

# 터보 등화기를 사용한 SSD 시스템 설계와 성능 개선

안창영\*, 유흥균<sup>o</sup>

## Design and Performance Improvement of Simultaneous Single Band Duplex System Using Turbo Equalizer

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

요 약

본 논문에서는 상대국과 자국간의 채널 상황이 악화될 경우에도 통신의 신뢰도를 보장하고 동일 대역에서 동시에 전 이중 통신을 하기 위한 터보 등화기를 결합한 SSD(simultaneous single band duplex)시스템을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 시스템은 동일 대역 동시 통신에 의해서 발생하는 자기 간섭 신호를 제거하기 위한 방법으로 RF(radio frequency) Cancellation과 Digital Cancellation을 사용하며 자기 간섭 신호를 효과적으로 제거 한 뒤 터보 등화기를 이용하여 상대국과 자국간의 열악한 채널에 의하여 발생한 신호의 왜곡을 등화 한다. 본 논문에서는 제안하는 터보 등화기를 결합한 SSD 시스템을 설계하고 적응 등화기를 사용한 SSD 시스템과 성능을 비교 분석하였다. 본 논문에서는 제안하는 시스템을 Simulink 프로그램을 이용하여 구성하고 성능을 확인하였다. 본 논문에서 제안하는 터보 등화기를 결합한 SSD 시스템의 성능을 확인한 결과 적응 등화기를 사용하는 SSD 시스템에 비하여 상대국과 자국간의 채널 상황이 열악한 상황에서 ISI(inter symbol interference)에 의한 신호의 왜곡을 보다 효과적으로 등화하고 자기 간섭 신호를 제거하면서 동일 대역에서 동시에 전 이중 통신을 할 수 있는 것을 확인하였다.

**Key Words** : SSD, full-duplex, turbo equalizer, iteration, self-interference

### ABSTRACT

In this paper, we propose a SSD(simultaneous single band duplex) system with turbo equalizer for full-duplex over harsh ISI(inter symbol interference) channel. The proposed system uses RF(radio frequency) cancellation and digital cancellation to cancel self-interference caused by simultaneous single band duplex communication. Also, using turbo equalizer, the proposed system equalizes signal after digital cancellation. In this paper, we design SSD system with turbo equalizer. And then we evaluate BER(bit error rate) performance of the proposed system comparison with SSD system with adaptive equalizer. We use simulink program to confirm BER performance of the proposed system. The simulation results shows that the proposed system equalizes received signal effectively over harsh ISI channel and BER performance of the proposed system is better than BER performance of SSD system with adaptive equalizer.

※ 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 : KICS2013-11-492, 접수일자 : 2013년 11월 14일, 심사일자 : 2014년 1월 7일, 최종논문접수일자 : 2014년 1월 8일

## I. 서 론

최근 스펙트럼 효율 향상을 위한 연구가 많이 이루어지고 있다<sup>[1-2]</sup>. 이러한 연구 중 하나로 동일 대역에서 동시에 전 이중통신을 하는 통신 시스템인 SSD 시스템의 연구가 있다<sup>[3]</sup>. SSD 시스템은 동일 대역에서 동시에 송수신을 하기 때문에 주파수 대역을 분할하여 송수신을 동시에 하는 FDD(frequency division duplex) 시스템에 비하여 적은 주파수 대역을 사용하고, 동일 주파수 대역에서 송신과 수신을 시간 도메인에서 분할하여 통신하는 TDD(time division duplex) 시스템에 비하여 대역 효율이 높다<sup>[4]</sup>. 이러한 장점을 갖는 SSD 시스템은 동일 대역에서 동시에 송수신을 하기 때문에 발생하는 자기 간섭 신호를 효과적으로 제거해야 한다<sup>[5]</sup>. 자국의 송신기에서 송신된 신호는 자국 수신기에 간섭을 일으킨다. 자국 수신기에 간섭을 일으키는 자기 간섭 신호는 상대방에서 보낸 수신 신호에 비하여 그 크기가 매우 크다. 따라서 자기 간섭 신호를 제거하지 않으면 상대방에서 보낸 수신 신호가 자기 간섭 신호에 의하여 완전히 왜곡되기 때문에 상대방에서 보낸 수신 신호를 수신할 수 없다. 따라서 SSD 시스템은 자기 간섭 신호를 효과적으로 제거하는 시스템을 추가적으로 가지고 있다.

일반적으로 잘 알려진 자기 간섭 신호 제거 방법에는 RF Cancellation과 Digital Cancellation 방법이 있다. RF Cancellation의 경우 자국 수신기의 RF 영역에서 자기 간섭 신호를 제거하는 방법이다. 자국 송신기에 의한 크기가 큰 자기 간섭 신호의 경우 수신기의 LNA(low noise amplifier)에 인가되면 신호의 크기가 매우 크기 때문에 LNA가 손상될 수 있다. 또한 LNA가 포화되어 상대방에서 보낸 수신 신호를 수신하는 것이 불가능해진다. 따라서 RF 체인의 앞단에서 자기 간섭 신호를 제거한다. RF Cancellation은 자기 간섭 신호와 크기는 같고 위상이 반대인 신호를 생성하여 자기 간섭 신호와 결합해줌으로써 자기 간섭 신호를 상쇄시킨다<sup>[6]</sup>. 여기에서 자기 간섭 신호를 상쇄시키기 위한 신호는 자국 송신기의 RF 영역의 신호를 위상 천이기와 감쇄기에 통과시켜 얻을 수 있다. Digital Cancellation은 자국 수신기의 ADC 이후에 디지털 신호 영역에서 자기 간섭 신호를 제거하는 방법이다<sup>[7]</sup>. Digital Cancellation은 RF Cancellation 이후에 잔류 자기 간섭 신호 성분과 자국 송신기에서 다중 경로를 거쳐 자국 수신기로 되돌아오는 다중 경로 자기 간섭 신호 성분을 제거한다. 그러나 RF Cancellation과 Digital Cancellation 방법을 사용하여

자기 간섭 신호성분을 대부분 감쇄시킨다고 하더라도 미약한 잔류 자기 간섭 신호 성분이 남아서 성능이 열화될 수 있다. 또한 상대방에서 자국으로 오는 신호가 통과하는 채널의 상황이 좋지 않을 경우 자기 간섭 신호를 효과적으로 제거하였다고 하더라도 상대방에서 보낸 수신 신호에서 신뢰도 있는 정보를 수신하는 것이 어렵게 된다. 일반적으로 단일 반송파 시스템에서는 채널 상황에 따라 ISI가 심각하게 발생할 수 있다. 이러한 ISI 효과를 보상하기 위하여 등화기를 사용한다. 등화기에는 일반적으로 적응 알고리즘을 사용하는 적응 등화기가 잘 알려져 있다<sup>[8]</sup>. 그러나 이러한 적응 등화기는 알고리즘이 간단하여 계산이 빠른 장점이 있지만 채널의 상태가 열악한 경우 시스템의 신뢰도 있는 성능을 보장하는 것이 어렵다.

따라서 본 논문에서는 상대방과 자국간의 채널 상황이 악화될 경우에도 통신의 신뢰도를 보장하고 동일 대역에서 동시에 전 이중 통신을 하기 위한 터보 등화기를 결합한 SSD 시스템을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 시스템은 동일 대역 동시 통신에 의해서 발생하는 자기 간섭 신호를 제거하기 위한 방법으로 RF Cancellation과 Digital Cancellation을 사용하며 자기 간섭 신호를 효과적으로 제거 한 뒤 터보 등화기를 이용하여 상대방과 자국간의 열악한 채널에 의하여 발생한 신호의 왜곡을 등화 한다. 본 논문에서는 제안하는 터보 등화기를 결합한 SSD 시스템을 설계하고 적응 등화기를 사용한 SSD 시스템과 성능을 비교 분석한다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서 제안하는 시스템은 동일 대역에서 동시에 전 이중통신을 위하여 RF Cancellation 및 Digital Cancellation을 사용하고 채널 상황이 매우 좋지 않은 상황에서도 좋은 성능을 끌어내기 위하여 터보 등화기를 결합한 시스템이다. 동일 대역에서 동시에 통신을 할 경우 자국의 송신신호가 자국의 수신기로 수신되어 상대방에서 보낸 수신 신호에 간섭을 일으킨다. 이러한 자기 간섭 신호 크기는 상대방에서 보낸 수신 신호에 비하여 매우 크기 때문에 자기 간섭 신호를 제거를 하지 않을 경우 상대방에서 보낸 수신 신호를 정상적으로 수신하는 것이 불가능 하다. RF Cancellation 및 Digital Cancellation은 동일 대역에서 동시에 통신이 이루어지기 때문에 발생하는 자기 간섭 효과를 제거하기 위하여 사용된다. 또한 이러한 자기 간섭 신호를 제거 하였다고 하더라도 잔류하는 자

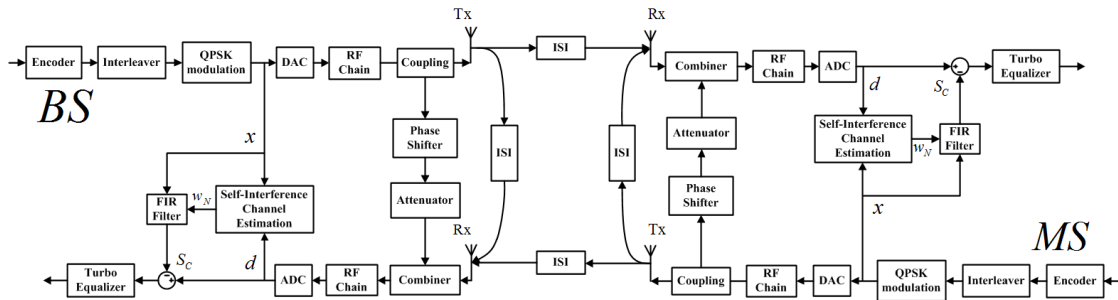


Fig. 1. Block diagram of proposed simultaneous single-band full-duplex system  
 그림 1. 제안하는 동일 대역 동시 통신 시스템의 구성도

기 간섭 신호 성분이 존재할 수 있기 때문에 잔류 자기 간섭 신호 성분을 제거하고 상대방에서 자국 사이의 채널 상황이 매우 좋지 않을 경우를 극복하기 위하여 본 논문에서 제안하는 시스템은 터보 등화기를 사용한다.

그림 1은 본 논문에서 제안하는 시스템을 나타낸다. 여기에서 BS와 MS는 base station과 mobile station을 나타낸다. 제안하는 시스템은 동일 대역에서 동시에 전 이중통신을 하기 위하여 추가적인 자기 간섭 제거 시스템을 가지고 있다. 자국 송신기의 신호 흐름을 살펴보면 데이터 전송의 신뢰도를 높이기 위하여 정보에 오류가 발생하였을 경우 이를 복구하기 위한 인코딩을 한다. 그 다음 인코딩된 신호는 인터리버를 거치게 된다. 인코딩 된 신호라 하더라도 특정한 부분에 집중적이고 연속적으로 오류가 발생한다면 수신 단에서 오류를 복구하는 것이 매우 어렵다. 따라서 오류가 특정한 부분에 집중되는 것을 피하기 위하여 인터리버에서는 데이터의 흐름을 일정한 규칙을 가지고 섞어서 순서를 바꾸게 된다. 다음으로 인터리빙 된 신호는 QPSK(quadrature phase shift keying)로 변조된다. 그 다음 RF Chain을 거쳐 안테나로 송신된다. 자국 수신기의 신호 흐름을 살펴보면 우선 자국 수신기 안테나에는 자기 간섭 신호인 자국에서 보낸 송신 신호와 상대방에서 보낸 수신 신호가 동시에 수신되어 서로 간섭을 일으킨다. 자기 간섭 신호는 상대방에서 보낸 신호에 비하여 그 크기가 매우 크기 때문에 RF Cancellation방법을 통하여 1차적으로 자기 간섭 신호를 RF 영역에서 제거한다. RF Cancellation은 위상 천이기와 감쇄기를 이용한다. RF Cancellation을 한 후에 남은 잔류 자기 간섭 신호 성분을 제거하기 위하여 Digital Cancellation을 한다. Digital Cancellation은 적응 알고리즘을 이용하여 잔류 자기 간섭 신호 성분을 추정하는 부분과 추정된 계수를 이

용하여 잔류 자기 간섭 신호를 제거하는 부분으로 이루어진다. RF Cancellation과 Digital Cancellation방법으로 자기 간섭 신호를 제거하여 자기 간섭의 영향을 최소화 한 후 상대방에서 보낸 수신 신호를 등화하여 상대방에서 보낸 정보를 수신한다. 본 논문에서는 상대방에서 자국 간의 채널 상황이 매우 좋지 않은 상황에서도 시스템의 성능이 안정적인 수 있도록 디코더와 등화기가 연계되어 있는 터보 등화기를 사용한다. 터보 등화기는 디코더와 등화기가 연계되어 있어서 잔류 자기 간섭 신호의 영향으로 일부 정보에 오류가 발생하였다 하여도 이를 복구할 수 있다.

### III. 자기 간섭 제거와 터보 등화기

#### 3.1 RF Cancellation

본 논문에서 제안하는 시스템은 크기가 큰 자기 간섭 신호가 RF Chain으로 진행하기 전에 RF 영역에서 RF Cancellation을 이용하여 자기 간섭 신호를 감쇄시킨다. 수신 안테나에서 수신된 신호가 가장 먼저 거치게 되는 소자는 LNA인데, LNA에 크기가 너무 큰 신호가 인가될 경우 LNA 자체가 손상 받거나 LNA가 포화되어 수신신호가 LNA를 통과할 수 없게 된다. 이러한 문제가 발생하는 것을 막기 위하여 RF 체인 바로 앞단에서 RF Cancellation을 한다. RF Cancellation은 특정 신호와 크기는 같고 위상이 반대인 신호가 결합되면 서로 상쇄되는 원리를 이용한다. 자기 간섭 신호는 자국 송신 신호에 의해 발생하는 것으로 RF Cancellation에서는 자기 간섭 신호와 크기는 같고 위상이 반대인 신호를 생성하기 위하여 자국 송신기의 RF 영역의 신호를 이용한다. 자국 송신기의 RF 신호는 위상 천이기를 통과하면서 자기 간섭 신호와 위상이 반대인 상태가 된다. 위상 천이기를 통과한 후의 신호를 자기 간섭 신호의 크기와 같도록 감쇄 시

킨다. RF Cancellation에서 위상 천이기에 들어가는 위상 천이 수치와 감쇄기의 감쇄 수치는 측정을 통하여 구한 후 설계에 반영한다. 위상 천이기와 감쇄기를 이용하여 자기 간섭 신호와 반대 위상이 되는 신호를 만든 후에 이 신호를 자국 수신기의 RF 체인 앞에 결합기를 통하여 연결시켜 준다. 이러한 방식으로 회로를 구성할 경우 자기 간섭 신호와 반대 위상인 신호가 생성되어 자기 간섭 신호를 제거하게 된다. 그러나 이러한 RF Cancellation은 자국 송신기에서 송신되어 외부 영향을 받고 수신기로 다시 되돌아오기 때문에 자기 간섭 신호 특성을 측정하여 설계하였다고 하더라도 오차가 발생할 수 있다. 특히 자기 간섭 신호의 크기가 매우 크기 때문에 작은 위상 오차가 발생하여도 제거되지 않고 남은 잔류 자기 간섭 신호의 크기가 커지게 된다. 또한 최단 거리를 거쳐 가장 큰 크기로 도달하는 자기 간섭 신호의 경우 RF Cancellation을 통해 효율적으로 제거할 수 있지만 다중 경로를 거쳐 되돌아오는 다중 경로 자기 간섭 신호의 경우 다중 경로 채널 특성이 수시로 바뀔 수 있기 때문에 RF Cancellation 방법을 사용하더라도 제거하기가 어렵다. 이러한 문제로 인해 RF Cancellation을 통하여 자기 간섭 신호를 제거 하였다 하더라도 잔류하게 되는 자기 간섭 신호의 크기는 상대국에서 보낸 수신 신호에 비하여 크기 때문에 추가적인 자기 간섭 제거 방법이 사용된다.

### 3.2 Digital Cancellation

Digital Cancellation은 ADC를 거친 후 디지털 신호를 이용하여 자기 간섭 신호를 제거하는 방법이다. Digital Cancellation은 적응 알고리즘을 사용하여 다중 경로 자기 간섭 성분과 RF Cancellation 이후 남은 잔류 자기 간섭 성분을 추정하여 추정된 신호와 같은 신호를 생성하여 자기 간섭 신호에서 빼줌으로써 자기 간섭 신호를 제거한다. Digital Cancellation 방법에 사용되는 적응 알고리즘의 입력 신호는 자국 송신기의 DAC 이전의 디지털 신호를 사용한다. 적응 알고리즘의 목표 신호는 잔류 자기 간섭 성분이 남아 있는 자국 수신기의 ADC 이후의 디지털 신호를 이용한다. 따라서 적응 알고리즘은 입력 신호를 목표 신호와 근접하게 하는 계수를 추정한다. 즉 추정된 계수가 적용된 FIR 필터에 입력 신호를 통과시킨 후의 신호와 목표 신호 간에 오차가 최소가 되도록 계수를 지속적으로 갱신한다. 본 논문에서는 Digital Cancellation을 위한 적응 알고리즘으로 LMS(least mean square) 알고리즘을 사용한다. LMS 알고리즘은 자기 간섭 신호

성분을 추정하게 된다. LMS 알고리즘에서 입력 신호를 FIR filter에 통과 시킨 후의 신호와 목표 신호와의 오차에 대한 식은 다음과 같다<sup>9)</sup>.

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

식 (1)에서  $d_k$ 는 목표신호이며 잔류 자기 간섭 신호가 포함된 RF Cancellation 이후의 신호를 사용한다.  $X_k$ 는 입력신호이며 자국 송신기의 DAC 이전의 디지털 신호를 사용한다.  $W_k^H$ 는 입력 신호를 목표 신호와 유사하게 만들어 주기 위한 FIR filter의 계수이다. LMS 알고리즘은 목표신호와 FIR filter를 통과한 출력과의 오차가 최소가 되도록 계수를 갱신한다. 계수를 갱신하는 식은 다음과 같다.

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

식 (2)에서  $\mu$ 는 스텝 크기를 나타내며 계수가 갱신되는 간격을 나타낸다.  $\mu$ 의 값이 클수록 FIR filter와 목표 신호와의 오차는 빠르게 감소한다. 반대로  $\mu$ 의 값이 작을수록 오차는 느리게 감소한다.

### 3.3 터보 등화기

본 논문에서 제안하는 시스템은 RF Cancellation과 Digital Cancellation으로 자기 간섭 신호를 효과적으로 제거 한 뒤 등화기를 사용하여 상대국에서 보낸 수신 신호를 등화한다. 본 논문에서는 상대국에서 자국으로의 채널 상황이 매우 좋지 않을 경우에도 좋은 성능을 낼 수 있도록 등화기와 디코더를 결합한 뒤 LLR(log likelihood ratio)값의 반복적인 순환을 통하여 성능을 향상시키는 터보 등화기를 사용한다.

그림 2는 그림 1의 수신기에 있는 터보 등화기의 구성도를 나타낸다. 터보 등화기에는 일반적으로 최적의 등화 성능을 갖는 MAP 등화기가 사용된다. MAP 등화기의 출력은 사후 LLR 값에서 사전 LLR 값을 빼서 구할 수 있으며 다음과 같이 표현된다<sup>10)</sup>.

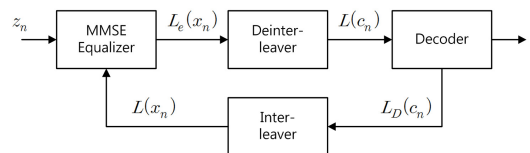


Fig. 2. Block diagram of turbo equalizer  
그림 2. 터보 등화기의 구성도

$$L_e(x_n) \cong \ln \frac{P(x_n = +1|z_1, \dots, z_{K_c})}{P(x_n = -1|z_1, \dots, z_{K_c})} - \ln \frac{P(x_n = +1)}{P(x_n = -1)} \quad (3)$$

여기에서에서  $z_n, n = 1, 2, \dots, K_c$ 은 수신 받은 심볼을 나타낸다. 사전 확률  $L(x_n)$ 은  $x_n$ 의 발생 확률에 대한 사전 정보를 나타내며 디코더로부터 구해진다. 초기 등화 단계에서는 사전 정보가 없기 때문에  $L(x_n) = 0$ 이 된다.

MAP 디코더는 사후 확률  $P(c_n = x|L(c_1), \dots, L(c_{K_c}))$ ,  $x \in B$ , 코드 비트 LLR값  $L(c_n)$ 을 이용하여 연산한다. MAP 디코더의 출력은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$L_D(c_n) = \ln \frac{P(c_n = +1|L(c_1), \dots, L(c_{K_c}))}{P(c_n = -1|L(c_1), \dots, L(c_{K_c}))} - \ln \frac{P(c_n = +1)}{P(c_n = -1)} \quad (4)$$

여기에서 MAP 등화기의 출력  $L_e(x_n)$ 은 MAP 디코더를 위하여 사전 LLR  $L(c_n)$ 으로 고려되었다.  $L(c_n)$ 은  $L_e(x_n)$ 를 디인터리버하여 구해진다. 식 (4)에서 구해진 MAP 디코더의 출력은 인터리버를 거쳐 MAP 등화기로 케환 되어 등화성능을 향상시키게 된다. 또한 디코더는 데이터 비트를 추정하여 출력한다. 데이터 비트 결정을 위한 MAP 디코더의 출력식은 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{b}_i = \arg \max_{b \in \{0,1\}} P(b_i = b|L(c_1), \dots, L(c_{K_c})) \quad (5)$$

#### IV. 시뮬레이션 분석 결과

본 논문에서는 제안하는 터보등화기를 결합한 SSD 시스템의 성능을 분석하기 위하여 Simulink 시뮬레이션 프로그램을 이용하였다. 시뮬레이션을 위한 사항은 다음과 같다.

본 논문에서는 RF Cancellation에서 사용되는 위상 천이기에 오차가  $0.5^\circ$  있는 환경을 고려하였다. Digital Cancellation에서 RF Cancellation 이후의 잔류 자기 간섭 신호와 다중 경로 자기 간섭 신호 성분을 추정하기 위하여 LMS 알고리즘을 사용하였으며

표 1. 시뮬레이션 환경  
Table 1. Simulation parameters

Modulation	QPSK
Adaptive algorithm	LMS
Number of taps	32
Step size	0.001
Channel	Proakis A, Proakis B, Proakis C
Channel coding	Convolutional code
Block size	128
Code rate	3/4
Equalizer	Adaptive Equalizer, Turbo Equalizer
Number of iterations	0, 1, 2, 4
Phase shifter error	$0.5^\circ$
Carrier frequency	2.5MHz

LMS 알고리즘에 사용되는 FIR filter는 32개의 탭을 사용하였다. 또한 추정된 계수를 갱신하는 스텝 크기는 0.001을 사용하였다. 본 논문에서는 제안하는 터보 등화기를 결합한 SSD 시스템과 적응 등화기를 사용한 SSD 시스템의 성능을 분석하였다. 비교를 위한 적응 등화기를 결합한 SSD 시스템의 경우 적응 등화기의 알고리즘으로 LMS 알고리즘을 사용하였으며 탭의 개수는 15개를 사용하였다. 스텝 간격은 0.00125로 구성하였다. 제안하는 터보 등화기 시스템은 4회까지 반복하여 시스템 성능을 확인하였다. 본 논문에서는 상대국과 자국간의 채널 환경이 Proakis A, Proakis B 그리고 Proakis C일 경우를 고려하였다.

그림 3은 자국 송신기에서 송신된 신호의 스펙트럼과 상대국에서 보낸 수신 신호의 스펙트럼을 나타낸다. 자국에서 송신되는 신호의 크기가 20dB일 때 상대국에서 자국으로 보낸 수신 신호의 크기를 -70dB로 고려하였다.

그림 4는 RF Cancellation을 한 후의 신호 스펙트럼을 나타낸다. 본 논문에서는 자국 송신기에서 자국

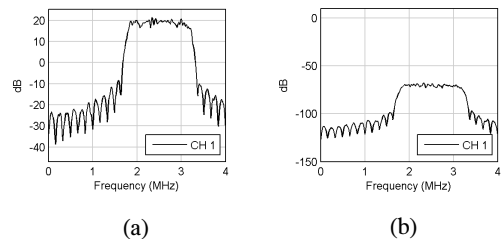


그림 3. 송수신 신호의 스펙트럼 (a) 송신 (b) 수신  
Fig. 3. Spectrum of transmit signal and received signal, (a) transmit (b) receive

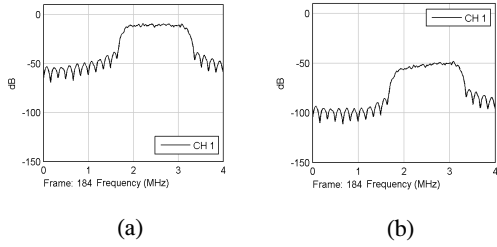


그림 4. RF Cancellation 이후의 신호 스펙트럼 (a) RF Cancellation 전 (b) RF Cancellation 후  
 Fig. 4. Spectrum of signal after RF cancellation, (a) before (b) after

수신기로 신호가 진행할 때 거리에 의하여 30dB 감쇄되는 환경을 고려하였으며 자국 송신기에서 자국 수신기로 다중 경로를 거쳐 되돌아오는 다중 경로 자기 간섭 신호가 있는 경우를 고려하였다. 자국 수신기에서 자기 간섭 신호의 크기는 -10dB이며 RF Cancellation 이후에는 약 40dB의 자기 간섭 신호를 감쇄하여 -50dB의 자기 간섭 성분이 남아있음을 확인할 수 있다. RF Cancellation을 하여도 잔류 자기 간섭 신호의 크기가 상대국에서 보낸 수신 신호에 비하여 약 20dB 더 크기 때문에 RF Cancellation 방법만으로는 상대국의 정보 신호를 수신하는 것이 어렵다.

그림 5는 Digital Cancellation 이후의 신호 스펙트럼을 나타낸다. Digital Cancellation을 적용하여 기저 대역 디지털 신호의 크기는 약 -25dB에서 -60dB로 약 35dB 정도 추가로 감쇄되었다. RF Cancellation을 통과하였을 때 자기 간섭 신호는 -10dB에서 -50dB로 40dB 감쇄되었으며 Digital Cancellation을 통과한 이후 자기 간섭 신호는 35dB가 추가로 감쇄되어 총 75dB의 자기 간섭 신호가 감쇄되었다. 즉 자기 간섭 신호의 크기는 -10dB에서 RF Cancellation과 Digital Cancellation을 적용하여 -85dB로 감쇄되었다. 상대국에서 보낸 수신 신호의 크기가 -70dB이기 때문에 RF Cancellation과 Digital Cancellation을 통

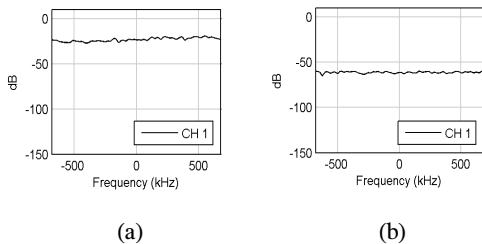


그림 5. Digital Cancellation 이후의 신호 스펙트럼, (a) Digital Cancellation 전 (b) Digital Cancellation 후  
 Fig. 5. Spectrum of signal after digital cancellation, (a) before (b) after

하여 자기 간섭 신호를 효과적으로 제거하여 상대국에서 보낸 수신 신호보다 작게 만들 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 6은 적응 등화기를 사용하는 SSD 시스템의 BER 성능을 나타낸다. 적응 등화기를 사용하는 SSD 시스템은 적응 알고리즘으로 연산이 비교적 간단한 LMS 알고리즘을 사용하였다. 이 시스템은 Proakis A 채널의 경우 10dB에서 약  $10^{-3}$ 을 내는 것을 확인할 수 있다. 또한 Proakis C 채널에서는 매우 좋지 않은 성능을 보여주는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 Proakis A 채널에서 제안하는 터보 등화기를 결합한 SSD 시스템의 성능을 나타낸다. 제안하는 터보 등화기를 결합한 SSD 시스템은 터보 등화기의 전역 반복이 2번일 때 전역 반복이 더 이상 증가하더라도 성능이 유사하게 나오는 것을 보아 전역 반복이 2번일 때 터보 등화기의 성능이 포화되는 것을 확인할 수 있다. Proakis A 채널은 Proakis B, Proakis C 채널에 비하여 상대적으로 좋은 채널이기 때문에 2번의 전역 반복으로도 성능이 포화 된다. LMS 등화기를 사용한 SSD 시스템은 10dB에서 약  $10^{-3}$ 의 성능을 내는 반면 제안하는 터보 등화기를 결합한 SSD 시스템은 터보 등화기의 전역 반복이 2번일 때 10dB에서  $2 \times 10^{-5}$ 의 성능을 내는 것을 확인할 수 있다. 그림 8은 Proakis B 채널에서 제안하는 터보 등화기를 결합한 SSD 시스템의 성능을 나타낸다. 제안하는 터보 등화기를 결합한 SSD 시스템의 경우 전역 반복 횟수가 증가함에 따라 성능이 점차 개선되는 것을 확인할 수 있고 전역 반복이 3번에서 4번이 될 때 성능 개선 폭이 크게 줄어 거의 포화가 되어 감을 확인할

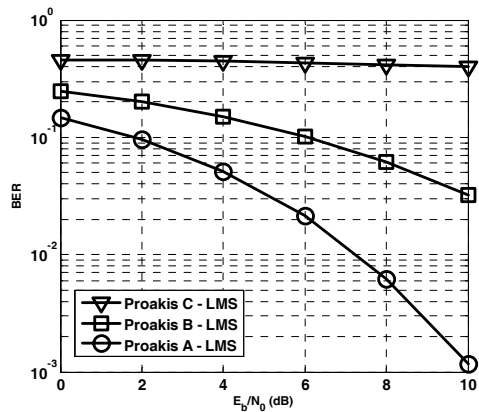


그림 6. 적응 등화기를 사용하는 SSD 시스템의 BER 성능  
 Fig. 6. BER performance of SSD system with adaptive equalizer

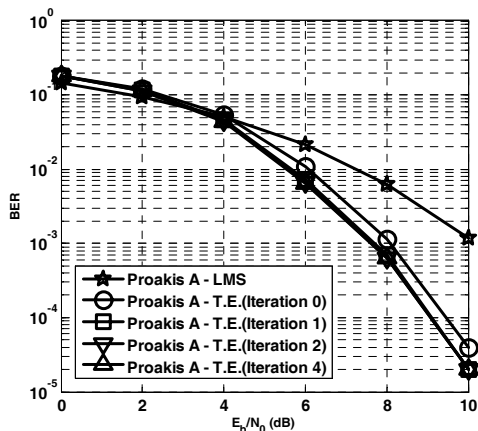


그림 7. Proakis A 채널에서 터보등화기를 결합한 SSD 시스템의 성능  
Fig. 7. BER performance of SSD system with turbo equalizer over Proakis A channel

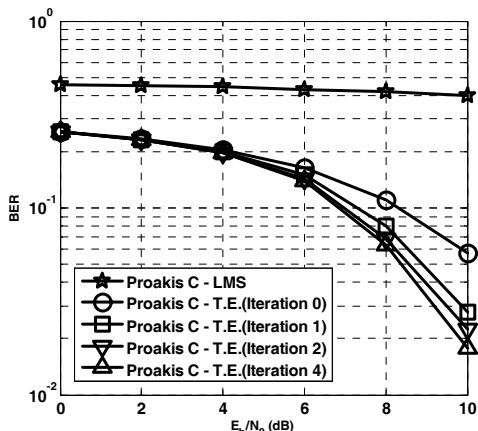


그림 9. Proakis C 채널에서 터보등화기를 결합한 SSD 시스템의 성능  
Fig. 9. BER performance of SSD system with turbo equalizer over Proakis C channel

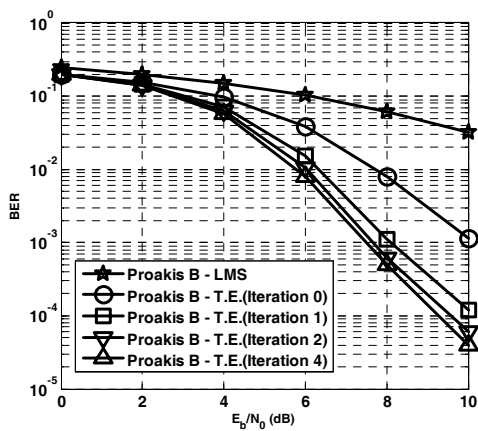


그림 8. Proakis B 채널에서 터보등화기를 결합한 SSD 시스템의 성능  
Fig. 8. BER performance of SSD system with turbo equalizer over Proakis B channel

수 있다. LMS 등화기를 결합한 SSD 시스템의 경우 10dB에서  $3 \times 10^{-2}$ 을 내는 반면 제안하는 시스템은 터보 등화기의 전역 반복이 3번일 때 10dB에서  $6 \times 10^{-5}$ 의 성능을 내는 것을 확인할 수 있다.

그림 9는 Proakis C 채널에서 제안하는 터보 등화기를 결합한 SSD 시스템의 성능을 나타낸다. 제안하는 터보 등화기를 결합한 SSD 시스템의 경우 전역 반복 횟수가 증가함에 따라 성능이 점차 개선되는 것을 확인할 수 있다. LMS 등화기를 결합한 SSD 시스템의 Proakis C 채널 상황에서는 등화를 거의 못하기 때문에 성능이 매우 안좋은 것을 확인할 수 있다. 제안

하는 터보 등화기를 결합하는 SSD 시스템은 매우 열악한 Proakis C 채널에서 터보 등화기의 전역 반복이 4번일 때 10dB에서  $2 \times 10^{-2}$ 의 성능을 내는 것을 확인할 수 있다.

### V. 결 론

논문에서는 터보 등화기를 결합한 SSD 시스템을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 시스템은 자기 간섭 신호 제거를 위해 RF Cancellation을 이용하고 RF Cancellation 이후 잔류 자기 간섭 신호 성분과 다중 경로에 의한 자기 간섭 신호 성분을 제거하기 위하여 추가적으로 Digital Cancellation을 사용한다. 또한 상대국과 자국 사이의 채널 상황이 좋지 않을 경우에도 상대국에서 보낸 수신 신호의 정보를 수신할 수 있도록 터보 등화기를 결합하였다. 본 논문에서는 제안하는 시스템의 성능을 확인하기 위하여 Simulink 프로그램 이용하여 제안하는 시스템을 설계하고 성능을 확인하였다. 본 논문에서 제안하는 시스템은 RF Cancellation 과 Digital Cancellation를 이용하여 자기 간섭 신호를 약 75dB 감쇄 시키는 것을 확인하였다. 또한 제안하는 터보 등화기를 결합한 SSD 시스템은 Proakis A, Proakis B 그리고 Proakis C 채널에서 LMS 등화기와 비교하여 매우 좋은 성능을 보여주는 것을 확인하였다. 즉, 제안하는 시스템은 적응 등화기를 사용하는 SSD시스템에 비하여 열악한 ISI 채널 상황에서도 신뢰도 있는 성능을 낼 수 있는 것을 확인하였다.



References

[1] A. Thangaraj, R. K. Ganti, and S. Bhashyam, "Self-interference cancellation models for full-duplex wireless communications," in *Proc. Int'l Conf. Signal Process. Commun.(SPCOM)*, pp. 1-5, Bangalore, India, Jul. 2012.

[2] 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.

[3] 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, U.S.A., Sept. 2010.

[4] L. Dong, "Open-loop beamforming for frequency-division duplex mobile wireless access," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 56, no. 4, pp. 1845-1849, Jul. 2007.

[5] D. Choi and D. Park, "Effective self interference cancellation in full duplex relay systems," *Electronics Lett.*, vol. 48, no. 2, pp. 129-130, Jan. 2012.

[6] T. Riihonen and R. Wichman, "Analog and digital self-interference cancellation in full-duplex MIMO-OFDM transceivers with limited resolution in A/D conversion," *2012 Conf. Record of the Forty Sixth Asilomar Conf. on Signals, Syst. and Comp.(ASILOMAR)*, pp. 45-49, Nov. 2012.

[7] N. Li, W. Zhu, and H. Han, "Digital interference cancellation in single channel, full duplex wireless communication," *2012 8th Int'l Conf. on Wireless Commu., Networking and Mobile Computing(WiCOM)*, pp. 1-4, 21-23 Sept. 2012.

[8] S.U.H. Qureshi, "Adaptive equalization," in *Proc. of the IEEE*, vol. 73, no. 9, pp. 1349-1387, Sept. 1985.

[9] Y.-H. Jeong, "A adaptive blind equalization algorithm with a double step size LMS using the decision-directed error," *J. KICS*, vol. 37,

no. 2, pp. 55-60, Dec. 2012.

[10] M. Tüchler, R. Koetter, and A.C. Singer, "Turbo equalization: principles and new results," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 5, pp. 754-767, May 2002.

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 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, B4G/5G 이동통신시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리