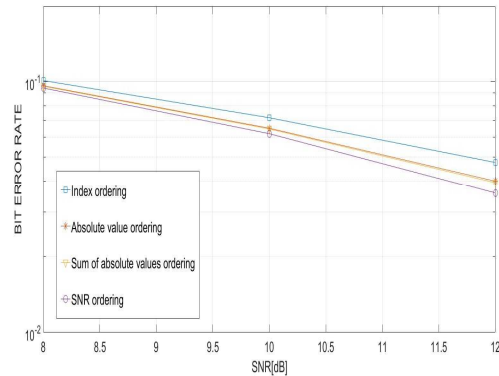


그림 2.  $4 \times 4$  MIMO 시스템의 검출 방식별 BER 성능  
Fig. 2. BER Performance by Detection method of  $4 \times 4$  MIMO system

그림 2는  $M=4$  일 때  $4 \times 4$  MIMO 시스템에서 검출 순서 방식에 따른 BER에 대한 결과를 나타내고 있으며, 그림의 x축은 수신 안테나에서 수신된 신호의 전력과 잡음의 전력 비를 의미한다. 안테나 Index 순서 방식과 SNR 순서 방식이 가장 큰 성능 차이를 보였으며, SNR 순서 방식이 안테나 Index 순서 방식보다 약 1.5[dB]의 성능이 우수함을 확인하였다.

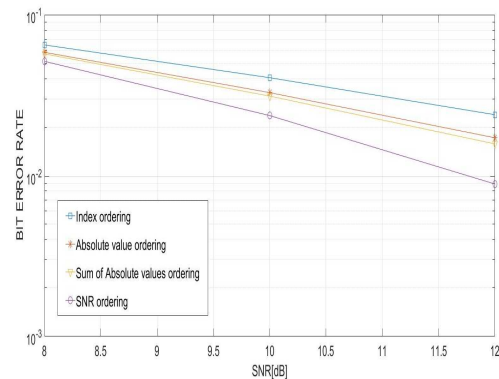


그림 3.  $8 \times 8$  MIMO 시스템의 검출 방식별 BER 성능  
Fig. 3. BER Performance by Detection method of  $8 \times 8$  MIMO system

그림 3는  $M=8$  일 때  $8 \times 8$  MIMO 시스템에서 검출 순서 방식에 따른 BER에 대한 결과를 나타내고 있으며, 안테나 Index 순서 방식, 채널 원소들의 절대값 크기 순서 방식, 채널 원소들의 절대값 합 크기의 순서 방식, SNR 순서 방식 순서로 성능 개선도가 우수함을 확인하였다. 그림 2와 마찬가지로 안테나 Index 순서 방식과 SNR 순서 방식이 가장 큰 성능 차이를 보였으며, SNR 순서 방식이 안테나 Index 순서 방식보다 약 3.5[dB]의 성능이 우수함을 확인하였다. 또한 SNR[dB]가 증가할수록 안테나 Index 순서 방식과 SNR 순서 방식의 성능의 격차가 커졌으며 12[dB]에서 약 1.7배의 성능 차이를 나타낸다. 채널 원소들의 절대값 크기 순서 방식과 채널 원소들의 절대값 합 크기의 순서 방식은 거의 동일한 성능을 나타내었으며, 그림 2와 비교시  $M \times M$  시스템에서 안테나 개수가 증가할수록 검출 순서 방식이 BER 성능 개선에 효과적임을 확인하였다.

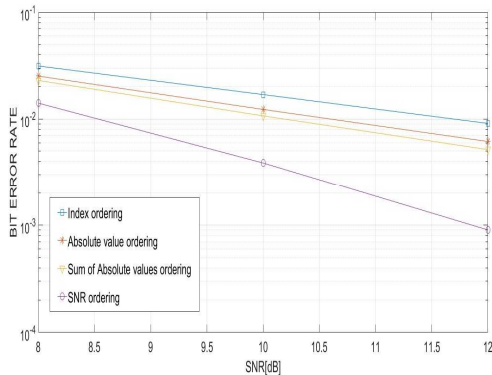


그림 4.  $16 \times 16$  MIMO 시스템의 검출 방식별 BER 성능  
Fig. 4. BER Performance by Detection method of  $16 \times 16$  MIMO system

그림 4는  $M=16$  일 때  $16 \times 16$  MIMO 시스템에서 검출 순서 방식에 따른 BER에 대한 결과를 나타낸다. 성능을 나타낸다. 그림 3과 마찬가지로 안테나 Index 순서 방식과 SNR 순서 방식이 가장 큰 성능 차이를 보였으며, SNR 순서 방식이 안테나 Index 순서 방식보다 약 3.5[dB]의 성능이 우수하였으며, 채널 원소들을 이용한 순서 방식보다 약 2.5[dB]의 성능이 우수함을 확인하였다. 또한 12[dB]

에서 SNR 순서 방식이 안테나 Index 순서 방식 보다 약 10배의 BER 성능이 우수함을 확인하였다. 그림 3과 비교시 안테나 증가에 따른 동일한 SNR에서 약 5배의 BER 성능이 증가함을 확인하였다.

MMSE 연관정 간섭 제거 기법의 검출 순서 방식이  $M \times M$  다중 입출력 시스템에서 안테나 개수가 증가할수록 BER 성능 개선에 효과적이며, SNR 순서 방식에서 가장 큰 성능 향상을 이룸을 확인할 수 있다. 이는 다중 입출력 시스템에서 수신 신호를 검출하는 과정에서 발생하는 오류 확산 및 간섭을 최소화하여 성능 향상 및 성능 저하 방지를 나타낸다.

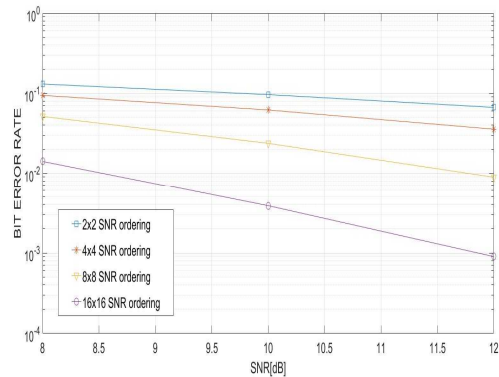


그림 5.  $M \times M$  MIMO 시스템의 SNR 기반 검출 순서 방식 BER 성능  
Fig. 5. SNR-based Detection Order Method BER Performance of  $M \times M$  MIMO system

그림 5는  $M=2, 4, 8, 16$  일 때  $M \times M$  MIMO 시스템의 SNR 기반 검출 순서 방식에 따른 BER 결과를 나타낸다.  $M=16$  일 때 SNR[dB]의 증가에 따른 가장 큰 BER 성능 향상을 확인하였으며, 12 SNR[dB]에서  $M=2$  일 때와 비교시 약 78배의 BER 성능이 우수함을 확인하였다. 이는 다중 입출력 시스템에서 안테나 수가 증가할수록 BER 성능은 더 향상 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는  $M \times M$  다중 입출력 시스템에서 MMSE 연관정 간섭 제거 기법의 검출 순서 방식에 따른 BER 성능을 분석하였다. 채널 원소들의 절대값

크기 순서 방식과 채널 원소들의 절대값 합의 크기 순서 방식의 BER 성능은 거의 근사하였으며, 채널 원소들의 절대값 합의 크기 순서 방식이 조금 더 우수함을 시뮬레이션 결과를 통해 확인하였다. 안테나 Index 순서 방식은 가장 낮은 성능 향상을 보였으며, SNR 순서 방식이 가장 큰 BER 성능 향상을 이룸을 확인하였다.  $M=4$  일 때 제안된 검출 순서 방식에서 가장 큰 성능 이득은 약 1.5[dB]이며,  $M=8$  일 때 가장 큰 성능 이득은 약 3.5[dB]이며,  $M=16$  일 때 가장 큰 성능 이득은 3.5[dB]임을 확인하였다. 또한 안테나 수가 증가할수록 더 큰 BER 성능 향상을 보였으며,  $M=16$  일 때 12 SNR[dB]에서  $M=2$  일 때와 비교시 BER 성능이 약 78배 우수함을 확인하였다. 검출 순서 방식을 이용하여 검출 과정에서 발생하는 오류 확산을 방지하고 간섭을 최소화 하여 성능 저하를 방지하고 성능을 개선함을 확인하였다.

본 연구 결과는 MIMO 시스템의 MMSE 연판정 Group 검출 기법에서 효과적인 Group을 설정하는데 활용하고자 한다. Group 설정은 수신된 신호를 검출하는 과정에서 발생하는 오류확산 및 성능 저하를 방지하고 간섭을 최소화 하여 BER 성능을 개선하는 연구를 진행하는데 활용하고자 한다.

## REFERENCES

- [1] David J. Love, Robert W. Heath, Thomas Strohmer, "Grassmannian Beamforming for Multiple-Input Multiple-Output Wireless Systems," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2735-2747, October 2007.
- [2] Deok-Won Yun, Sung-Uk Huh, Chun-Won Kim, Yong-Tae Choi, Won-Cheol Lee, "Performance Analysis of Adaptive SC/MRC Diversity Combining using in AWGN," *Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, vol. 11, no. 6, pp. 757-763, December 2018.
- [3] Sangjoon Park, Sooyong Choi, "An Iterative MMSE-SIC Scheme with Group Shuffled BP Decoding for MIMO Systems," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 35, no. 10, pp. 815-821, October 2010.
- [4] Yang Yu-Sik, Kim Jae-Kwon, "Performance Analysis of SIC-based Signal Detection Methods in MIMO Systems," *Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 189-196, September 2011
- [5] Vahid Tarokh, Siavash M. Alamouti, Visa Koivunen, and KiHo Kim, "MIMO-OFDM and Its Application," *Journal of Communications and Networks*, vol. 9, no. 2, pp. 109-111, June 2007.
- [6] Sangjoon Park, Sooyong Choi, "An MMSE Based Iterative Soft Decision Interference Cancellation Scheme for Massive MIMO Systems," *The Journal of The Korean Institute of Communication Sciences*, vol. 39, no. 9, pp. 566-568, September 2014.
- [7] Feifei Cao, Jiandong Li, Jiawei Yang, "On the Relation Between PDA and MMSE-ISDIC," *IEEE Trans. Signal. Processing*, vol. 14, no. 9, September 2007.
- [8] Kim Jae-kwon, "A Comparative Study on Reliability Enhancement Techniques of Soft Output in MIMO Systems," *Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, vol. 6, no. 4, pp. 255-261, December 2013.
- [9] Khanh Pham, Kyungchun Lee, "Low-Complexity SIC Detection Algorithms for Multiple-Input Multiple-Output Systems," *IEEE Trans. Signal. Processing*, vol. 63, no. 17, September 2015.
- [10] Tsung-Hsien Liu, "Comparisons of Two

Real-Valued MIMO Signal Models and Their Associated ZF-SIC Detectors over the Rayleigh Fading Channel," IEEE Trans. Wireless Communication, vol. 12, no. 12, December 2013.

[11] Ui-Kun Kwon, Gi-Hong Im, Jong-Bu Lim, "MIMO Spatial Multiplexing Technique With Transmit Diversity," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 16, no. 7, July 2009.

---

저자약력

---

이 희 권(Hee-Kwon Lee)

[정회원]



- 2018년 원광대학교 정보통신공학과 졸업(공학사)
- 2018년~현재 원광대학교 정보통신공학과 석사과정

〈관심분야〉 무선통신, 이동통신, 다중 입출력 시스템, 통신 신호처리 등

김 덕 찬(Deok-Chan Kim)

[정회원]



- 2014년~현재 원광대학교 전자공학과 학사과정

〈관심분야〉 전자회로, 신호처리, 전자제어 등

김 용 갑(Yong-Kab Kim)

[정회원]



- 1988년 이주대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1993년 앨라바마 주립대학교 (공학석사)
- 2000년 노스캐롤라이나 주립대학교 (공학박사)
- 2003년~현재 원광대학교 정보통신공학과 교수
- 2006년~2013년 공과대학 POST-BK21 사업단장
- 2012년~2015년 원광대학교 창업보육센터장
- 2014년~2015년 원광대학교 창업지원단장
- 2012년~현재 LED 인력양성사업단장(전북)

〈관심분야〉 가시광통신시스템, 광메모리센서, 전력선통신