

# MIMO-IBFD 시스템의 성능 평가 및 분석

안창영\*, 궁경록\*, 김병재\*\*, 유흥균<sup>o</sup>

## Performance Evaluation and Analysis of MIMO-IBFD Systems

Changyoung An\*, Kyung-Lok Kung\*, Byeongjae Kim\*\*, Heung-Gyoon Ryu<sup>o</sup>

### 요약

본 논문에서는 동일대역에서 동시에 다중스트림을 송수신하는 MIMO-IBFD 시스템을 제안하고 이 시스템의 기본 구조를 분석하였다. MIMO-IBFD 시스템은 기존의 IBFD 시스템보다 많은 수의 RF 영역 및 디지털 영역의 자기간섭제거 기술이 요구됨을 파악하였다. 시뮬레이션을 통하여 기본적인 2x2 MIMO 시스템과 2x2 MIMO-IBFD 시스템의 BER 성능 특성을 비교 분석하였다. 시뮬레이션 결과를 통해, 다단계의 RF 및 디지털 영역의 자기간섭 신호 제거 기술을 사용하여 다양한 특성의 자기간섭신호를 제거하고 상대국에서 보낸 목표신호를 수신할 수 있음을 확인하였으며, 저차 변조에서는 2x2 MIMO-IBFD 시스템은 선형조건에서 기존의 2x2 MIMO 시스템과 유사한 성능을 낼 수 있는 것을 확인하였다. 그러나 변조의 차수가 증가할수록 성능 열화의 정도가 더욱 심해지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 MIMO-IBFD 시스템이 고차변조를 이용하기 위해서는 더욱 높은 수준의 자기간섭제거 기술이 요구됨을 확인할 수 있다.

**Key Words** : full-duplex, MIMO, self-interference, SIC, MIMO-IBFD

### ABSTRACT

In this paper, we have proposed MIMO-IBFD system that can transmit and receive multiple data stream at the same time in the single band, and analyze the system. We have confirmed that MIMO-IBFD system requires multiple RF cancellation and multiple Digital cancellation techniques. In simulation, we have analyzed characteristic of received signal on MIMO-IBFD system, and evaluate system performance of conventional 2x2 MIMO system and MIMO-IBFD system. As simulation results, we have confirmed that MIMO-IBFD system can transmit and receive multiple data stream at the same time in the single band by using multiple RF and digital cancellation techniques. Additionally, we have confirmed that BER performance of 2x2 MIMO-IBFD system with low-level QAM modulation is similar to performance of 2x2 MIMO system, and BER performance of 2x2 MIMO-IBFD system with high-level QAM modulation is degraded in comparison with 2x2 MIMO system with high-level QAM modulation. We can confirm that MIMO-IBFD system requires high level self-interference cancellation technique in order to use high level modulation.

\* First Author : Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University, acy890217@naver.com, 학생회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : Department of Electronic Engineering/Research Institute for Computer and Information Communication, Chungbuk National University, ecomm@cbu.ac.kr, 정회원

\* Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University, kkr427@hanmail.net, 학생회원

\*\* Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University, bj5236@nate.com, 학생회원

논문번호 : 2015-11-371, Received November 23, 2015; Revised March 21, 2016; Accepted April 28, 2016

## I. 서 론

최근 다양한 모바일 기기들이 증가하고 있으며, 고용량 멀티미디어 서비스가 증가하고 있다. 더욱이 이러한 고용량 콘텐츠를 지원하는 모바일 기기들은 앞으로 더욱더 증가될 것이다. 이러한 모바일 기기들을 지원하기 위해서는 보다 높은 통신 용량을 갖는 무선 통신 시스템이 필요하다. 현재 무선통신 시스템의 통신용량을 향상시키기 위한 다양한 연구들이 이루어지고 있다. 이러한 연구들 중에는 IBFD(In-Band Full-Duplex), Advanced MIMO(Multiple Input Multiple Output) 시스템들에 대한 연구가 있다<sup>[1-2]</sup>.

우선 IBFD 기술은 동일한 주파수대역에서 동시에 송신과 수신하는 시스템으로 채널 용량을 약 2배 향상시킬 수 있는 기술이다. 이 시스템에서는 동시에 송수신하기 때문에 발생하는 자기간섭신호를 효과적으로 제거하는 것이 핵심이다<sup>[3]</sup>. 자기간섭신호는 그 크기가 매우 크기 때문에 이를 제거하지 않을 경우 상대방에서 보낸 목표신호를 수신할 수 없으며, 잔류 자기간섭신호의 크기에 따라 달성할 수 있는 채널 용량이 열화 될 수 있다. 이러한 IBFD에 대한 연구는 다양한 테스트베드 구현하여 시연함으로써 이 시스템에 대한 미래 발전 가능성을 보여주었다<sup>[3]</sup>.

다음, MIMO 기술은 다수의 송수신 안테나를 이용하여 채널 용량을 향상시키는 기술이다. MIMO 기술은 신호의 품질을 향상시키는 다이버시티(Diversity) 기술과 전송 속도를 향상시키는 다중화(Multiplexing) 기술로 나뉜다. MIMO 기술은 사용하는 안테나를 증가시키면 증가시킬수록 채널 용량을 더욱 향상시킬 수 있다<sup>[4]</sup>. 더욱이 MIMO 기술은 추가적인 대역폭이나 추가적인 전력의 오버헤드를 요구하지 않는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점으로 인하여 MIMO 기술은 차세대 무선통신 시스템의 채널 용량을 극적으로 향상시키기 위한 핵심 기술로 주목받고 있다<sup>[5]</sup>. 현재 차세대 무선통신 시스템을 위한 연구에서는 MIMO 시스템의 안테나를 크게 증가시킨 Massive MIMO 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>[6]</sup>.

이러한 IBFD 및 MIMO 기술은 각각 채널 용량을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 미래의 통신 시스템이 더욱 높은 채널 용량을 요구할 것으로 전망됨에 따라, 이러한 요구를 충족시키기 위하여 IBFD 시스템에 MIMO 기술을 결합하여 채널 용량을 더욱 향상시키려는 연구가 이루어지고 있다<sup>[7]</sup>. 동일 대역에서 동시에 다수의 안테나를 통해 송수신을 하는 MIMO-IBFD 기술은 채널용량을 극대화시킬 수 있는

장점을 가지고 있다. 그러나 MIMO-IBFD 시스템은 IBFD 시스템과 MIMO 시스템이 갖는 각각의 단점을 모두 갖는다. MIMO-IBFD 시스템은 더욱 더 많은 송수신 안테나로 인해 더욱 더 많은 자기간섭신호가 발생되며, 다수의 RF 체인에 의한 시스템 복잡도 상승 및 전력소모 증가, RF 체인 간 간섭등과 같은 문제가 발생할 수 있다<sup>[7]</sup>. 이러한 문제점들은 전체적인 시스템의 성능 열화 및 채널용량 감소 문제를 야기할 수 있다. MIMO-IBFD 시스템은 이러한 문제점을 효과적으로 극복해야 한다. 특히, 우선적으로 다수의 안테나에서 발생하는 자기간섭신호를 효과적으로 제거하는 것이 가장 중요하다. 자기간섭신호를 제거하지 않을 경우 상대방에서 보낸 어떠한 신호도 수신할 수 없다. 이러한 심화된 자기간섭신호를 제거하기 위해서는 더욱 향상된 자기간섭제거 기술이 필요하다. 이러한 향상된 자기간섭신호 제거기술은 디지털 영역 및 RF 영역의 추가적인 자기간섭제거 기술을 적용하여 구현할 수 있다. 그러나 이러한 기본적인 자기간섭제거 개념은 다수의 RF 체인의 시스템 복잡도와 함께 MIMO-IBFD 시스템의 전체적인 시스템 복잡도를 크게 증가시킬 것이며, 더욱 더 심화된 RF 소자의 비선형 문제 및 ADC(Analog to Digital Converter) 포화 문제를 야기할 것이다. 이러한 문제점은 향후에 지속적인 연구를 통해 해결되어야 할 것이다.

우선, 본 논문에서는 채널 용량을 극대화 할 수 있는 MIMO-IBFD 시스템의 효과적인 구현을 위한 기초 연구로, 송수신기가 같은 안테나를 사용하는 MIMO-IBFD 시스템의 기본적인 구성 및 개요에 대한 설명과 MIMO-IBFD 시스템에서 요구하는 자기간섭기술을 알아본다. 그리고 기본적인 자기간섭신호 제거 기술을 갖는 MIMO-IBFD 시스템을 설계하고, 시뮬레이션을 통해 이 시스템의 신호 특성을 분석하고 전체적인 시스템 성능을 평가한다. 특히, MIMO-IBFD 시스템이 기존의 MIMO 시스템과 같이 고차 변조를 효과적으로 수행할 수 있는지 확인하기 위하여, 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM 변조를 사용하여 시스템 성능을 평가한다.

## II. SISO-IBFD 시스템

### 2.1 시스템 모델

IBFD 시스템은 동일 대역에서 동시에 송신과 수신을 하는 시스템이다. 이 시스템은 기존의 TDD(Time Division Duplex) 및 FDD(Frequency Division Duplex) 방식의 이중통신에 비하여 약 2배 높은 스펙

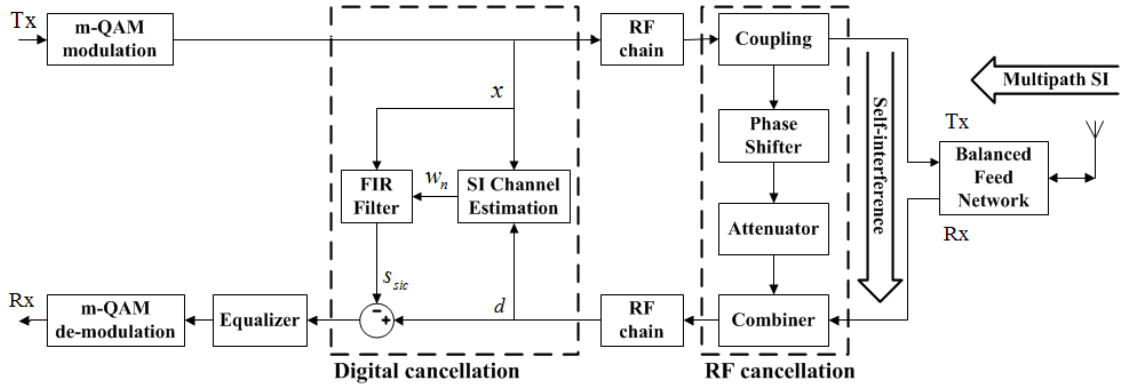


그림 1. IBFD 시스템의 구성도  
Fig. 1. Block diagram of IBFD system.

트럼 효율을 갖는다. 그러나 이러한 스펙트럼 효율 향상을 얻기 위해서 IBFD 시스템은 자기간섭신호 제거 기술을 요구한다. IBFD 시스템은 동일 주파수 대역에서 동시에 송신신호와 수신신호가 존재하기 때문에 서로 간섭을 일으킨다. 다시 말해서 자국의 송신기에서 송신된 신호가 자국의 수신기로 수신될 수 있다. 이때, 이 자기간섭신호의 크기는 상대국에서 보낸 목표신호에 비하여 그 크기가 매우 크다. 따라서 이러한 자기간섭 신호를 제거하지 않을 경우 상대국에서 보낸 목표신호를 수신할 수 없다. IBFD 시스템에서는 자기간섭신호를 제거하기 위해 RF 영역과 디지털 영역의 자기간섭제거 기술을 사용한다.

그림 1은 단일 안테나를 사용하는 IBFD 시스템의 구성도를 나타낸다. IBFD 시스템에서는 크게 두 종류의 자기간섭신호가 자국의 수신기로 유입될 수 있다. 우선 BFN(Balanced Feed Network)의 회로에서 송신 신호의 일부가 자국의 수신기로 유입될 수 있다. 이 회로는 송신신호와 수신신호를 격리시켜주는 역할을 하지만 완벽하게 두 신호를 격리시킬 수 없다. 따라서 일부 송신신호가 자국의 수신기로 유입되게 된다. 추가로 자국에서 안테나를 거쳐 송신된 신호가 다중경로를 거쳐 다시 자국의 안테나로 수신되어 자기간섭을 일으킬 수 있다. 이러한 자기간섭신호를 다중경로 자기간섭 신호라고 한다. IBFD 시스템에서는 이 두 가지 종류의 자기간섭신호를 제거해야 한다. 자기간섭신호를 제거하기 위하여 우선 RF 영역에서 RF Cancellation을 수행하여 자기간섭신호를 1차적으로 제거하며, 이후 디지털 영역에서 Digital Cancellation을 통해 나머지 잔류 자기간섭신호를 제거한다. 모든 자기간섭신호 제거 과정이 완료된 후 수신된 신호를 등화하고 복조하여 상대국에서 보낸 정보신호를 수신

한다.

두 가지 종류의 자기간섭신호는 비선형의 RF 소자를 통과하여 수신기로 유입되기 때문에 그 성분이 왜곡되어진다. 더욱이 다중경로 자기간섭신호의 경우 다중경로 환경이 유동적으로 바뀔 수 있다. 다중경로 환경의 변화로 인하여 자기간섭신호의 특성 또한 유동적으로 변화하게 된다. 따라서 이러한 상황을 충분히 고려하여 RF 영역과 디지털 영역에서 자기간섭신호를 제거해야 한다. 일반적으로 RF Cancellation 회로는 위상천이기와 감쇄기를 사용하여 구성하며, Digital Cancellation의 경우 자기간섭신호의 왜곡 및 변화를 추정하기 위하여 선형 및 비선형 추정 알고리즘을 사용한다<sup>8-9)</sup>.

### 2.2 Balanced Feed Network

일반적인 단일 안테나 시스템에서 송신 신호와 수신 신호를 격리시키는 소자로 Circulator가 잘 알려져 있다. Circulator는 3개의 포트를 갖으며 예를 들어 A, B, C 포트가 순서대로 있다면, A의 신호는 B포트로 이동하고, B 포트의 신호는 C로, C포트의 신호는 A로 이동하게 된다. 이상적으로는 이와 같이 한 방향으로만 신호를 통과시켜야 하지만 실제 소자는 일부 신

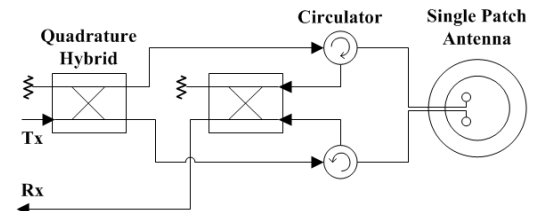


그림 2. Balanced Feed Network의 구성도  
Fig. 2. Block diagram of balanced feed network.

호가 원하지 않는 포트 방향으로 누설되게 된다. 일반적으로 송수신기를 Circulator로 격리시킬 경우 약 25dB의 격리도를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다<sup>9)</sup>. 추가적으로 RF Cancellation이 수행되어 자기간섭신호를 추가적으로 제거하지만 이러한 RF Cancellation만으로 자기간섭신호를 제거하기에는 효과적이지 못하다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 2개의 Circulator와 2개의 Quadrature Hybrid 소자를 이용한 Balanced Feed Network가 제안되었고, 이 회로는 약 45dB의 격리도를 갖는다<sup>9)</sup>.

### 2.3 Digital Cancellation

디지털 영역에서 자기간섭신호 제거를 위해서는 우선, 디지털 영역의 송신 신호와 수신된 자기간섭 신호를 이용하여 자기간섭 채널을 추정한다. 본 논문에서는 자기간섭채널 추정 알고리즘으로 LMS(Least Mean Square) 알고리즘을 사용한다. 자기간섭채널 추정을 위해서는 입력신호로 자국의 송신 신호를 사용하고, 목표 신호로 자기간섭신호가 포함된 수신 신호를 사용한다. LMS 알고리즘을 이용하여 자기간섭채널을 추정하면, 자기간섭 채널 계수를 얻을 수 있으며, 자국의 송신 신호를 이 계수가 적용된 FIR 필터에 입력하면, 자기간섭신호와 근사한 신호를 얻을 수 있다. 이렇게 필터를 이용해 계산된 신호를 수신신호에서 빼주면, 수신신호의 자기간섭신호가 제거된다. 이러한 LMS 알고리즘에서 입력신호와 목표신호간의 오차를 나타내는 식은 다음과 같다<sup>8)</sup>.

$$e_n = d_n - W_n^H X_n \quad (1)$$

여기에서  $W_n^H$ 는 FIR 필터에 적용되는 추정된 계수를 나타내며,  $X_n$ 는 입력 신호,  $d_n$ 는 목표 신호를 나타낸다. LMS 알고리즘은 입력신호를 목표신호와 유사하게 하는 FIR 필터의 계수를 찾기 위해 식 (1)의 오차를 최소화 하는 방향으로 지속적으로 갱신한다. 계수를 갱신하는 식은 다음과 같다<sup>8)</sup>.

$$W_{n+1} = W_n + 2\mu e_n X_n \quad (2)$$

여기에서  $\mu$ 는 스텝의 크기로, LMS의 계수가 업데이트되는 간격을 결정한다.  $\mu$ 값이 클수록 계수  $W_n^H$ 가 빠르게 갱신되며 식 (1)의 오차는 빠르게 감소한다. 그러나,  $\mu$ 이 크면, 최종적인 오차의 크기가 커져 정밀한 추정이 이루어지지 않는다. 반대로,  $\mu$  값을 작게

할 경우 계수의 갱신은 비교적 느려지지만, 최종적인 추정 오차는 작아지는 장점이 있다.

## III. MIMO-IBFD 시스템

### 3.1 시스템 모델

MIMO-IBFD 시스템은 동일 대역에서 동시에 다중 스트림을 송수신하는 시스템으로 기존의 IBFD 시스템에 비하여 MIMO기술이 적용된 만큼 채널용량을 향상시킬 수 있으며, 기존의 MIMO 시스템과 비교하면 약 2배의 채널용량을 향상시킬 수 있다. MIMO-IBFD 시스템은 기존의 MIMO 시스템에서 동일대역 동시 송수신에 의해 발생하는 자기간섭신호를 제거하기 위한 자기간섭제거 기술을 RF 영역과 디지털 영역에서 사용한다. 이때 기존의 SISO-IBFD 시스템과 비교하면 여러 안테나를 사용하기 때문에 더 많은 자기간섭신호가 발생하게 되고, 이러한 자기간섭신호를 제거하기 위하여 더 많은 자기간섭제거 단계가 요구된다.

그림 3은 2x2 MIMO-IBFD 시스템의 블록도를 나타낸다. 이 시스템은 2개의 다중 스트림을 동시에 전송하며 2개의 다중 스트림을 동시에 수신할 수 있다. 우선 송신 경로를 살펴보면 각각의 데이터 비트는 m-QAM 방식으로 변조된다. 이후 변조된 신호는 RF 체인을 통과하여 기저 대역에서 RF 대역으로 천이, 증폭, 필터링된다. 그 다음 이 신호는 Balanced Feed Network를 통과한 후 단일 안테를 통해 송신된다. 이때, Antenna 1과 Antenna 2로 송신되는 데이터 신호의 흐름은 동일하다. MIMO-IBFD 시스템은 SISO-IBFD 시스템과 비교하여 더욱 많은 자기간섭신호가 발생하게 된다. 2x2 MIMO-IBFD 시스템에서는 Balanced Feed Network에서 발생하는 자기간섭신호 SI #1와 SI #2가 발생한다. 또한 Antenna 1에서 송신된 신호가 Antenna 2로 간섭을 일으키는 SI #3, 반대로 간섭을 일으키는 SI #4의 자기간섭신호가 발생한다. 그리고 Antenna 1에서 송신된 신호가 다중경로를 거쳐 다시 Antenna 1로 수신되는 다중경로 자기간섭신호 SI #5와 같은 방식으로 Antenna 2에서 발생하는 자기간섭신호 SI #6이 발생한다. 다양한 종류의 자기간섭신호 SI #1~ SI #6이 수신기에서 모두 제거되어야 상대방에서 보낸 다중스트림을 수신할 수 있다. 이러한 다중 스트림을 제거하기 위하여 Multiple RF Cancellation 기술 및 Multiple Digital Cancellation 기술을 사용한다. 최종적으로 자기간섭신호의 제거가 완료된 후에는 기존의 MIMO 시스템

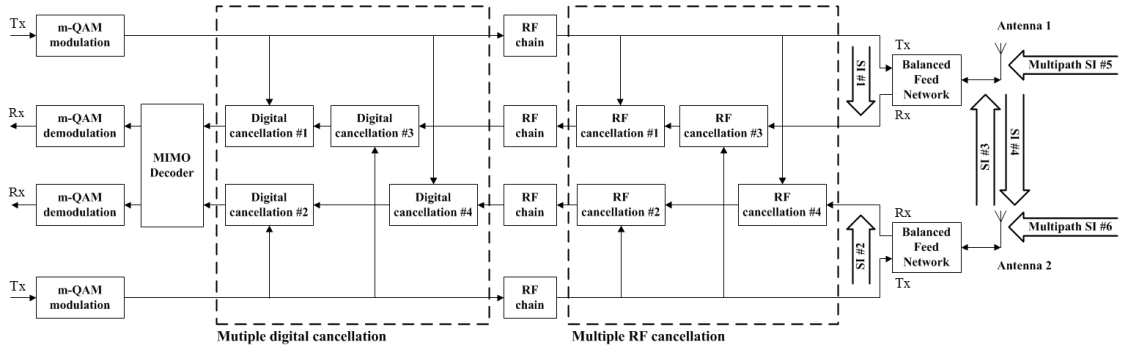


그림 3. 2x2 MIMO-IBFD 시스템의 구성도.  
Fig. 3. Block diagram of 2x2 MIMO-IBFD system.

과 같이 MIMO 디코딩을 한 후, 각각의 신호를 복호하여 상대국에서 보낸 정보신호를 수신하게 된다.

### 3.2 자기간섭제거

2x2 MIMO-IBFD 시스템에서는 SI #1 ~ SI #2의 자기간섭신호가 발생하게 된다. 이러한 자기간섭 신호를 제거하기 위하여 우선 RF 영역에서 Multiple RF Cancellation을 수행한다. 이 때, SI #1은 RF Cancellation #1에서 제거하며, 같은 방식으로 SI #2는 RF Cancellation #2에서 제거한다. 인접 안테나에서 간섭을 일으키는 자기간섭신호 SI #3 성분은 RF Cancellation #3에서 제거하며, SI #4 성분은 RF Cancellation #4에서 제거한다. 이러한 방법으로 상대적으로 크기가 큰 자기간섭신호 성분을 1차적으로 제거한 후, 디지털 영역에서 2차적으로 자기간섭신호를 제거한다. RF Cancellation 이후 남은 SI #1 및 SI #2 그리고 다중경로 자기간섭신호 SI #5 와 SI #6은 각각 Digital Cancellation #1, Digital Cancellation #2에서 제거된다. SI #3과 SI #4의 잔류 자기간섭신호 성분은 각각 Digital Cancellation #3과 Digital Cancellation #4에서 제거된다.

## IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서 SISO-IBFD 시스템 및 MIMO-IBFD 시스템의 신호 분석 및 시스템 성능 평가를 위하여 표 1과 같은 시뮬레이션 파라미터를 사용하였다. 본 논문에서는 시스템의 선형 상태를 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다. 즉, BFN 및 RF Cancellation은 선형 연산으로 처리되었다.

그림 4, 그림 5, 그림 6은 2x2 MIMO 시스템에서 MIMO 디코딩 전과 후의 수신신발 성능도를 나타내

며, 그림 7, 그림 8, 그림 9는 2x2 MIMO-IBFD 시스템에서 MIMO 디코딩 전과 후의 수신신발 성능도를 나타낸다. 여기에서 그림 4 ~ 그림 9의 모두 SNR(Signal to Noise Ratio)이 20dB일 때의 심볼의 성능도를 나타낸다. 그림 4 ~ 그림 9를 서로 비교해보았을 때, 2x2 MIMO-IBFD 시스템에서 m-QAM 변조 레벨에 따라 심볼의 EVM(Error Vector Magnitude) 분포가 2x2 MIMO 시스템에 비해 확산되는 경향을 파악할 수 있으며 이러한 특성은 변조레벨이 높아질수록 심화되는 것을 확인할 수 있다.

그림 10은 2x2 MIMO 시스템 및 2x2 MIMO-IBFD 시스템의 m-QAM 변조레벨에 따른 시스템 성능을 나타낸다. 저차 변조에서는 각 시스템의 성능이 거의 유사함을 확인할 수 있다. 그러나 변조레벨이 높아질수록 각 시스템간의 성능차이가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 고차변조에서 자기간섭제

표 1. 시뮬레이션 환경  
Table 1. Simulation parameters

Parameter	Value
Modulation	m-QAM
MIMO stream	2
MIMO channel	Multipath Rayleigh fading
MIMO technique	Multiplexing
Algorithm for digital cancellation	LMS algorithm
#of coefficient of LMS algorithm	30
Step( $\mu$ ) size of LMS algorithm	0.001, 0.002, 0.003
MIMO decoding algorithm	ZF algorithm
CSI of MIMO channel	Perfect
Channel tap of SI #5 and SI #6	[0 0 0 0 0 1e-7]
Channel tap of SI #3 and SI #4	[0.9 0 0 0 1e-4 0 1e-5]

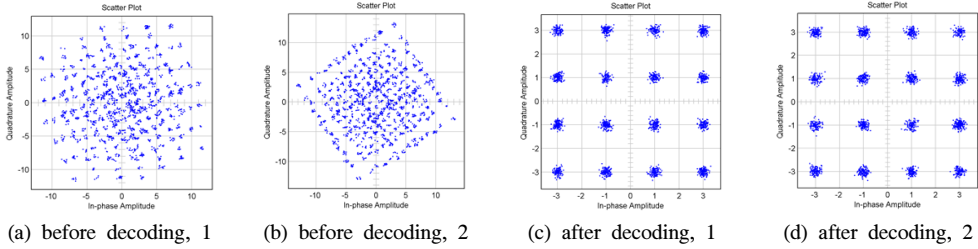


그림 4. 2x2 MIMO 시스템에서 수신 심볼의 성좌도(16-QAM).  
Fig. 4. Scatter plot of received symbols in 2x2 MIMO system (16-QAM).

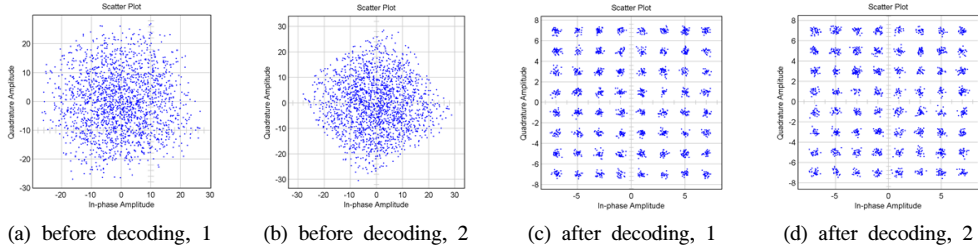


그림 5. 2x2 MIMO 시스템에서 수신 심볼의 성좌도(64-QAM).  
Fig. 5. Scatter plot of received symbols in 2x2 MIMO system (64-QAM).

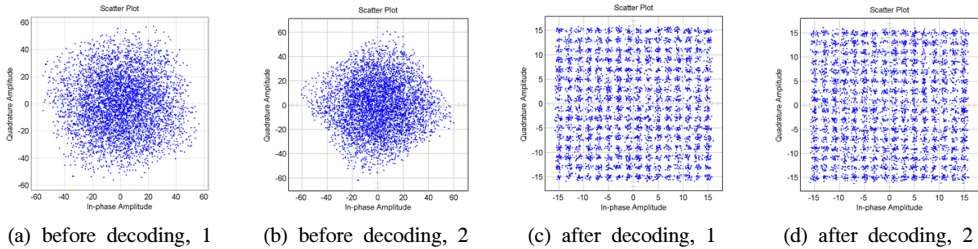


그림 6. 2x2 MIMO 시스템에서 수신 심볼의 성좌도(256-QAM).  
Fig. 6. Scatter plot of received symbols in 2x2 MIMO system (256-QAM).

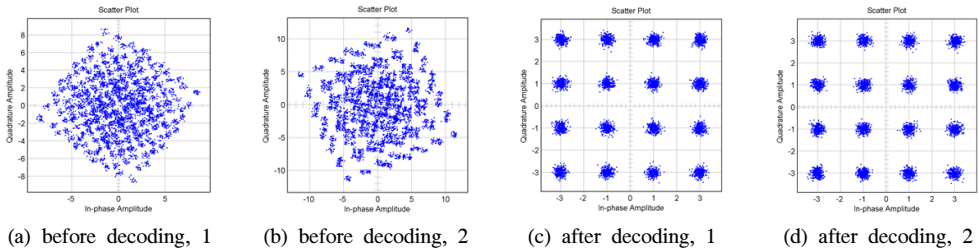


그림 7. 2x2 MIMO-IBFD 시스템에서 수신 심볼의 성좌도(16-QAM).  
Fig. 7. Scatter plot of received symbols in 2x2 MIMO-IBFD system (16-QAM).

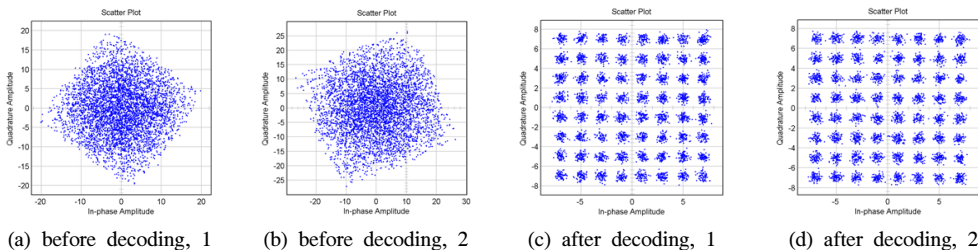


그림 8. 2x2 MIMO-IBFD 시스템에서 수신 심볼의 성좌도(64-QAM).  
Fig. 8. Scatter plot of received symbols in 2x2 MIMO-IBFD system (64-QAM).



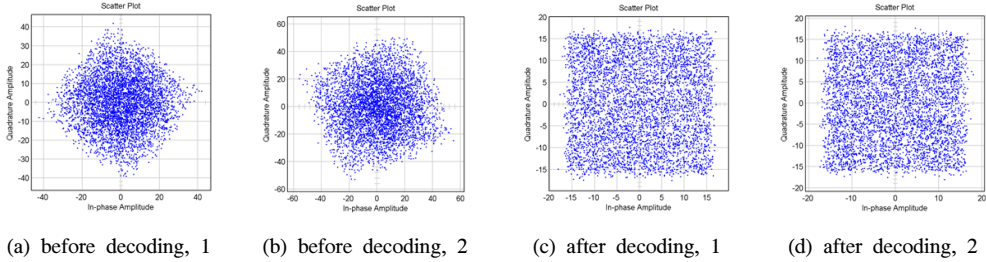


그림 9. 2x2 MIMO-IBFD 시스템에서 수신 심볼의 성좌도(256-QAM).  
Fig. 9. Scatter plot of received symbols in 2x2 MIMO-IBFD system (256-QAM).

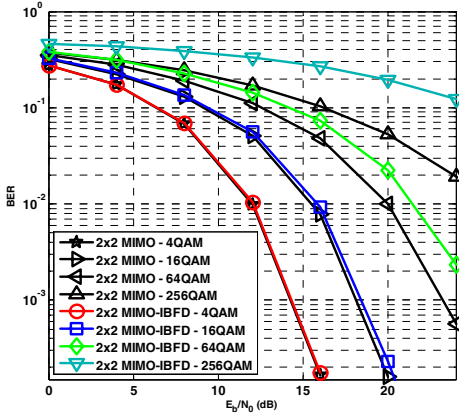


그림 10. MIMO 시스템 및 MIMO-IBFD 시스템의 BER 성능 비교.  
Fig. 10. Performance comparison of MIMO system and MIMO-IBFD system.

거 후 잔류하는 자기간섭신호의 크기가 변조 차수가 높아질수록 증가함을 의미한다. 즉, 그림 10에서는 MIMO-IBFD 시스템에서는 고차 변조를 사용하기 위하여 보다 높은 수준의 자기간섭제거 기술을 적용하여야 함을 확인할 수 있다.

그림 11은 256-QAM 변조를 사용하는 2x2 MIMO 시스템의 성능 및 256-QAM 변조를 사용하는 2x2 MIMO-IBFD 시스템에서 Digital Cancellation의 LMS 알고리즘에 사용되는 스텝크기  $\mu$ 에 따른 시스템 성능을 비교한 것이다. 그림 11에서는  $\mu$  크기가 작을수록 2x2 MIMO-IBFD의 성능이 2x2 MIMO 성능에 근접함을 확인할 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 동일대역에서 동시에 다중스트림을 송수신하는 MIMO-IBFD 시스템을 제안하고, 시뮬레이션을 통하여 기본적인 MIMO 시스템과 MIMO-IBFD 시스템의 BER 성능 특성을 비교 분석

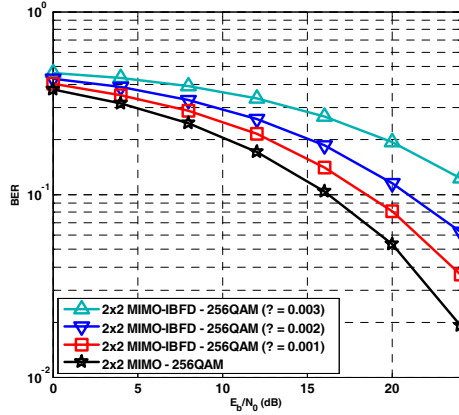


그림 11.  $\mu$ 에 대한 MIMO-IBFD 시스템의 성능.  
Fig. 11. BER performance of MIMO-IBFD system according to  $\mu$ .

하였다. 시뮬레이션 결과를 통해, 다단계의 RF 및 디지털 영역의 자기간섭 신호 제거 기술을 사용하여 다양한 특성의 자기간섭신호를 제거하고 상대국에서 보낸 목표신호를 수신할 수 있음을 확인하였으며, 저차 m-QAM 변조에서는 MIMO-IBFD 시스템은 선형조건에서 기존의 MIMO 시스템과 유사한 성능을 낼 수 있는 것을 확인하였다. 그러나 고차변조를 사용하게 될 경우 잔류자기간섭성분에 의한 영향으로 성능 열화가 심화되는 것을 확인하였다. 더욱이 변조 차수가 증가할수록 잔류 자기간섭신호의 크기도 더욱 증가하는 경향을 보인다. 이는 시스템이 최상의 조건인 선형 조건에서 동작하더라도, 고차 변조 방법에 의해 높은 잔류자기간섭 신호가 발생하고, 이로 인하여 MIMO-IBFD 시스템의 성능 열화가 발생할 수 있음을 확인할 수 있다. 즉, 고차 변조를 수행하기 위해서는 보다 높은 수준의 자기간섭제거 기술이 요구됨을 확인할 수 있다.

References

- [1] B. Debaillie, B. van Liempd, B. Hershberg, J.; Craninckx, K. Rikkinen, D. J. van den Broek, E. A. M. Klumperink, and B. Nauta, "In-band full-duplex transceiver technology for 5G mobile networks," in *ESSCIRC*, pp. 84-87, Sept. 2015.
- [2] Y.-H. Nam, M. S. Rahman, Y. Li, G. Xu, E. Onggosanusi, J. Zhang, and J.-Y. Seol, "Full dimension MIMO for LTE-Advanced and 5G," in *Inf. Theory and Appl. Wksp. 2015*, pp. 143-148, Feb. 2015.
- [3] A. Sabharwal, P. Schniter, D. Guo, D. W. Bliss, S. Rangarajan, and R. Wichman, "In-band full-duplex wireless: Challenges and opportunities," in *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 32, no. 9, pp. 1637-1652, Sept. 2014.
- [4] F. Rusek, et al., "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays," *IEEE Sig. Process. Mag.*, vol. 30, no. 1, pp. 40-60, Jan. 2013.
- [5] E. Dahlman, G. Mildh, S. Parkvall, J. Peisa, J. Sachs, Y. Selén, and J. Sköld, "5G wireless access: requirements and realization," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 12, pp. 42-47, Dec. 2014.
- [6] E. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 186-195, Feb. 2014.
- [7] G. Liu, F. R. Yu, H. Ji, V. Leung, and X. Li, "In-band full-duplex relaying: A survey, research issues and challenges," in *IEEE Commun. Surveys & Tuts.*, vol. 17, no. 2, pp. 500-524, Secondquarter 2015.
- [8] S.-S. Hwang, "Channel estimation based on LMS algorithm for MIMO-OFDM system," *J. KIECS*, vol. 7, no. 6, pp. 1455-1461, Dec. 2012.
- [9] M. E. Knox, "Single antenna full duplex communications using a common carrier," *2012 IEEE 13th Annu. WAMICON*, pp. 1-6, Cocoa Beach, FL, Apr. 2012.

안 창 영 (Changyoung An)



2013년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학사)  
 2015년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학석사)  
 2015년 3월~현재 : 충북대학교 전자공학과 박사과정  
 <관심분야> 차세대 이동통신시스템, 무선통신시스템, 디지털신호처리

궁 경 록 (Kyung-Lok Kung)



2016년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학사)  
 2016년 3월~현재 : 충북대학교 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> 무선통신시스템, 신호처리

김 병 재 (Byeongjae Kim)



2016년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학사)  
 2016년 3월~현재 : 충북대학교 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> 이동통신시스템 설계 및 통신 신호 처리

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)



1988년~현재 : 충북대학교 전자공학과 교수  
 1988년~현재 : 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 연구원  
 2002년 3월~2004년 2월 : 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장

1996년~현재 : IEEE, IET 논문 심사위원  
 2002년 : 한국전자과학회 학술상 수상  
 2008년 : ICWMC 2008 국제학술대회 "Best Paper Award" 수상  
 2009년 : SPACOMM 2009 국제학술대회 "Best Paper Award" 수상  
 <관심분야> 무선통신시스템, 위성통신, B5G/6G 이동통신시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리