

# RF Cancellation과 Digital Cancellation을 사용한 SSD(Simultaneous Single Band Duplex) 시스템

안창영\*, 유흥균<sup>o</sup>

## SSD(Simultaneous Single Band Duplex) System Using RF Cancellation and Digital Cancellation

Changyoung An\*, Heung-Gyoon Ryu<sup>o</sup>

요 약

본 논문에서는 RF(radio frequency) Cancellation과 Digital Cancellation을 사용하는 SSD(simultaneous single band duplex) 시스템을 구성하고, 이 시스템에서 직접 자기 간섭 신호가 있는 환경에서 RF Cancellation의 오차가 발생하였을 경우 남은 자기 간섭 신호의 전력 크기 특성을 분석한다. 또한 이를 해결하기 위해 Digital Cancellation을 사용하였을 때, 추가적인 잔류 자기 간섭 신호 제거를 통한 성능 특성을 분석한다. RF Cancellation에서 사용하는 위상 천이기에 0, 0.5, 1, 2도의 위상 천이 오차가 발생하였을 경우 잔류 자기 간섭 신호가 자국에 수신되는 상대국의 송신 신호보다 매우 크기 때문에 상대국의 데이터를 수신할 수 없는 것을 확인하였고, Digital Cancellation 방법을 사용하면 이러한 잔류 자기 간섭 신호 성분을 제거하여 상대국의 송신 데이터를 수신할 수 있는 것을 확인하였다. 또한 RF Cancellation에서의 소자 설계 오차에 대한 시스템의 성능을 분석하였다.

**Key Words** : SSD, RF cancellation, full duplex, self-interference cancellation, spectrum efficiency

### ABSTRACT

In this paper, we design SSD(simultaneous single band duplex) system using RF(radio frequency) cancellation and digital cancellation. we analyze characteristic of residual self-interference after RF Cancellation signal when error of phase shifter occur in RF cancellation. When phase shifter error of 0°, 0.5°, 1° and 2° occur in RF cancellation, residual self-interference signal power after RF cancellation is bigger than desired signal power of distant station. So, it is impossible to receive transmit data of distant station. but we confirm that it is possible to receive transmit data of distant station by digital cancellation with frame structure. Also, in digital cancellation with frame structure, if residual self-interference signal after RF cancellation is too large then LMS algorithm requires more time to estimate self-interference channel. That is, performance degradation occurs because self-interference channel estimation has not completed in estimation frame.

\* 이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2013R1A2A2A01005849).

• First Author : 충북대학교 전자공학과, acy890217@naver.com, 학생회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : 충북대학교 전자공학과, ecomm@cbu.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2013-10-441, 접수일자 : 2013년 10월 11일, 심사일자 : 2013년 12월 12일, 최종논문접수일자 : 2014년 2월 10일

## I. 서 론

이중 통신을 위한 방법에는 잘 알려진 TDD(time division duplex) 방식과 FDD(frequency division duplex) 방식이 있다. TDD 방식은 동일한 주파수 대역에서 송신과 수신이 이루어지는 시간을 나누어 이중 통신을 하는 방법이다. FDD 방식은 동일한 시간에 다른 주파수 대역을 이용하여 동시에 이중 통신을 하는 방법이다. TDD 방식은 시간영역으로 송수신을 나누어서 하기 때문에 최대의 시간 자원을 활용할 수 없다. FDD 방식은 각각 다른 대역에서 송수신이 이루어지기 때문에 주파수 자원이 TDD 방식에 비해 더 많이 사용된다<sup>[1-3]</sup>.

FDD 방식과 TDD 방식의 자원 낭비를 해결하기 위하여 새로운 전 이중 통신 방식에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 연구 중에서, 한 주파수 대역만을 사용하는 TDD의 장점과 동일한 시간에 송수신을 하는 FDD의 장점을 결합한 새로운 전 이중 통신 시스템인 SSD 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다[4-6]. SSD 시스템은 동일 대역에서 동시에 이중 통신을 하는 시스템이다. 이러한 시스템은 TDD와 FDD와 같이 시간 영역과 주파수 영역의 자원 분할을 하지 않고 동시에 동일 대역에서 이중 통신을 한다. 그렇기 때문에 TDD와 FDD에 비하여 대역 효율이 좋다. 그러나 이러한 SSD 시스템은 동일 주파수 대역에 동시에 자국의 송신 신호와 상대국의 송신 신호가 송출되어 서로 간섭을 일으킨다. 즉, 자국의 송신 신호가 자국 수신기로 곧바로 수신되는 현상이 발생하고 자국 송신기와 자국 수신기의 거리는 가깝기 때문에 매우 큰 크기의 자국 송신 신호가 자국 수신기로 수신된다. 이러한 상황에서는 상대국 송신 신호가 자국 송신 신호에 비하여 매우 작게 도달하기 때문에 상대국의 송신신호가 완전히 왜곡되어 상대국의 송신 데이터를 수신할 수 없다. 따라서 SSD 시스템에서는 반드시 상대국의 송신 신호를 왜곡시키는 자기 간섭 신호를 제거해야 한다.

이러한 자기 간섭 신호를 제거하는 방법에는 대표적으로 잘 알려진 RF Cancellation과 Digital Cancellation 방법이 있다<sup>[7-9]</sup>. RF Cancellation의 경우 자국 송신기에서 자국 수신기로 최단 거리를 통해 직접 도달하는 강력한 자기 간섭 신호가 RF Chain의 LNA(low noise amplifier)에 도달하기 전에 제거한다. 이 직접적인 자기 간섭 신호는 자국에 수신되는 상대국의 송신 신호보다 매우 크다. 이렇게 크기가 큰 신호가 수신기에 도달할 경우 RF Chain에서 가장 먼저 도달하

는 LNA가 포화될 수 있다. 이러한 상황을 막기 위하여 RF Cancellation을 통하여 신호의 크기가 매우 큰 자기 간섭 신호를 제거해야 한다. 그 다음 RF Cancellation 이후의 잔류 자기 간섭 신호들을 ADC 이후에 Digital Cancellation을 통해 제거한다. 자기 간섭 신호는 자국 송신기에서 수신기로 직접 도달하는 크기가 매우 큰 직접 자기 간섭 신호와 다중 경로를 통해 다시 되돌아서 자국 수신기로 수신되는 다중 경로 자기 간섭 신호가 있다. Digital Cancellation에서는 이러한 다중 경로 신호들과 RF Cancellation 이후의 잔류 자기 간섭 신호를 제거한다.

기존의 SSD 시스템에 대한 연구는 RF Cancellation과 Digital Cancellation을 결합한 시스템을 구성하고 RF Cancellation의 소자 특성이 고정적일 경우에 대한 자기 간섭 제거 성능만을 보여주었다<sup>[10-11]</sup>. 그러나 RF Cancellation에서 각 소자에 설계 오차가 발생할 경우 Digital Cancellation에서 자기 간섭 제거 성능의 열화가 발생할 수 있다. 즉, RF Cancellation이후에 남은 자기 간섭 신호 성분이 클 경우 Digital Cancellation에서 자기 간섭 채널 추정 완료 시간이 확장될 수 있고 정해진 추정 구간 내에 자기 간섭 채널 추정이 완료되지 않을 경우 전체적으로 시스템의 성능 열화가 발생할 수 있다.

본 논문에서는 RF Cancellation과 Digital Cancellation을 사용하는 SSD 시스템을 구성하고 성능을 분석한다. 또한 SSD 시스템에서 RF Cancellation에서 사용되는 소자에 일부 오차가 발생할 경우 이로 인한 잔류 자기 간섭 신호 성분이 증가될 수 있고 이에 따라 Digital Cancellation의 자기 간섭 채널 추정이 완료되지 못함으로 인한 전체적인 시스템의 성능 특성을 분석한다.

## II. 동일 대역 동시 이중 통신

SSD 시스템은 기존의 FDD와 TDD 시스템과는 다른 새로운 이중 통신 시스템이다. FDD 시스템은 송신과 수신에 다른 주파수 대역에서 이루어진다. TDD 시스템은 송신과 수신에 시간 영역에서 구분되어 이루어진다. FDD 시스템은 동시에 송수신을 할 수 있지만 TDD 시스템과 비교하여 추가적인 주파수 자원을 사용한다. 이와 반대로 TDD 시스템은 하나의 주파수 대역 사용하지만 동시에 송신과 수신을 할 수 없다. SSD 시스템은 FDD와 TDD 시스템이 갖는 문제점을 동시에 해결하는 새로운 전 이중 통신 시스템이다. SSD 시스템은 하나의 동일한 주파수 대역에서 송신

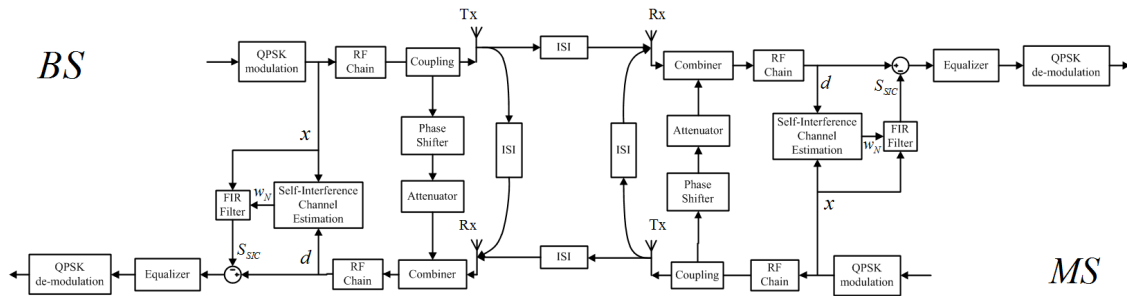


Fig. 1. Block diagram of simultaneous single-band duplex system  
그림 1. 동일 대역 동시 통신 시스템 모델

과 수신을 동시에 하는 시스템이다. 따라서 SSD 시스템은 기존의 이중 통신 시스템과 비교하여 대역효율이 높다. 그러나 SSD 시스템은 송신 신호와 수신 신호가 동일한 시간에 동일 주파수 대역에 존재하기 때문에 서로 간섭을 일으키게 된다.

상대국의 송신 신호가 자국의 수신기에 도달하는 동안 자국의 송신 신호 역시 자국의 수신기에 도달한다. 그림 1에서 BS와 MS 는 각각 base station과 mobile station을 의미한다. 상대국의 송신 신호와 자국의 송신 신호는 서로 간섭을 일으킨다. 따라서 수신기에서는 상대국의 신호를 정상적으로 수신할 수 없다. 특히 상대국의 송신 신호는 자국의 송신 신호에 비하여 그 크기가 매우 작기 때문에 상대국의 송신 신호를 수신하는 것은 거의 불가능하다. 이러한 자기 간섭 신호는 자국의 송신기에서 자국의 수신기로 직접 도달하는 직접적인 자기 간섭 신호와 송신된 신호가 다중 경로를 통과하여 자국 수신기로 도달하는 다중 경로 자기 간섭 신호로 이루어져 있다. 직접적인 자기 간섭 신호는 자국 송신기에서 자국 수신기로 최단거리로 도달하기 때문에 그 크기가 매우 크다. 다중경로 자기 간섭 신호는 자국 송신기에서 송신된 신호가 다중 경로 환경을 거쳐서 돌아오기 때문에 그 크기가 직접적인 자기 간섭 신호와 비교하여 매우 작다. 그러나 다중 경로 자기 간섭 신호는 상대국의 송신 신호와 비교하여 그 크기가 크다. 따라서 SSD 시스템을 위해서 직접 자기 간섭 신호와 다중 경로 자기 간섭 신호를 모두 제거하는 것이 중요하다.

본 논문의 SSD 시스템 모델은 그림 1과 같다. 이 시스템 모델은 가장 먼저 크기가 가장 큰 직접 자기 간섭 신호를 RF Cancellation 제거하고 그 이후에 남은 자기 간섭 신호와 다중 경로 자기 간섭 신호를 Digital Cancellation 방법을 통하여 제거 한다. 두 가지 방법으로 자기 간섭 신호를 제거한 후에 상대국의 송신 신호를 등화 한다.

본 논문에서는 그림 1의 SSD 시스템을 구성 하고 이 시스템에서 발생할 수 있는 RF Cancellation 방식의 오차에 의해서 발생하는 잔류 자기 간섭 신호에 대한 성능 특성을 분석한다.

### III. 자기 간섭 제거

#### 3.1 RF Cancellation

직접 자기 간섭 신호는 신호의 크기가 매우 크기 때문에 자국 수신기에 이러한 신호가 수신될 경우 수신기의 LNA가 포화 될 수 있다. LNA가 포화되면 이후의 어떤 신호도 수신할 수 없기 때문에 RF Cancellation을 이용하여 LNA 앞에서 자기 간섭 신호를 1차적으로 제거해야 한다. RF Cancellation은 자국의 수신기에서 직접 자기 간섭 신호와 크기가 같고 180도의 위상차를 가지는 신호를 직접 자기 간섭 신호와 결합해줌으로써 서로 상쇄시켜 자기 간섭 신호를 제거하는 방법이다. 직접 자기 간섭 신호를 제거하기 위한 신호는 자국 송신기의 증폭기 이후의 신호를 감쇄기와 위상 천이기에 통과시켜 얻을 수 있다. 이때 감쇄기에서는 자국 송신기와 자국 수신기 간의 거리에 의해서 발생하는 신호 감쇄를 측정하여 감쇄 수치를 정한다.

RF Cancellation 의 경우 위상 천이기와 감쇄기를 사용하는데 위상 천이기의 경우 시스템의 대역폭 전체의 신호 위상이 정확하게 180도 천이되지 않는다. 위상 천이는 RF 신호를 이용하는데 대역에 따라서 비선형적인 특성을 갖는다. 만약 신호 반송파 중심 주파수가 2.4GHz이고 신호 대역폭이 20MHz라면 중심 주파수 이하의 대역폭 부분은 180도 보다 약간 모자라게 위상 천이되고 중심 주파수 이상의 대역폭 부분은 180도 이상의 위상이 천이될 수 있다[12]. 이렇게 위상 천이에 오차가 생기면 RF Cancellation을 수행할 경우 아무리 신호 크기를 정확하게 맞추어도 직접 자

기 간섭 중 일부 신호가 제거되지 않고 남게 된다. 직접 자기 간섭 신호는 자국 송신기에서 자국 수신기로 최단거리로 도달하기 때문에 그 크기가 매우 크다. 따라서 위상 천이가 정확하게 180도가 되지 않아서 발생하는 잔류 자기 간섭 신호 성분은 상대국 송신 신호에 비하여 그 크기가 크다. 만약 위상 오차가 더 크게 발생한다면 잔류하는 자기 간섭 신호의 크기는 더욱 커질 것이다. 본 논문에서는 RF Cancellation을 할 때 위상 천이기의 특성상 발생하는 위상 천이 오차에 의해 발생하는 잔류 직접 자기 간섭 신호성분에 대한 크기를 확인하고 이 잔류 자기 간섭 신호 성분에 따른 SSD 시스템의 성능 특성을 분석한다.

RF Cancellation이 이루어 저도 다중 경로에 의한 자기 간섭 신호 및 RF Cancellation에 의해 발생하는 잔류 자기 간섭 신호 남아있기 때문에 Digital Cancellation을 이용하여 다중 경로 자기 간섭 신호를 제거해야만 상대국의 송신 신호를 수신할 수 있다.

### 3.2 Digital Cancellation

RF Cancellation 방법을 통해 RF Chain의 LNA 앞에서 크기가 큰 직접 자기 간섭 신호를 제거를 하여도 다중 경로에 의한 자기 간섭 신호는 남아있게 된다. 다중 경로 자기 간섭 신호는 자국의 수신기에 도달하는 상대국의 송신 신호 보다 신호의 세기가 크다. 이러한 조건에서는 남아 있는 자기 간섭 신호보다 상대국의 송신 신호가 작기 때문에 정상 적으로 신호를 수신하여 처리할 수 없다. 따라서 다중 경로 자기 간섭 신호가 섞인 RF Cancellation 이 후의 남은 자기 간섭 신호를 ADC 이 후 Digital Cancellation을 통해 제거해야 한다.

본 논문에서는 적응 알고리즘을 사용하는 Digital Cancellation 방법을 사용한다. 우선 적응 알고리즘으로 다중 경로 자기 간섭 채널을 추정한다. 자기 간섭 채널 추정이 완료되면 추정된 자기 간섭 채널 계수를 FIR 필터에 적용시킨다. 그 다음 자국 송신기의 DAC 이전의 송신 신호를 FIR 필터에 통과시킨다. 이러한 방법으로 다중 경로 자기 간섭 신호와 근접한 자기 간섭 제거 신호를 생성한다. 그 다음 다중 경로 자기 간섭 신호가 섞여 있는 수신 신호에서 FIR 필터를 통과하여 생성된 자기 간섭 제거 신호를 빼줌으로써 다중 경로 자기 간섭 신호를 제거할 수 있다. Digital Cancellation을 통해 다중 경로 자기 간섭 신호를 제거했을 경우 남아 있는 자기 간섭 신호의 크기가 상대국의 송신 신호보다 작다면 상대국의 송신 데이터를 추출할 수 있다.

Digital Cancellation은 자국에서 송신된 신호가 최단 거리를 거쳐 자국 수신기에 수신 되는 직접 자기 간섭 신호가 RF Cancellation에 의하여 완전히 제거되지 않아서 발생하는 부분 적인 잔류 자기 간섭 신호를 제거하기 위하여 사용한다. 또한 자국 송신기에서 다중 경로를 거쳐 자국 수신기로 되돌아오는 다중 경로 자기 간섭 신호성분을 제거한다. 이러한 Digital 영역으로 간섭을 일으키는 자기 간섭 신호 정보는 자국 송신기에서 송신된 신호이기 때문에 자국 송신기의 Digital 영역에서 왜곡되지 않은 송신 신호 정보를 얻을 수 있다. 이 Digital 영역의 송신 정보를 이용하여 RF Cancellation 이후의 잔류 자기 간섭 신호와 다중 경로 자기 간섭 신호가 합쳐진 Digital 영역의 자기 간섭 신호 성분을 추정한다. 이러한 잔류 자기 간섭 신호 성분과 다중 경로 자기 간섭 신호 성분이 합쳐진 Digital 영역의 자기 간섭 신호 성분은 송신된 신호가 특정 채널을 통과하여 자국 수신기로 돌아온 것으로 볼 수 있다. 따라서 이러한 자기 간섭 신호 성분을 추정하기 위하여 적응 알고리즘을 사용한다. 적응 알고리즘은 원래의 신호가 특정 채널을 통과하였을 경우 이 채널의 특성을 추정하는 알고리즘이다. 이러한 알고리즘으로 자국 송신 신호가 어떠한 특성을 가지고 변화하여 자국 수신기에 자기 간섭을 일으키는 지 추정한다. 본 논문에서는 자기 간섭 신호 추정을 위한 적응 알고리즘으로 LMS 알고리즘을 사용한다. LMS 알고리즘은 입력 신호와 채널을 통과한 목표 신호를 이용하여 통과한 채널의 특성을 추정할 수 있다. 이러한 LMS 알고리즘의 특성을 이용하여 입력 신호로 자국 송신기의 Digital 영역 신호를 사용하고, 목표 신호로 자기 간섭 신호성분이 포함된 수신 신호를 사용하여 자국 송신기에서 송신된 신호가 어떠한 채널 환경을 거쳐 자국 수신기에 도달한 것인지 추정한다. 즉, 여기에서 추정된 계수는 자기 간섭 채널을 나타낸다. LMS 알고리즘을 이용하여 자기 간섭 채널 추정이 되면 추정된 계수를 FIR 필터에 적용시킨 후 자국 송신기에서 DAC 이전의 디지털 신호를 FIR 필터에 통과시킨다. 이렇게 FIR 필터에 추정된 자기 간섭 채널 계수를 적용하고 자국 송신기의 디지털 신호를 입력시키면 출력으로 자기 간섭 신호와 유사한 신호가 출력되게 된다. 만약 추정이 완벽하다면, 자기 간섭 신호와 같은 신호가 출력된다. 이렇게 자기 간섭 신호와 유사한 신호가 생성되면 이 신호를 수신신호에서 빼줌으로써 수신 신호에 합쳐져 있는 자기 간섭 신호를 제거하게 된다.

본 논문에서는 다중 경로 자기 간섭 채널을 추정하

기 위하여 LMS(least mean square) 적용 알고리즘을 사용한다. LMS 알고리즘은 기존의 무선 통신 시스템에서 채널을 추정하는데 사용하는 알고리즘이다. 기존의 무선 통신 시스템에서는 상대국 송신기에서 자국 수신기까지 채널을 추정하기 위하여 상대국에서 송신 신호에 자국과 상대국이 모두 알고 있는 프리엠블을 추가하여 송신한다[13]. 자국의 수신기에서 신호를 수신한 후 수신 신호에서 프리엠블을 추출한 다음 LMS 알고리즘을 이용하여 채널을 추정하고 수신 신호를 등화하게 된다. 이렇게 채널 추정을 위하여 프리엠블이 추가된 만큼 전송 데이터를 추가하지 못하므로 데이터 전송률에 일부 손실 갖게 된다. 그러나 Digital Cancellation에서는 자국에서 보낸 송신 신호가 자국 수신기에 자기 간섭을 일으키는 상황이기 때문에 자기 간섭 채널을 추정하기 위한 별도의 프리엠블을 추가하지 않는다. 이는 자국 수신기에서 자기 간섭 신호가 채널에 의하여 왜곡되기 이전의 원본 신호를 자국 송신기로부터 받아 명확하게 알 수 있기 때문이다. 따라서 왜곡되지 않은 자국의 송신 신호와 채널을 통과한 자기 간섭 신호를 이용하여 자기 간섭 채널을 추정하고 추정된 채널 계수를 이용하여 자기 간섭 신호와 동일한 신호를 생성하여 이를 수신 신호에서 빼줌으로써 자기 간섭 신호를 제거하게 된다.

LMS 알고리즘은 자국 송신기의 DAC 이전의 신호를 입력으로 하고 RF Cancellation 이 후의 자기 간섭 신호를 목표 신호로 한다. 입력 신호를 추정된 계수를 사용한 필터에 통과 시킨 다음 필터의 출력과 목표 신호와의 오차를 계산하여 오차가 최소가 되도록 계수를 업데이트한다. 오차가 최소화 될수록 추정된 채널 계수가 사용된 필터를 통과한 신호는 목표 신호와 가까워진다. LMS 알고리즘에서 오차는 다음과 같다.

$$e_k = d_k - W_k^H X_k \tag{1}$$

여기에서  $X_k$ 는 입력 신호이고,  $d_k$ 는 목표 신호이다.  $W_k^H$ 는 추정된 자기 간섭 채널을 나타낸다. 여기에서 오차를 최소화 하도록 추정된 채널 계수값을 다음과 같이 업데이트 한다.

$$W_{k+1} = W_k + 2\mu e_k X_k \tag{2}$$

여기에서  $\mu$ 는 스텝 크기로 계수를 갱신하는 크기를 나타내는 상수 값이다. 식 (2)의 방법으로 반복하여 계수를 업데이트하면 자기 간섭 신호와 유사한 신호

를 만드는 자기 간섭 채널 계수를 얻을 수 있다.

Digital Cancellation 에서는 다중 경로 자기 간섭 채널 추정이 정확할수록 다중 경로 자기 간섭 신호를 더 많이 제거 할 수 있다. 만약 다중 경로 자기 간섭 채널을 명확하게 알고 있다면 다중 경로 자기 간섭 신호와 동일 한 신호를 생성하여 모든 다중 경로 자기 간섭 신호를 제거할 수 있다. 만약 다중 경로 자기 간섭 신호와 상대국의 송신 신호가 동시에 송신 된다면 명확한 자기 간섭 채널을 추정하는 것이 어려워진다. 추정된 다중 경로 자기 간섭 채널의 오차가 클수록 Digital Cancellation 이후에 더 많은 자기 간섭 신호가 남게 된다. 따라서 본 논문에서는 추정 오차를 최대한 감소시키기 위하여 그림 2의 프레임 구조를 사용한다.

그림 2의 프레임 구조는 자국에서 가장 먼저 송신을 하고 송신하는 동안 다중 경로 자기 간섭 채널을 추정한다.

자국에서 다중 경로 자기 간섭 신호를 추정하는 동안 상대국에서는 송신을 하지 않고 자국에서 송신한 신호를 정상적으로 수신한다. 자국의 다중 경로 자기 간섭 채널 추정이 완료 된 후에 상대국에서 송신을 하고 상대국의 다중 경로 자기 간섭 신호를 추정한다. 그 동안 자국에서는 송신을 하지 않고 상대국의 송신 신호를 정상 적으로 수신한다. 자국과 상대국의 다중 경로 자기 간섭 채널추정이 완료 된 후에는 자국과 상대국 모두 각각의 자기 간섭 신호를 제거하면서 송신과 수신을 동시에 하는 SSD 통신을 한다.

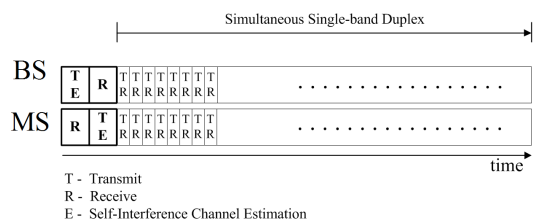


Fig. 2. Frame structure for estimation of self-interference channel  
그림 2. 자기 간섭 채널의 추정을 위한 시간 도메인의 프레임 구조

#### IV. 시뮬레이션 및 분석

본 논문에서는 그림 1의 RF Cancellation 및 Digital Cancellation을 사용한 SSD 시스템 모델의 성능을 분석하기 위하여 Simulink를 이용하여 시뮬레이션 하였고 RF Cancellation 방식을 사용할 때 위상 천

이기에 다양한 오차가 발생하는 환경을 적용하여 그림 1의 SSD 시스템 성능을 분석하였다. 시뮬레이션을 위한 환경은 다음과 같다.

본 논문에서 RF Cancellation에서 사용되는 위상 천이기의 오차가 0°, 0.5°, 1°, 2°일 경우를 고려하여 성능 특성을 확인하였다.

그림 3은 상대국의 송신 신호 전력 스펙트럼과 상대국의 목표 신호가 자국의 수신기에 도달하여 수신하였을 때 신호의 전력 스펙트럼을 나타낸다. 본 논문에서는 송신기에서 출력 되는 순간의 신호 전력을 0dB로 기준을 정하고, 상대국의 송신 신호가 자국 수신기에 도달했을 때의 신호 전력을 -90dB로 고려하였다.

그림 4는 자국의 송신 신호 전력 스펙트럼과 자국

송신기에서 수신기까지 거리에 의해 감쇄되어 직접 자기 간섭을 일으키는 신호의 스펙트럼을 나타낸다. 자국 송신기의 신호가 자국 수신기에 도달할 때 거리에 의해 신호 전력의 크기가 30dB 감쇄되는 환경을 고려하였다. 즉 직접 자기 간섭 신호의 경우 자국 송신기에서 0dB의 신호가 출력되면 자국 수신기에 -30dB의 전력 크기로 도달하게 된다. 이는 상대국의 송신 신호에 비하여 60dB 큰 신호이다. 따라서 자기 간섭 제거 기술이 없다면 상대국의 송신 신호는 자국 수신기에 -90dB로 도달하고 직접 자기 간섭 신호의 경우 -30dB로 도달하기 때문에 직접 자기 간섭 신호에 의하여 상대국의 신호는 완전히 왜곡되어 어떠한 상대국의 데이터도 수신할 수 없다. 그렇기 때문에 이 직접 자기 간섭 신호를 RF Cancellation 방법을 통해 1차적으로 제거 한다.

그림 5는 위상 천이기 오차에 따른 RF Cancellation 이후의 남은 자기 간섭 신호의 전력 스펙트럼을 나타낸다. 그림 5의 (a)에서 RF Cancellation에서 위상 천이기에 오차가 없이 완벽하게 직접 자기 간섭 신호와 크기가 같고 위상이 180°인 신호를 생성하여 수신된 직접 자기간섭 신호와 결합하였을 경우 직접 자기 간섭 신호는 완벽하게 제거되는 것을 확인할 수 있다. 그림 5의 (b)에서 0.5°의 오차가 발생하였을 경우 수신기로 수신되는 자기 간섭 신호가 -30dB에서 RF Cancellation을 통해 41dB의 자기 간섭 신호를 감쇄하여 남은 자기 간섭 신호가 -71dB의 전력 크기를 갖는 것을 확인할 수 있다. 그러나 자국 수신기에 도달하는 상대국의 송신 신호는 -90dB의 전력 크기를 갖기 때문에 잔류 자기 간섭 신호가 상대국의 송신호

표 1. 시뮬레이션 환경  
Table 1. Simulation parameters

Modulation	QPSK
Channel	ITU Pedestrian A
Adaptive algorithm	LMS
Number of taps	15
Step size	0.00125
Phase shifter error	0°, 0.5°, 1°, 2°

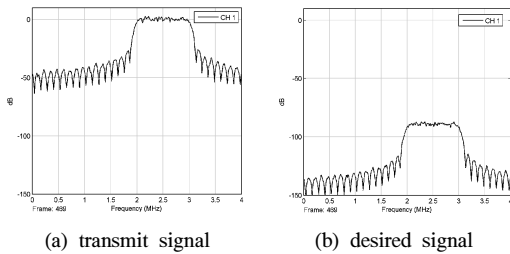


Fig. 3. Spectrum of transmit signal and received desired signal in own station

그림 3. 자국의 송신 신호와 수신 신호의 신호 전력 스펙트럼

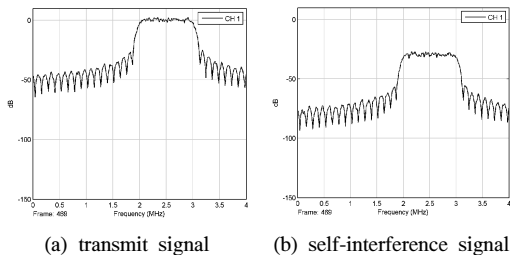


Fig. 4. Spectrum of transmit signal and direct self-interference signal of own station

그림 4. 자국의 송신 신호와 직접 자기 간섭 신호의 전력 스펙트럼

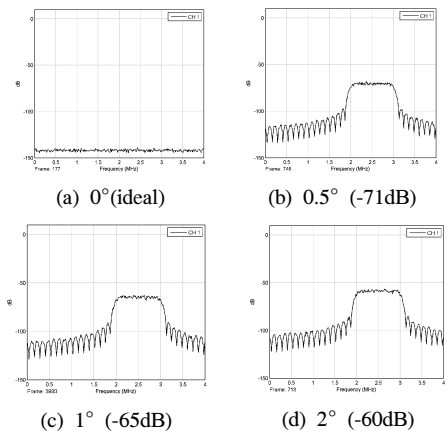


Fig. 5. Spectrum of self-interference signal after RF cancellation according to phase shifter error

그림 5. 위상 천이기 오차에 따른 RF Cancellation 후에 남은 자기 간섭 신호 스펙트럼

보다 월등히 커서 상대국의 데이터를 수신할 수 없다. 그림 5의 (c)와 (d)를 확인했을 경우 오차가 클수록 RF Cancellation 이후 자기 간섭 신호가 더 많이 남는 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 RF Cancellation 방법에서 위상 천이기의 오차가 없을 경우 SSD 시스템의 성능을 나타낸다. RF Cancellation 방법이 이상적으로 이루어지면 직접 자기 간섭 신호가 완벽하게 제거되어 QPSK 시스템과 성능이 유사한 것을 확인할 수 있다. 오차가 없는 RF Cancellation을 적용하였을 경우에는 10dB에서  $6 \times 10^{-6}$ 의 성능을 내는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 RF Cancellation에서 위상 천이기에 오차가 발생하였을 경우 Digital Cancellation을 사용하였을 경우와 사용하지 않았을 경우의 성능을 나타낸다. 위상 천이기에 오차가 있을 경우 Digital Cancellation을 사용하지 않을 경우 RF Cancellation 이후 잔류하는 자기 간섭 신호가 상대국의 송신 신호보다 월등히 크기 때문에 신호가 완전히 왜곡되어 성능이 나오지 않는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Digital Cancellation을 사용하면 이렇게 남은 잔류 자기 간섭 신호를 제거하여 자기 간섭 성분 크기를 상대국의 송신 신호보다 낮출 수 있기 때문에 상대국의 송신 데이터를 수신하는 것이 가능한 것을 확인할 수 있다. 그러나 Digital Cancellation을 통하여 잔류 자기 간섭 신호를 추가적으로 제거 했다고 하더라도 RF Cancellation에서 위상 천이기의 오차가 크게 발생할수록 성능이 열화되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 성능 열화는 프레임 구조를 사용하여 Digital Cancellation

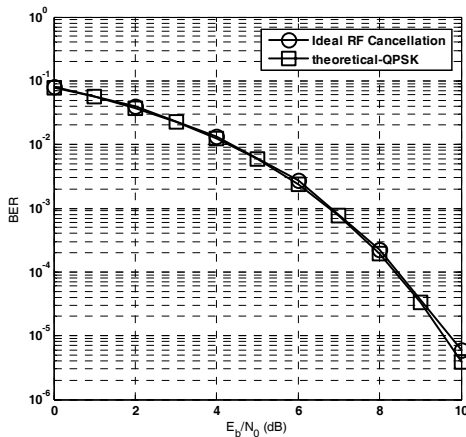


Fig. 6. BER performance of SSD system when RF Cancellation is ideal  
그림 6. 이론적으로 오차가 없는 RF Cancellation 방법에 대한 SSD 시스템의 성능

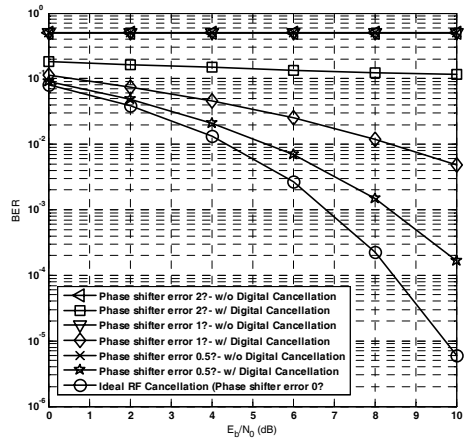


Fig. 7. BER performance of SSD system according to phase shifter error  
그림 7. 위상 천이기에 따른 SSD 시스템의 성능

을 수행할 때 프레임의 추정 구간 내에 LMS 알고리즘의 자기 간섭 채널을 추정하는데 있어서 RF Cancellation에서 자기 간섭 신호가 1차적으로 제거될 때 효과적으로 제거 되지 않으면 크기가 큰 자기 간섭 신호가 Digital 영역으로 진행하게 되고 Digital Cancellation에서 크기가 큰 자기 간섭 신호를 추정할 때 추정을 완료하는데 걸리는 LMS 반복 횟수가 증가하게 되고 이에 따라 추정에 완료되는 시간이 길어지게 되어 주어진 프레임의 추정 구간 내에서 자기 간섭 신호를 보다 명확하게 추정하지 못하여 성능 열화가 발생한다.

그림 8은 다중 경로 자기 간섭 신호 및 상대국의 송신 신호가 ITU Pedestrian A 채널을 통과했을 때

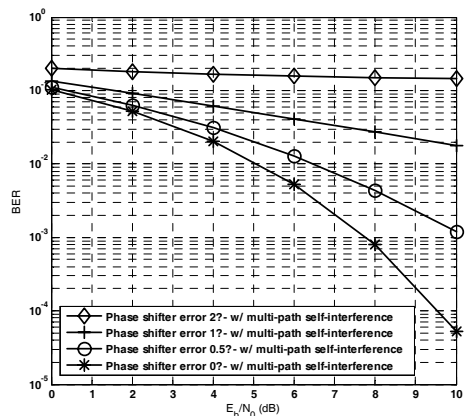


Fig. 8. BER performance of SSD system according to phase shifter error with multi-path self-interference  
그림 8. 다중경로 자기간섭 채널이 있을 때 위상 천이기에 따른 SSD 시스템의 성능

SSD 시스템의 위상 천이기에 따른 성능을 보여 준다. 여기에서 다중 경로 자기 간섭 신호의 크기는 자국에 도달하는 상대국 송신 신호보다 약 3배 큰 크기를 고려하였다. 이러한 조건에서도 RF Cancellation에서 위상 천이기에 오차가 있을 경우 큰 성능 열화가 일어나는 것을 확인할 수 있다. 본 논문의 SSD 시스템은 RF Cancellation 위상 천이기의 오차가 없을 경우 ITU Pedestrian A 채널에서 상대국의 송신 신호보다 3배 큰 다중 경로 자기 간섭 신호가 존재할 때 직접 자기 간섭 신호와 다중 경로 자기 간섭 신호를 제거하면서 10dB에서  $5 \times 10^{-5}$ 의 성능을 낸다.

## V. 결 론

본 논문에서는 RF Cancellation과 Digital Cancellation 방법을 사용하여 자기 간섭 신호를 제거하는 SSD 시스템을 구성 하고, 이 시스템에서 발생할 수 있는 RF Cancellation 방식의 오차에 의해서 발생하는 잔류 자기 간섭 신호에 대한 성능 특성을 분석한다. 본 논문에서는 직접 적인 자기 간섭 신호와 다중 경로에 의한 자기 간섭 신호를 고려하였다. 본 논문의 SSD 시스템은 직접 자기 간섭 신호의 경우 RF Cancellation 방법을 통해 제거하고 다중 경로 자기 간섭 신호 및 RF Cancellation 이후 남은 잔여 자기 간섭 신호는 Digital Cancellation 방법을 통해 제거한다. 본 논문에서는 RF Cancellation 방법에서 위상 천이기에 오차가 발생하였을 때 SSD 시스템의 성능 특성을 분석하였다.

RF Cancellation 방법에서 위상 천이기의 오차가 발생하면 신호의 크기가 매우 큰 직접 자기 간섭 신호 제거에 잔여 자기 간섭 신호가 남게 된다. 본 논문에서 상대국에서 송신 신호 전력을 0dB로 하였을 때 자국으로 도달한 상대국의 송신 신호의 크기는 -90dB로 고려하였다. 즉 자국 송신기의 출력 신호 전력 역시 자국 수신기에 도달하는 상대국의 신호에 비해 90dB 큰 신호가 출력된다. 자국 송신기와 자국 수신기의 거리에 의한 감쇄를 30dB로 고려하였다. 즉 상대국의 송신 신호에 비하여 약 60dB 정도 큰 신호가 직접 자기 간섭 신호로 간섭을 일으키는 상황을 고려하였다. 이 경우 이 잔여 자기 간섭 신호의 크기가 상대국의 송신 신호보다 크기 때문에 데이터를 수신할 수 없다. 그러나 Digital Cancellation 방법을 추가할 경우 위상 천이기의 오차 때문에 발생하는 RF Cancellation 이 후의 잔여 자기 간섭 신호를 제거하여 잔여 자기 간섭 신호의 크기를 상대국의 송신 신호

보다 작게 만들어 상대국의 신호를 수신할 수 있음을 확인하였다. 또한 고정된 프레임 구조에서 LMS 알고리즘을 이용하여 자기 간섭 채널을 추정할 때 RF Cancellation의 오차로 인하여 크기가 큰 크기의 잔류 자기 간섭 신호가 수신기의 Digital 영역에 도달했을 때 고정된 프레임 내에서 자기 간섭 채널 추정이 완전히 이루어지지 않아 성능이 열화되는 것을 확인하였다. 즉, RF Cancellation에서 효과적인 자기 간섭 제거가 이루어지지 않으면 Digital Cancellation을 하기 위한 LMS 알고리즘의 추정 완료 시간이 확장되어 추정 구간내에 추정이 완료되지 못해 성능의 열화를 발생시킬 수 있다는 것을 확인하였다. 결론적으로, 프레임 구조를 이용하여 LMS 알고리즘의 자기 간섭 채널 추정을 향상시킬 경우 Digital Cancellation이 이루어지기 전에 RF 영역에서의 자기 간섭 제거 또한 효과적으로 이루어져야 신뢰도 있는 통신 성능을 기대할 수 있는 것을 확인하였다.

## References

- [1] D. M. Ionescu and A. Boariu, "Predictive closed-loop power control for frequency-division duplex wireless systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 5, no. 6, pp. 248-250, Jun. 2001.
- [2] G. J. R. Povey, "Capacity of a cellular time division duplex CDMA system," *IEE Proc. Commun.*, vol. 141, no. 5, pp. 351-356, Oct. 1994.
- [3] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, *Introduction to space-time wireless commun.*, Cambridge University Press, 2003.
- [4] T. Riihonen, S. Werner, and R. Wichman, "Hybrid full-duplex/half-duplex relaying with transmit power adaptation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 9, pp. 3074-3085, Sept. 2011.
- [5] M. Duarte, C. Dick, and A. Sabharwal, "Experiment-driven characterization of full-duplex wireless systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 12, pp. 4296-4307, Dec. 2012.
- [6] X. Chen, M. Suzuki, N. Miki, and N. Nagai, "Simultaneous estimation of echo path and channel responses using full-duplex transmitted



training data sequences,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 41, no. 5, pp. 1409- 1417, Sept. 1995.

[7] A. Ehsan, et. al., “MIDU: Enabling MIMO full duplex,” in *Proc. 18<sup>th</sup> Annu. Int’l Conf. Mobile computing and networking, ACM*, pp. 257-268, 2012.

[8] N. Phungamngern, P. Uthansakul, and M. Uthansakul, “Digital and RF interference cancellation for single-channel full-duplex transceiver using a single antenna,” *2013 10<sup>th</sup> Int’l Conf. Electrical Engineering/Electronics, Comput., Telecommun. and Inform. Technol. (ECTI-CON)*, pp. 1-5, May 2013.

[9] A. Thangaraj, R.K. Ganti, and S. Bhashyam, “Self-interference cancellation models for full-duplex wireless communications,” *2012 Int’l Conf. Signal Processing and Commun. (SPCOM)*, pp. 1-5, 22-25, Jul. 2012.

[10] N. Li, W. Zhu, and H. Han, “Digital interference cancellation in single channel, full duplex wireless communication,” *2012 8<sup>th</sup> Int’l Conf. Wireless Commun., Networking and Mobile Comput. (WiCOM)*, pp. 1-4, Sept. 2012.

[11] J. I. Choi, M. Jain, K. Srinivasan, P. Levis, and S. Katti, “Achieving single channel, full duplex wireless communication,” in *Proc. 16th Annu. Int’l Conf. Mobile Comput. networking (Mobicom ‘10)*, pp. 1-12, Chicago, USA, Sept. 2010.

[12] N.-I. Yun, C.-H. Kang, Y.-K. Lee, and H.-K. Park, “Broadband characteristics of asymmetric coupled-Line 90° phase shifter with dielectric overlay,” *J. KICIS*, vol. 24, no. 6, pp. 1142-1148, Jun. 1999.

[13] S.-S. Hwang, “Channel estimation based on LMS algorithm for MIMO-OFDM system,” *J. KICIS*, vol. 7, no. 6, pp. 1455-1461, Dec. 2012.

**안 창 영 (Changyoung An)**



2013년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학사)  
 2013년 3월~현재 : 충북대학교 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> 무선통신시스템, 신호처리

**유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)**



1988년~현재 : 충북대학교 전자공학과 교수  
 2002년 3월~2004년 2월 : 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장  
 1996년~현재 : IEEE, IET 논문심사위원

2002년 한국전자과학회 학술상 수상  
 2008년 ICWMC 2008 국제학술대회 “Best Paper Award” 수상  
 2009년 SPACOMM 2009 국제학술대회 “Best Paper Award” 수상  
 <관심분야> 무선통신시스템, 위성통신, B4G/5G 이동통신시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리