

직접변환 수신기 구조에서 In-Band Full-Duplex 시스템 설계와 성능 특성 평가

Design and Performance Evaluation of In-Band Full-Duplex System Based on Direct Conversion Receiver

금 흥 식 · 안 창 영 · 유 흥 균

Hong-Sik Keum · Changyoung An · Heung-Gyoon Ryu

요 약

본 논문에서는 DCR 구조의 IBFD 시스템을 설계하고 제안하는 시스템에서 자기 간섭 신호에 의한 DC offset 영향이 신호에 미치는 영향과 그에 따른 전체적인 시스템의 성능 특성을 분석한다. 시뮬레이션의 결과로 자기 간섭 신호가 RF cancellation에 의해 완전히 제거되지 않고 다양한 크기로 DCR 구조의 수신 시스템에 인가되었을 경우, 상대방에서 보낸 수신 신호를 왜곡할 뿐만 아니라, 자기 간섭 신호 자체의 선형 특성을 왜곡시키는 것을 확인할 수 있다. 또한, 이러한 자기 간섭 신호에 의한 DC offset은 m-QAM의 변조에서 보다 다양한 레벨로 나타나기 때문에 m-QAM으로 변조된 자기 간섭 신호의 경우, 전체적인 심볼의 성좌도 형상을 크게 왜곡시키는 것을 확인할 수 있다. 이와 대조적으로 모든 심볼의 크기가 동일한 m-PSK로 변조된 자기 간섭 신호에 의한 DC offset은 단일 레벨로 나타나기 때문에, 전체적인 심볼의 성좌도 형상은 잘 유지되어 선형성이 잘 유지되는 것을 확인하였다. 즉, DCR 구조의 IBFD 시스템에서 m-PSK 변조가 m-QAM 변조에 비하여 보다 효과적인 것을 확인할 수 있다.

Abstract

In this paper, we propose and design IBFD system based on DCR. And then, we analyze effect of DC offset by self-interference in the proposed system. Also, we evaluate BER performance of the proposed system according to DC offset. As a result of the simulation, we can confirm that when the self-interference is not completely cancelled by the RF cancellation, linearity of desired signal and self-interference is distorted by DC offset. Also, in the proposed system using m-QAM modulation, DC offsets of multi-level are caused by self-interference with m-QAM modulation. As a result, constellations of desired signal and self-interference are greatly distorted. In contrast, in the proposed system using m-PSK modulation, DC offset of single level is caused by self-interference with m-PSK modulation. In this condition, we confirm that distortion of constellations of desired signal and self-interference is less than when using m-QAM modulation. That is, we can confirm that m-PSK modulation is effective than m-QAM modulation in DCR based IBFD system. Also, we can confirm that it is important to cancel self-interference as much as possible in RF-stage.

Key words: In-Band Full-Duplex, Full-Duplex, DCR, DC Offset, Self-Interference

I. 서 론

최근 스펙트럼 자원의 부족으로 인해 스펙트럼 자원의 가치가 매우 높아지고 있다. 이러한 스펙트럼 자원 부족

「이 논문은 2012년도, 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012017339), (No.2013 R1A2A2A01005849).」

충북대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University)

· Manuscript received September 19, 2014 ; Revised October 30, 2014 ; Accepted November 4, 2014. (ID No. 20140919-076)

· Corresponding Author: Heung-Gyoon Ryu (e-mail: ecomm@cju.ac.kr)

문제를 해결하기 위하여 기존의 FDD(Frequency Division Duplex) 방법과 TDD(Time Division Duplex) 방법을 뛰어넘는 IBFD(In-Band Full-Duplex) 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다^{[1]~[5],[9]}. IBFD 시스템은 동일 대역에서 동시에 송신과 수신을 하는 통신 방식이다.

IBFD 시스템에서는 동일 대역에서 송신과 수신이 이루어지기 때문에 자국의 송신 신호가 자국의 수신기에 간섭을 일으키는 자기 간섭 신호가 발생하게 된다^[1]. IBFD 시스템에서는 자기 간섭 신호를 제거하는 것이 매우 중요하다. 자기 간섭 제거는 일반적으로 RF 영역과 Digital 영역 모두에서 이루어진다. RF 영역의 자기 간섭 제거는 위상 천이기와 감쇄기를 이용하는 RF cancellation 방식이 잘 알려져 있다. 또한, 보다 부가적인 회로를 사용해서 단일 안테나 구조의 IBFD 시스템을 위한 Balanced Feed Network 구조의 자기 간섭 제거 방법 또한 연구되어 있다^[4]. RF cancellation 이후 Digital cancellation을 통하여 잔여 자기 간섭 신호를 제거한다. 이러한 IBFD 시스템은 반드시 자기 간섭 신호를 제거하기 위해서 자기 간섭 신호를 제거하기 위한 부가적인 회로 및 소자를 추가해야 한다. 이러한 부가적인 회로는 시스템의 복잡도를 증가시킬 수 있으며 또한 소형화하는데 어려움이 발생할 수 있다.

한편, DCR(direct conversion receiver) 구조는 저 전력 특성과 높은 집적도를 가지며, 대량 생산이 수월한 장점을 가지고 있다^{[6]~[8]}. 이러한 DCR 구조의 장점은 차세대 무선 통신 기기의 전력 소모와 부피를 줄일 수 있어 DCR 구조에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. DCR 구조는 RF 영역의 신호를 중간 대역 주파수를 거치지 않고, 한 번에 기저 대역 신호로 변환시킨다. DCR 시스템은 슈퍼헤테로 다인 수신기 구조와 비교할 때 중간 주파수가 없기 때문에 이미지 신호의 문제를 해결할 수 있다^[7]. 또한, 이미지 신호를 제거하기 위한 필터 및 믹서의 수가 줄어 크기를 소형화시킬 수 있다. 이러한 장점으로 인하여 최근 저 전력 소형 무선 단말 시장의 요구가 급증하고 있다. 이러한 흐름에 따라 DCR 구조 기반의 IBFD 시스템을 설계할 경우, 스펙트럼 용량을 향상시키면서 전체적인 복잡도를 줄일 수 있는 시스템을 구현할 수 있다. 그러나 DCR 구조에서는 DC offset에 의해 성능이 열화될 수 있다^[7]. 이

러한 특성이 DCR 구조를 기반으로 하는 IBFD 시스템에서도 나타날 수 있다. 이러한 DC offset에 대한 문제는 DCR 구조의 IBFD 시스템에서 크기가 매우 큰 자기 간섭 신호가 존재하는 환경에서 그 영향이 보다 크게 증가될 수 있다.

따라서 본 논문에서는 IBFD 시스템을 보다 저 전력화와 소형화하기 위한 DCR 구조의 IBFD 시스템을 설계하고 제안하는 시스템에서 RF 영역의 자기 간섭 신호의 크기 변화에 따른 DC offset 영향이 m-PSK 변조와 m-QAM 변조 신호에 미치는 영향과 그에 따른 전체적인 시스템의 성능 특성을 분석한다.

II. Direct Conversion Receiver

2-1 Direct Conversion Receiver

DCR은 RF 신호를 바로 기저 대역 신호로 변환하는 수신기 구조이다. DCR은 슈퍼헤테로 다인 수신기에 비하여 구조가 간단하다. 슈퍼헤테로 다인 수신기의 경우, RF 신호를 우선 IF 대역으로 1차 변환한 후 이를 다시 기저 대역으로 변환하는 방법이다. 이러한 방법은 이미지 신호를 제거하기 위하여 추가적인 필터가 요구된다. DCR은 수신된 RF 신호를 기저 대역으로 직접 변환한다. 즉, 수신된 RF 신호의 주파수와 수신기 내의 Mixer에 사용되는 국부 발진기의 주파수가 동일하다.

그림 1은 DCR의 구성도를 나타낸다. 안테나를 통해 수신된 RF 신호는 RF 수신 대역 필터 BPF(Band Pass Filter)를 통과한 후, LNA(Low Noise Amplifier)를 통해 저 잡음 증폭된다. 그 다음 LO(Local Oscillator)의 신호를 이용하

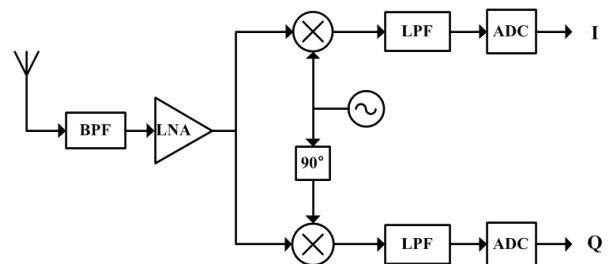


그림 1. 직접 변환 수신기의 구성도
Fig. 1. Block diagram of DCR.

여 저 잡음 증폭된 RF 신호를 기저대역으로 직접 변환한다. 여기에서 각각 I채널과 Q채널을 분리하여 각각 복조를 하게 된다. 그 다음 기저대역의 신호는 LPF(Low Pass Filter)를 거친 후, ADC에 의해 디지털 신호로 변환된다.

2-2 DC Offset

DCR 구조에서는 수신된 RF 신호의 주파수와 LO의 주파수가 같음으로 인해 DC offset이 발생할 수 있다⁸⁾. 또한, 발생된 DC offset으로 인해 전체적인 시스템의 성능이 열화될 수 있다.

그림 2와 그림 3은 DC offset이 발생하는 원인을 나타낸다. 첫째는 그림 2와 같이 DCR 구조에서 LO의 신호가 원하지 않는 경로를 통해 믹서의 RF 입력 포트에 인가되어 Self-mixing이 일어나는 경우이다. 이렇게 발생한 DC offset은 LPF를 통과한 후, ADC를 거쳐 디지털 신호로 변환된다. 이러한 DC offset은 상대국에서 보낸 목표 신호를 왜곡시켜 시스템의 성능을 열화시킬 수 있다. 이러한 LO 신호의 누설 현상은 본딩 와이어 방식, 그라운드링 불안정 등에 의하여 발생할 수 있다.

둘째, 그림 3과 같이 DCR 시스템에 강한 간섭 신호가

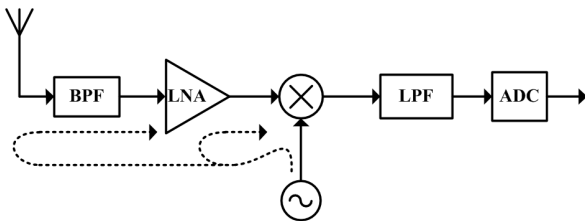


그림 2. 국부 발진 신호의 누설에 의한 DC offset
Fig. 2. DC offset due to LO signal leakage.

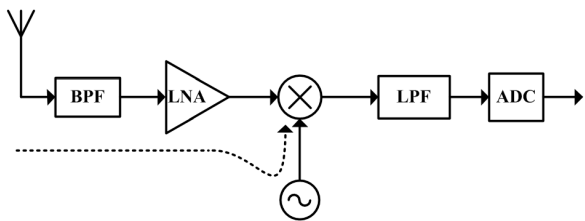


그림 3. 강한 RF 신호의 누설에 의한 DC offset
Fig. 3. DC offset due to strong RF signal leakage.

인가될 때 이 간섭 신호가 믹서의 LO 입력단으로 누설되어 Self-mixing이 일어날 수 있다. 이러한 현상으로 인해 또한 DC offset이 발생할 수 있다. 이러한 DC offset 성분은 LPF를 통과한 후 ADC를 통해 디지털 신호로 변환된다. 본 논문에서는 다음과 같이 RF 신호가 Mixer의 LO 입력단에 누설되어 DC offset을 일으키는 현상을 중점적으로 분석한다.

안테나에 의해 수신된 RF 신호는 다음과 같다⁶⁾.

$$x_{RF,in}(t) = \alpha \sin(\omega_c t) + \beta \cos(\omega_c t) \tag{1}$$

여기에서 ω_c 는 $2\pi f_c$ 이며, f_c 는 반송파 주파수를 나타낸다. α 는 Q채널의 정보 β 는 I채널의 정보를 나타낸다. 이 신호가 Mixer의 RF 입력 단에서 LO 입력 단에 누설이 일어날 수 있다. 이 누설 신호는 다음과 같이 표현된다⁶⁾.

$$x_{LO,leakage}(t) = \alpha' \sin(\omega_c t) + \beta' \cos(\omega_c t) \tag{2}$$

여기에서 $\alpha' = k\alpha$ 이고, $\beta' = k\beta$ 이다. k 는 Mixer의 RF 포트에서 LO 포트에 누설되는 비율을 나타낸다. 이렇게 RF의 입력 신호가 Mixer의 LO 포트에 누설될 경우, RF 입력 신호와 LO 포트의 누설 신호가 서로 Self-mixing이 되면서 DC offset이 발생하게 된다. Q채널 Mixer에서 Self-mixing이 일어날 경우 Mixer의 출력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_{OUT,dc}(t) &= x_{RF,in}(t) \cdot x_{LO,leakage}(t) \\ &= \{ \alpha \sin(\omega_c t) + \beta \cos(\omega_c t) \} \\ &\quad \cdot \{ \alpha' \sin(\omega_c t) + \beta' \cos(\omega_c t) \\ &\quad + A_{LO} \sin(\omega_c t) \} \end{aligned} \tag{3}$$

여기에서 A_{LO} 는 LO 신호의 크기를 나타낸다. Mixer의 출력을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_{OUT,dc}(t) &= \alpha \alpha' \sin^2(\omega_c t) + \alpha \beta' \sin(\omega_c t) \cos(\omega_c t) \\ &\quad + \alpha \sin^2(\omega_c t) + \alpha' \beta \sin(\omega_c t) \cos(\omega_c t) \\ &\quad + \beta \beta' \cos^2(\omega_c t) + \beta \sin(\omega_c t) \cos(\omega_c t) \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} x_{OUT,dc}(t) &= (\alpha \alpha' + \alpha) \left\{ \frac{1 - \cos(2\omega_c t)}{2} \right\} \\ &\quad + \beta \beta' \left\{ \frac{1 + \cos(2\omega_c t)}{2} \right\} \end{aligned}$$

$$+ (\alpha\beta' + \alpha'\beta + \beta) \left\{ \frac{\sin(2\omega_c t) + \sin(0)}{2} \right\} \quad (5)$$

Mixer의 출력이 LPF를 통과하면 높은 주파수 성분은 필터링이 되어 기저대역의 신호만 남게 된다. 식 (5)에서 고주파 성분을 제거하면 다음과 같다.

$$x_{LPF,dc}(t) = \frac{\alpha}{2} + \frac{k}{2}(\alpha^2 + \beta^2) \quad (6)$$

여기에서 $\alpha/2$ 는 수신 받은 신호의 Q채널 정보를 나타낸다. $k/2(\alpha^2 + \beta^2)$ 은 DC offset 성분을 나타낸다. 이는 Mixer의 RF 포트와 LO 포트 사이의 격리도가 낮을수록 DC offset이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, Self-mixing을 일으키는 RF 신호의 크기가 커지면 DC offset이 증가하는 것을 알 수 있다.

III. In-Band Full-Duplex System Based on DCR

3-1 System Model

IBFD 시스템은 동일 대역에서 송신과 수신을 동시에 하는 시스템이다. IBFD 시스템은 자기 간섭 신호가 발생할 수 있다. 자기 간섭 신호의 크기는 일반적으로 상대국에서 보낸 목표 신호보다 100~140 dB 크다. 이러한 자기 간섭 신호는 상대국에서 보낸 목표신호를 완전히 왜곡시킨다. 본 논문에서는 IBFD 시스템에 DCR 구조를 결합하였을 경우, 전체적인 시스템의 성능과 특성을 분석하기 위한 제안하는 시스템 모델은 그림 4와 같다.

그림 4는 제안하는 DCR 구조의 IBFD 시스템이다. 제안하는 시스템 모델은 저 전력과 소형화를 위하여 DCR 구조를 사용하였다. 제안하는 시스템 모델의 송신부분의 동작을 살펴보면, 우선 DSP에서 비트 정보를 I채널 정보와 Q채널 정보로 변환한다. 그 다음 이 디지털 신호는 DAC에 의해 아날로그 신호로 변환된다. 변환된 아날로그 신호는 LPF를 통과하고, 그 다음 LO에서 생성되는 신호에 의해 각각 I채널 전송 신호와 Q채널 전송 신호로 변조된다. 여기에서 LO의 신호는 송신되는 RF 신호와 동일

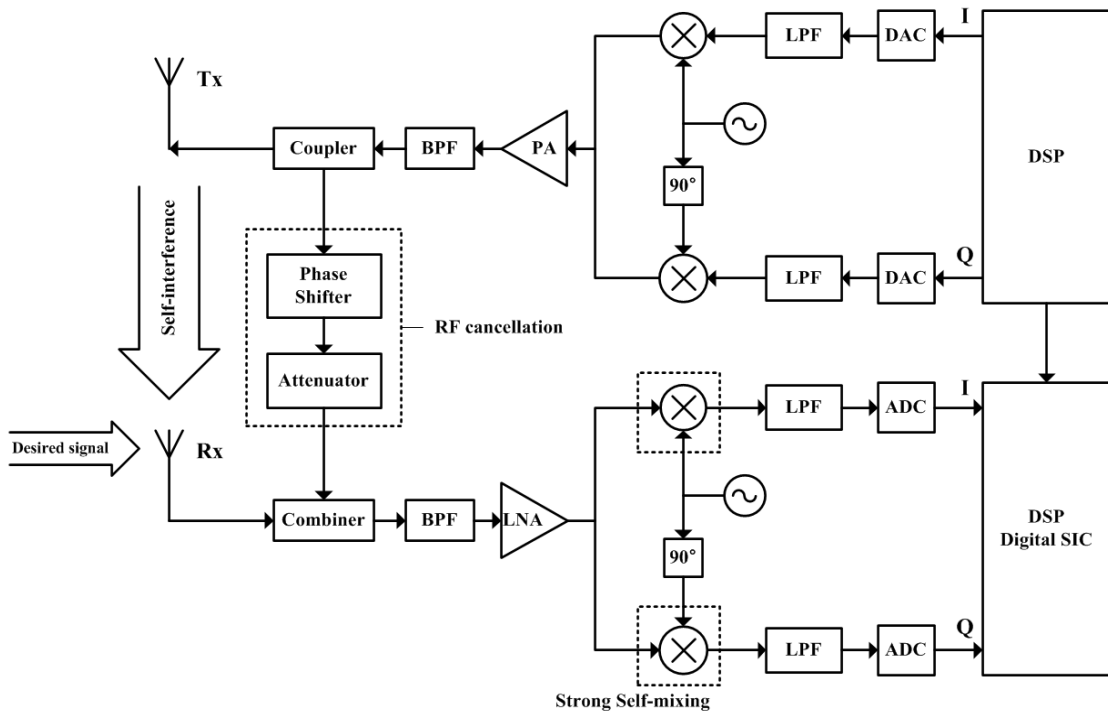


그림 4. 직접 변환 수신기 기반의 IBFD 시스템
 Fig. 4. System model for IBFD based on DCR.

한 주파수로 I채널과 Q채널 신호를 기저대역에서 한 번에 송신하고자 하는 RF 대역으로 이동시킨다. 그 후 I채널 신호와 Q채널 신호가 합쳐진 후 PA에 의해 증폭되어 BPF를 거친 후 송신 안테나에 인가된다. 제안하는 시스템의 수신부분의 동작을 살펴보면, 수신 안테나에서 수신된 신호는 BPF를 거친 후 LNA에 의해 증폭된다. 이 신호는 각각 I채널과 Q채널 복조를 위한 LO의 신호에 의해 복조된다. 여기에서 LO의 주파수는 수신 받은 RF 신호와 동일한 주파수를 사용하여 수신 받은 신호를 한 번에 기저대역으로 이동시킨다. 그 다음 LPF를 통하여 기저대역의 신호만 통과 시킨 후 ADC를 이용하여 기저대역의 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환한다. 마지막으로 수신기의 DSP에서 신호처리를 거친 후 I채널 정보와 Q채널 정보를 비트 정보로 변환한다. 이러한 송수신기에 자기 간섭 신호를 제거하는 RF 회로와 디지털 신호 처리 부분이 추가되어 자기 간섭 신호를 제거하면서 동일 대역에서 동시에 송수신을 하게 된다.

3-2 Self-Interference Cancellation

IBFD 시스템은 동일 대역에서 동시에 송신과 수신이 이루어진다. 따라서 자국의 송신 신호는 자국 수신기에 자기 간섭을 일으킨다. 자기 간섭 신호는 상대국에서 보낸 수신 신호에 비하여 약 100~130 dB 크다. 자기 간섭 신호가 수신될 경우, 자기 간섭 신호의 크기가 매우 크기 때문에 상대국에서 보낸 수신 신호가 완전히 왜곡된다. 이러한 상황에서는 어떠한 정보도 수신할 수 없다. 따라서 IBFD 시스템을 구현하기 위해서는 자기 간섭 신호를 제거하는 기술이 필요하다. 본 논문에서는 자기 간섭 신호를 RF 영역에서 1차적으로 제거하고, 디지털 영역에서 2차적으로 제거하는 시스템 모델을 제시하였다. RF 영역에서 자기 간섭 신호를 제거하는 방법은 RF 영역의 송신 신호를 이용하여 자기 간섭 신호와 반대의 위상을 가지면서 크기가 같은 신호를 생성하여 수신기의 RF 영역에서 더해줌으로써 자기 간섭 신호를 제거하는 것이다^[4]. 이러한 RF cancellation에는 위상 천이기와 감쇄기가 사용된다. 위상 천이기는 자기 간섭 신호와 반대 위상을 갖는 신호를 생성한다. 감쇄기는 자기 간섭 신호와 같은 크기의 신호를 만들기 위해 사용된다.

디지털 영역의 자기 간섭 신호 제거 방법은 자기 간섭 신호가 이동하는 자기 간섭 채널 환경을 추정하고, 이 자기 간섭 채널 정보를 이용하여 자기 간섭 신호를 제거하는 것이다^{[4],[9]}. 자기 간섭 신호는 자국 송신기의 송신 신호에 의해 발생하기 때문에 자기 간섭 채널을 추정하기 위하여 자국 송신기의 송신 신호를 사용하게 된다. 본 논문의 제시된 시스템 모델에서는 적응 알고리즘을 사용하여 자기 간섭 채널을 추정하였다. 적응 알고리즘은 송신기의 디지털 영역의 송신 신호를 입력 신호로 하고, 수신 받은 자기 간섭 신호를 목표 신호로 하여 입력 신호와 목표 신호 간의 오차가 최소가 되는 계수를 반복적인 업데이트를 통해 추정한다^[10]. 적응 알고리즘을 이용하여 자기 간섭 채널을 추정한 후에는 추정된 계수를 적용한 FIR필터에 자국 송신기의 디지털 신호를 통과시켜 자기 간섭 신호와 유사한 신호를 생성하고, 이 신호를 수신 받은 자기 간섭 신호에서 빼줌으로써 자기 간섭 신호를 제거한다.

3-3 DC Offset by Self-Interference

본 논문에서 제안하는 시스템의 경우, 자기 간섭 신호를 제거하기 위하여 RF cancellation과 Digital cancellation을 사용한다. 이러한 IBFD 시스템에서는 수신기에서 LNA를 통과하기 전 최대한 많은 자기 간섭 신호를 제거해야 한다. 일반적으로 RF cancellation으로 자기 간섭 신호를 상대국에서 보낸 목표 신호의 크기까지 감쇄시키는 것은 매우 어렵다. 즉, RF cancellation 이후에도 상대국에서 보낸 수신 신호에 비하여 매우 큰 크기의 신호가 LNA를 거쳐 수신 시스템을 통과하게 된다. 이러한 상황에서 DCR 구조에서 발생하는 DC offset 발생의 문제점이 보다 크게 증폭될 수 있다. DC offset은 Mixer의 RF 입력단과 LO 입력단의 불완전한 격리특성에 의해 RF 입력단의 신호가 LO 입력단에 누설되어 Self-mixing에 의해 일어나게 된다. 기존의 Half-duplex 방법의 DCR 시스템에서는 DC offset이 상대국에서 보낸 수신 신호에 의하여 발생하였다. 그러나 IBFD 시스템을 DCR 구조로 설계하게 될 경우, 상대국에서 보낸 수신 신호에 비하여 매우 큰 크기의 자기 간섭 신호가 Mixer에서 Self-mixing이 일어나면서 보다 강력한 DC offset을 발생시키게 된다. 이러한 매우 큰 크기의 DC offset은 IBFD 시스템의 수신 신호를 크게 왜곡

시키게 되고, 그로 인하여 IBFD 시스템 수신기의 디지털 부분에서 이루어지는 Digital cancellation의 성능을 크게 열화시킬 수 있다. 다시 말해서 자기 간섭 신호는 식 (6)에서 DC offset의 크기에 영향을 미치는 Q채널 신호 크기 α 와 I채널의 신호 크기 β 가 매우 크다. 따라서 DCR구조의 IBFD 시스템은 매우 큰 크기의 DC offset이 발생할 수 있다. 이러한 자기 간섭 신호에 의한 DC offset은 신호의 변조 방법에 따라 그 크기가 달라질 수 있다. 식 (6)은 DC offset의 크기는 변조된 심볼과 원점과의 거리에 의해 결정된다는 것을 나타낸다. 즉, m-PSK 계열의 변조는 생성된 모든 심볼의 Amplitude가 같기 때문에 각 심볼에 의해 발생하는 DC offset의 크기가 모두 동일하다. 그러나 m-QAM 계열의 변조는 여러 가지 레벨의 Amplitude를 가지고 있어, 각 심볼의 Amplitude에 따른 DC offset이 다르게 발생한다.

그림 5는 16-QAM 변조의 성좌도를 나타낸다. 16-QAM은 3개의 크기 레벨을 갖는 심볼로 구성된다. 여기에서 A의 크기를 갖는 심볼이 4개 존재하며, B의 크기를 갖는 심볼이 8개이고, C의 크기를 갖는 심볼이 4개이다. 이러한 이유로 16-QAM에서는 3개 레벨의 DC offset이 발생할 수 있다. 큰 크기의 자기 간섭 신호가 16-QAM으로 변조되어 있고, 이 신호가 수신기에 자기 간섭을 일으키게 될 경우, Mixer에서 Self-mixing이 일어날 수 있고, 그에 따라 3가지 레벨의 DC offset이 발생할 수 있다.

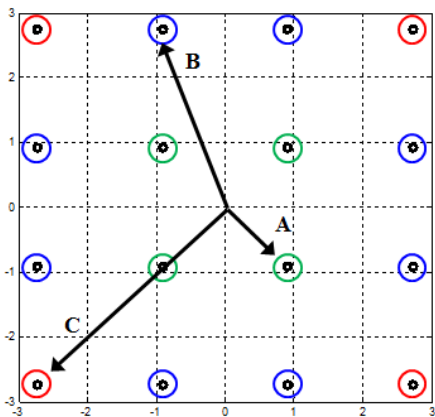


그림 5. 16-QAM 변조의 성좌도
Fig. 5. Constellation of 16-QAM.

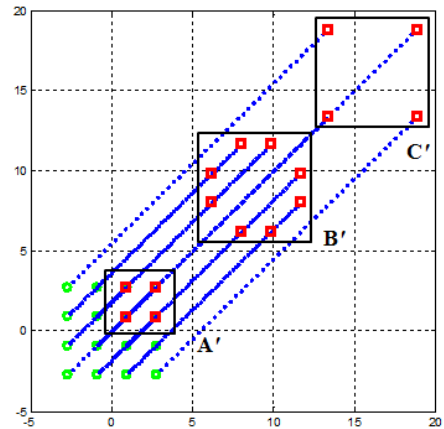


그림 6. 심볼의 신호 크기에 따른 DC offset 효과
Fig. 6. DC offset effect according to symbol's power.

그림 6은 16-QAM 변조 심볼에 따른 DC offset 발생량을 나타낸다. 그림 6은 Mixer의 RF 입력단에서 LO 입력단으로 누설되는 신호의 양이 50%일 때의 DC offset 효과를 나타낸다. 여기에서 A', B' 그리고 C'의 심볼들은 각각 A, B 그리고 C 크기의 심볼들이 DC offset 발생에 의해 이동하게 된 심볼의 군집을 나타낸다. 크기가 A인 심볼들의 경우, 작은 DC offset이 발생하게 되고, A 크기의 심볼들은 작은 이동이 일어나게 된다. 크기가 B인 경우, 보다 큰 DC offset이 발생하여 B 크기의 심볼들은 보다 많은 이동이 일어난다. C 크기의 심볼의 경우, 가장 큰 크기의 DC offset이 발생하여 가장 큰 심볼의 이동이 나타날 수 있다. 이러한 효과는 자기 간섭 신호의 선형성을 왜곡시킨다. 또한, 부가적인 잡음과 다중 경로 채널 페이딩 효과가 합쳐질 경우, 보다 다양한 레벨의 DC offset이 발생하여 자기 간섭 신호의 선형성을 강하게 왜곡시킬 수 있다. 그러나 m-PSK 변조의 경우, 각 심볼들의 신호 크기가 모두 동일하기 때문에 DC offset이 발생하더라도 변조된 심볼들의 전체적인 형상은 거의 흐트러지지 않고 유지하면서 전체적으로 심볼들의 이동이 일어나게 된다. 이렇게 m-PSK 변조 신호로 인해 발생한 DC offset은 하나의 레벨에 대한 DC offset만을 보상하면 되기 때문에 m-QAM 변조에 비하여 보다 수월하게 DC offset을 보상할 수 있으며, 전체적인 심볼 성좌도 왜곡도 m-QAM 신호에 비하여 매우 적다. 즉, 자기 간섭 신호의 세기가 매우 크기 때문

에 자기 간섭 신호의 변조 방식에 따라 DC offset이 발생하는 특성이 다르게 되며, 발생된 DC offset에 의한 자기 간섭 신호의 선형성이 왜곡된다. 이러한 자기 간섭 신호의 선형성 왜곡은 Digital 영역에서 자기 간섭 신호를 제거할 때 문제를 발생시킬 수 있다. 이러한 문제로 인하여 자기 간섭 신호가 효과적으로 제거되지 않으면 전체적인 시스템의 성능 열화를 가져올 수 있다. 본 논문에서는 자기 간섭 신호가 m-PSK 변조와 m-QAM 변조가 되어 있을 경우의 DC offset 특성을 분석한다. 또한, 이러한 DC offset의 영향이 Digital 영역에서 선형 알고리즘을 사용하여 자기 간섭 신호를 제거하는데 미치는 영향을 분석하고, 그에 따른 제안하는 시스템의 성능을 파악한다.

IV. Simulation Results and Analysis

본 논문에서는 제안하는 DCR 기반의 IBFD 시스템의 성능과 DC offset에 대한 특성을 확인하기 위하여 표 1과 같은 시뮬레이션 환경을 고려하였다.

본 논문에서는 그림 3의 시스템 모델을 Simulink 툴을 이용하여 모델링하였으며, DCR에 사용되는 Mixer의 LO 포트와 RF 포트의 격리도가 50 dB인 소자를 고려하였다. 자국의 송신 신호와 상대국에서 보낸 수신 신호와의 크기 차이는 100 dB를 고려하였다. 자국 송신 신호의 크기가 0 dB일 경우, 상대국에서 보낸 수신 신호의 크기는 -100 dB를 고려하였다. 자기 간섭 신호는 RF cancellation에 의해 감쇄되어 수신기에 인가되는 크기를 10 dB, 20 dB 그리고 30 dB를 고려하여 시스템의 특성을 파악하였다. 수신기로 인가되는 자기 간섭 신호의 크기는 그림 4의 RF cancellation 회로에서 위상천이기의 위상 변화량은 180

도로 하였고, 감쇄기의 감쇄율을 조절하여 자기 간섭 신호의 누설량을 변경하였다. 자기 간섭 신호 제거를 위한 Digital cancellation은 선형 NLMS 알고리즘을 사용하였다^[10]. NLMS 알고리즘의 탭은 30이고 스텝 크기는 0.0015를 고려하였다.

그림 7은 제안하는 DCR 구조의 IBFD 시스템에서 Mixer의 LO 포트와 RF 포트의 격리도가 50 dB일 때 Digital cancellation 전과 후의 성좌도를 나타낸다. 그림 7에서는 16-QAM 변조에 따른 DC offset의 특성을 파악할 수 있다. 16-QAM 변조의 경우 심볼의 크기 레벨이 나누어져 있어 여러 레벨의 DC offset이 발생하여 심볼의 전체적인 형상이 크게 왜곡된다.

그림 8은 제안하는 DCR 구조의 IBFD 시스템에서 Mixer의 LO 포트와 RF 포트의 격리도가 50 dB일 때 Digital cancellation 전과 후의 성좌도를 나타낸다. 그림 8에서는 16-PSK 변조에 따른 DC offset의 특성을 파악할 수 있다. 16-QAM 변조를 사용하였을 경우와는 다르게 16-PSK 변조를 사용할 경우, 각 심볼의 크기 레벨이 동일하기 때문에 DC offset이 발생하여도 전체적인 심볼의 형상이 보다 잘 유지되는 것을 확인할 수 있다. 전체적인 심볼의 형상이 유지된다면 평균값 보상과 같은 간단한 방법으로 DC offset을 보다 수월하게 보상할 수 있다.

그림 9는 제안하는 DCR 구조의 IBFD 시스템 구조에서 16-QAM 변조를 사용하였을 때, Mixer의 LO 포트와 RF 포트간의 격리도가 50 dB일 경우, RF cancellation 이후에 남은 자기 간섭 신호의 크기에 따른 전체적인 시스템의 성능을 보여준다. 그림 6은 DC offset을 보상하지 않은 상황을 고려하였다. 시스템의 성능은 잔류 자기 간섭 신호의 크기가 작을수록 시스템의 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

그림 10은 제안하는 DCR 구조의 IBFD 시스템 구조에서 16-PSK 변조를 사용하였을 때, Mixer의 LO 포트와 RF 포트간의 격리도가 50 dB일 경우, RF cancellation 이후에 남은 자기 간섭 신호의 크기에 따른 전체적인 시스템의 성능을 보여준다. 16-PSK 변조를 사용하였을 경우에도 16-QAM 변조를 사용하였을 경우와 같이 잔류 자기 간섭 신호가 작을수록 전체적인 시스템의 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

표 1. 시뮬레이션 환경
Table 1. Simulation parameters.

Modulation	16-PSK, 16-QAM
LO to RF isolation	50 dB
Self-interference power	0 dB, 10 dB, 15 dB, 20 dB, 30 dB
Channel	AWGN
Adaptive algorithm	NLMS
Number of taps	30
Step size	0.0015

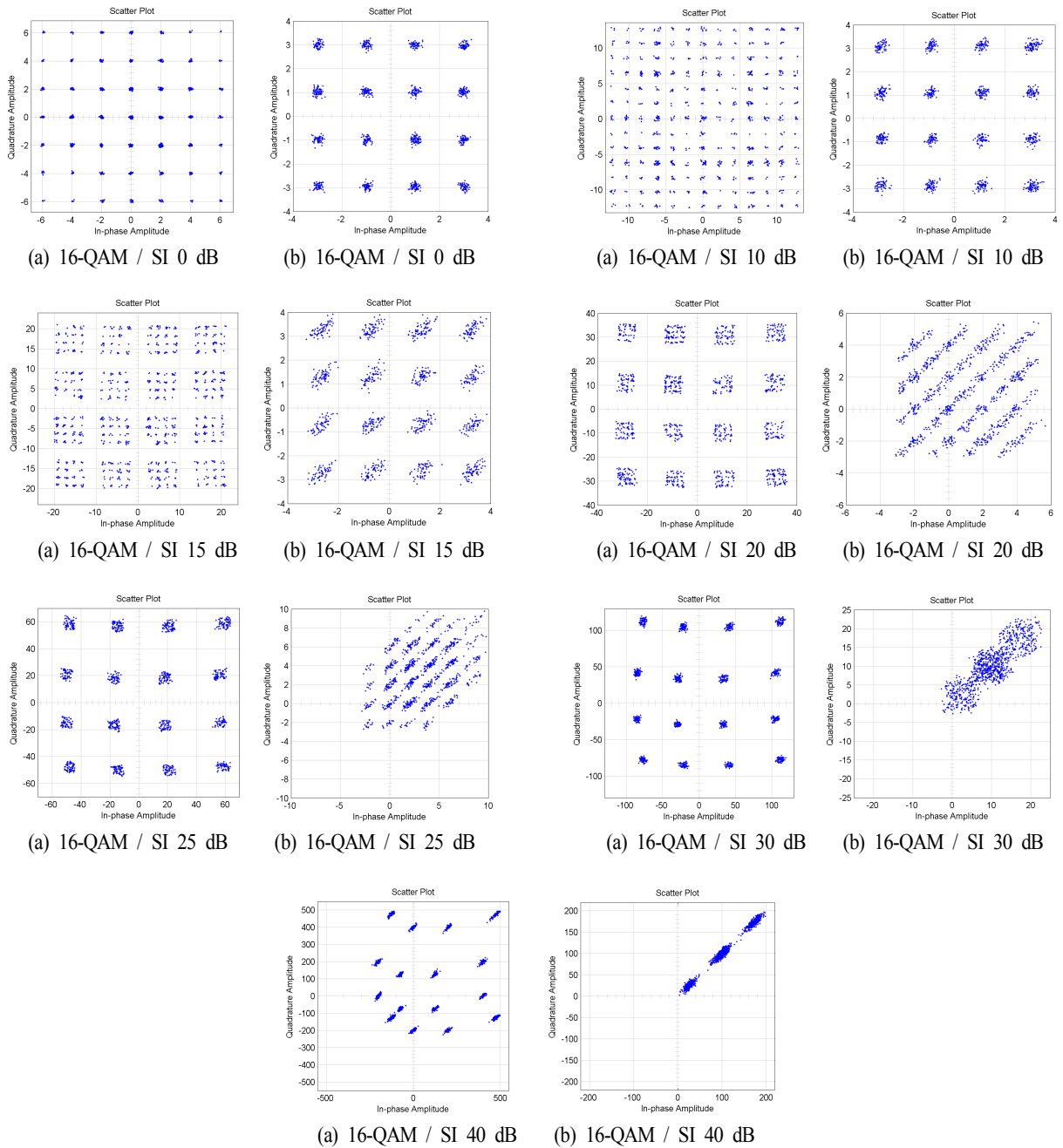


그림 7. SI의 크기에 따른 digital cancellation 전후의 성좌도 (a) Digital cancellation 전, (b) Digital cancellation 후
 Fig. 7. Constellations of before and after digital cancellation according to power of SI (a) before digital cancellation, (b) after digital cancellation.

여기에서 그림 9와 그림 10을 비교해 보면, 자기 간섭 신호가 증가함에 따라서 시스템의 성능이 열화되는 폭이 16-PSK 변조를 사용하였을 경우보다 16-QAM 변조를 사

용하였을 경우가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 16-QAM 변조를 사용하였을 경우, 14 dB에서 6×10^{-2} 의 성능을 나타내는 반면, 16-PSK 변조를 사용하였을 경우, 동일한 SNR

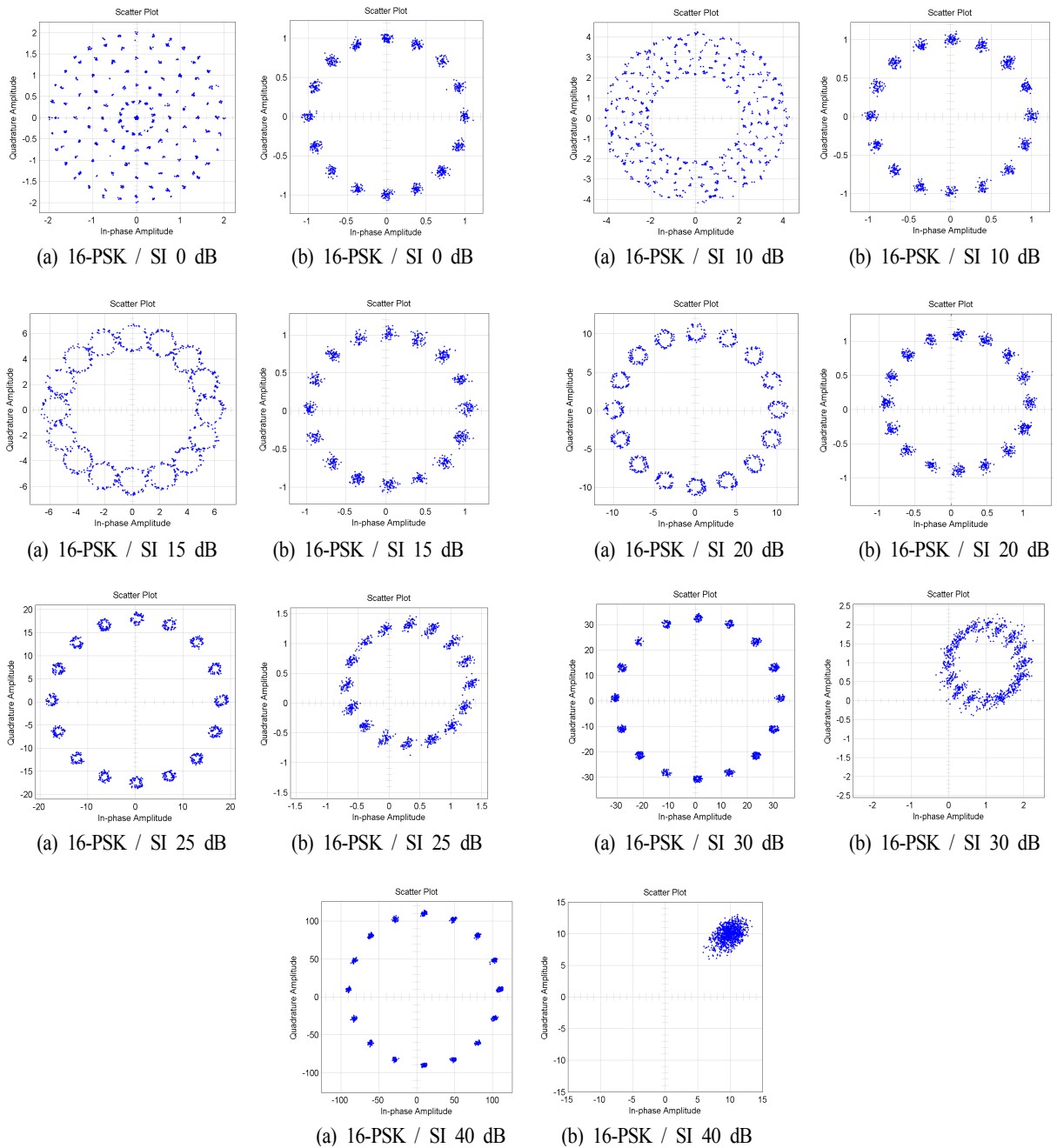


그림 8. SI의 크기에 따른 digital cancellation 전후의 성좌도. (a) Digital cancellation 전, (b) Digital cancellation 후
 Fig. 8. Constellations of before and after digital cancellation according to power of SI (a) before digital cancellation, (b) after digital cancellation.

에서 10^{-1} 의 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 즉, 그림 9에서 확인한 바와 같이 16-QAM 변조의 경우, RF cancellation 이후의 잔류 자기 간섭 신호의 크기가 증가

할수록 전체적인 심볼의 형상 왜곡이 심하게 일어나게 되고, 이로 인하여 성능 열화가 더욱 큰 폭으로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

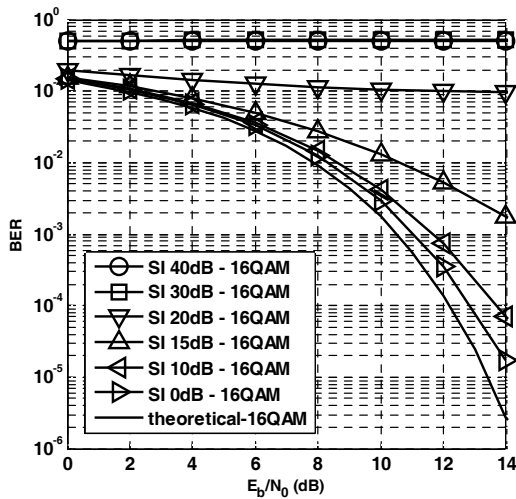


그림 9. 자기 간섭 신호의 크기에 따른 16-QAM 변조를 사용하는 제안하는 시스템의 BER 성능

Fig. 9. BER performance of the proposed system using 16-QAM modulation according to SI.

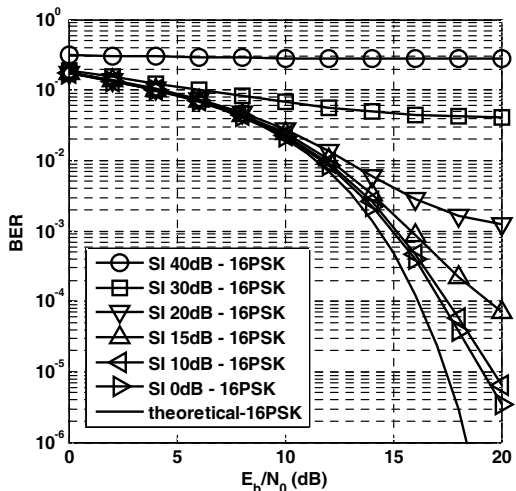


그림 10. 자기 간섭 신호의 크기에 따른 16-PSK 변조를 사용하여 제안하는 시스템의 BER 성능

Fig. 10. BER performance of the proposed system using 16-PSK modulation according to SI.

V. 결 론

본 논문에서는 시스템의 소형화 및 저 전력화를 가능하게 하는 DCR 구조 기반의 IBFD 시스템 모델은 제안한다. 그리고 제안하는 시스템에서 자기 간섭 신호에 의해

발생하게 되는 DC offset 효과를 자기 간섭 신호의 변조 방법에 따라 분석한다. 또한, 이러한 다양한 변조 방법에 의해서 발생한 DC offset이 선형 알고리즘을 사용하는 Digital cancellation에 미치는 영향과 이에 따른 전체적인 시스템의 성능을 분석한다. 시뮬레이션의 결과로 자기 간섭 신호가 RF cancellation에 의해 완전히 제거되지 않고, 다양한 크기로 DCR 구조의 수신 시스템에 인가되었을 경우, 상대국에서 보낸 수신 신호를 왜곡할 뿐만 아니라, 자기 간섭 신호 자체의 선형 특성을 왜곡시키는 것을 확인할 수 있다. 또한, 이러한 자기 간섭 신호에 의한 DC offset은 m-QAM의 변조에서 보다 다양한 레벨로 나타나기 때문에 m-QAM으로 변조된 자기 간섭 신호의 경우, 전체적인 심볼의 성좌도 형상을 크게 왜곡시키는 것을 확인할 수 있다. 이와 대조적으로 모든 심볼의 크기가 동일한 m-PSK로 변조된 자기 간섭 신호에 의한 DC offset은 단일 레벨로 나타나기 때문에 전체적인 심볼의 성좌도 형상은 잘 유지되어 선형성이 잘 유지되는 것을 확인하였다. 전체적인 시뮬레이션의 결과를 종합해 보면 DCR 구조의 IBFD 시스템을 설계할 때 m-PSK 변조가 m-QAM 변조에 비하여 보다 효과적인 것을 확인할 수 있다. 또한, 수신기 이전의 RF 영역에서 최대한 많은 자기 간섭 신호를 제거하는 것이 중요한 것을 확인할 수 있다.

References

- [1] Jung Il Choi, Mayank Jain, Kannan Srinivasan, Philip Levis, and Sachin Katti, "Achieving single channel, full duplex wireless communication", In *Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, ACM, pp. 1-12, 2010.
- [2] A. Thangaraj, R. K. Ganti, and S. Bhashyam, "Self-interference cancellation models for full-duplex wireless communications", *Signal Processing and Communications (SPCOM), 2012 International Conference on*, pp. 1,5, 22-25, Jul. 2012.
- [3] Aryafar, Ehsan, et al. "MIDU: enabling MIMO full duplex", In *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, ACM,

pp. 257-268, 2012.

[4] M. E. Knox, "Single antenna full duplex communications using a common carrier", *Wireless and Microwave Technology Conference(WAMICON), 2012 IEEE 13th Annual*, pp. 1-6, Apr. 2012.

[5] M. Jain, J. I. Choi, T. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, S. Katti, and P. Sinha, "Practical, real-time, full duplex wireless", in *Proc. 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 301-312, Jan. 2011.

[6] B. Lindoff, P. Malm, "BER performance analysis of a direct conversion receiver", *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 5, pp. 856-865, May 2002.

[7] B. Razavi, "Design considerations for direct-conversion receivers", *Circuits and Systems II: Analog and Digital*

Signal Processing, IEEE Transactions on, vol. 44, no. 6, pp. 428-435, Jun. 1997.

[8] R. Svitek, S. Raman, "DC offsets in direct-conversion receivers: characterization and implications", *Microwave Magazine, IEEE*, vol. 6, no. 3, pp. 76-86, Sep. 2005.

[9] N. Li, W. Zhu, and H. Han, "Digital interference cancellation in single channel, full duplex wireless communication", *2012 8th Int'l Conf. Wireless Commun., Networking and Mobile Comput.(WiCOM)*, pp. 1-4, Sep. 2012.

[10] Won-Jin Park, Yong-Seo Park, and Een-Kee Hong, "Dual NLMS type feedback interference cancellation method in RF repeater system", *J. KICS*, vol. 32, no. 2, pp. 91-99, Feb. 2011.

금 홍 식



1994년 2월 : 충북대학교 전자공학과 (공학 석사)
 2009년 3월~현재 : 한국전파진흥협회 전자파기술원
 [주 관심분야] 디지털 통신 시스템, EMC, 기술 기준 및 표준화

유 흥 균



1988년~현재: 충북대학교 전자공학과 교수
 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
 [주 관심분야] 무선통신시스템, 위성통신, B4G/5G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리

안 창 영



2013년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학 석사)
 2013년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 무선통신시스템, 신호처리