

논문 2013-50-7-5

# 웨이블릿 OFDM 시스템과 FD-OFDM 시스템 성능 비교 분석

## ( Comparison and Performance analysis of Wavelet OFDM system and FD-OFDM )

이준서\*, 김지훈\*, 김환우\*\*

(Junseo Lee, Ji-Hoon Kim<sup>Ⓢ</sup>, and Whanwoo Kim)

### 요약

본 논문에서는 웨이블릿 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 및 FD-OFDM(Frequency Diversity OFDM) 시스템과 일반 OFDM 시스템의 성능을 비교 분석 한다. 푸리에 변환에 기반하는 일반 OFDM방식과는 달리 웨이블릿 OFDM 방식은 웨이블릿 변환을 사용하며, CDM (Code Division Multiplexing)과 OFDM의 중간적인 특성을 통해 심볼간 간섭을 효과적으로 제거할 수 있으며 채널간 간섭 역시 최소화 할 수 있다. FD-OFDM 방식의 경우, 각 병렬 브랜치에 입력된 심볼들이 직교 시퀀스로 곱해진 뒤 모든 부반송파에 분배되고, 각 부반송파는 주어진 프레임에서 각 병렬 브랜치의 심볼 조각들의 합의 형태로 이루어진 정보를 전달한다. FD-OFDM의 한 부반송파 내에 포함된 모든 심볼들은 직교 시퀀스에 의해 구별되며, 간섭에 강하며 주파수 다이버시티 특성을 가진다는 장점을 지닌다. 협대역 간섭과 하모닉 잡음 환경에서 BER (Bit Error Rate) 성능을 통해 시스템 간 성능 비교 분석을 진행하였으며, 이를 통해 웨이블릿 OFDM과 FD-OFDM의 성능이 일반 OFDM보다 간섭에 대해 강건하고 특히 하모닉 노이즈 환경에서는 웨이블릿 OFDM이 가장 강건한 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

### Abstract

In this paper, we compare the performance of wavelet OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) and FD-OFDM(Frequency diversity OFDM) system with conventional OFDM system. Wavelet OFDM system uses wavelet transform rather than Fourier transform and contains intermediate characteristics of CDM (Code Division Multiplexing) and OFDM. In wavelet OFDM system, inter-symbol interference (ISI) can be suppressed effectively and adjacent channel interference can be also minimized well. In FD-OFDM system, each parallel branch symbol is multiplied by the orthogonal sequence and distributed into all sub-carriers. Then, each sub-carrier transmits information composed of the symbol components of all parallel branches in the given frame. FD-OFDM contains the frequency diversity characteristic and, therefore, FD-OFDM can be robust to the narrowband interference. For the comparison among different systems, BER (Bit-Error Rate) performances are evaluated in the presence of narrow-band interference and a harmonic noise channel. From the evaluation results, compared to the conventional OFDM, wavelet OFDM and FD-OFDM shows better robustness against the interference and, especially, wavelet OFDM is the most robust in harmonic noise channel.

**Keywords** : OFDM, frequency diversity, wavelet, narrow-band interference.

## I. 서론

\* 정회원, \*\* 평생회원, 충남대학교 전자공학부  
(Department of Electronics and Computer Engineering, Chungnam University)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail: [jihoonkim@cnu.ac.kr](mailto:jihoonkim@cnu.ac.kr))

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012R1A1A1A1010064)

접수일자: 2013년2월21일, 수정완료일: 2013년6월25일

OFDM은 다중 주파수 변조의 적응특성을 이점으로 가지고 있음으로써 대역 효율이 높고, 다중경로 페이딩에 강하다<sup>[1~3]</sup>. 그러나 전력선 통신 채널과 같이 재밍이나 고조파 잡음이 있는 좋지 않은 채널 환경에서 OFDM 시스템은 성능 저하가 크게 나타난다. 이런 강

한 간섭에 대한 취약함을 극복하고자, 웨이블릿 OFDM 방식과 FD-OFDM 방식이 연구 개발 되었다<sup>[4~8]</sup>. 두 방식 모두 협대역 간섭 환경에서 우수한 성능을 보이며, 간섭을 줄이는 방식으로 제안되었다<sup>[4, 7]</sup>.

웨이블릿 OFDM은 시간 영역과 주파수 영역에서 모두 집중된 파형을 설계할 수 있고, 따라서 웨이블릿 변환은 CDM과 OFDM의 중간적인 특성을 가진다<sup>[6]</sup>. 또한, 서로 다른 단계에 있는 파형 간에 서로 직교할 뿐만 아니라, 같은 단계에 있는 파형 사이에도 시간적인 편이가 있으면 서로 직교하는 특성을 가지고 있으며, 이와 같은 특성은 심볼 간 간섭을 효과적으로 제거하는데 유용하게 이용할 수 있다<sup>[6, 8]</sup>. 이와 동시에, 직교 파형을 채널의 특성에 따라 최적화 할 수 있도록 설계 할 수 있으므로 채널 간 간섭을 효과적으로 제거할 수 있다<sup>[7]</sup>. FD-OFDM은 입력된 각 병렬 브랜치의 심볼들에 직교 시퀀스로 곱한 뒤 모든 부반송파에 분배하고, 각 부반송파는 주어진 프레임에서 각 병렬 브랜치의 심볼 조각들의 합으로 이뤄진 정보를 전달하는 방식으로, 부반송파 내에 다른 심볼들은 직교 코드에 의해 구별된다<sup>[4]</sup>. FD-OFDM의 이러한 구조는 주파수 다이버시티 특성으로 이어지며, 간섭에 강하다는 특성으로 연결된다.

본 논문에서는 협대역 간섭 및 하모닉 잡음에 취약한 기존의 OFDM 시스템에 대하여 웨이블릿 OFDM 및 FD-OFDM 시스템의 성능을 비교 분석하였으며, 간섭 채널 상황에 따라 시스템 간 성능 분석을 진행하였다.

## II. 시스템 구성과 특성

### 1. 웨이블릿 OFDM 시스템

그림 1과 그림 2는 웨이블릿 OFDM 시스템 송신기의 구성도를 보인다. 기존 OFDM 송신기와 동일하게 S/P (Serial-to-Parallel) 컨버터로 들어가게 되고, IFFT 블록 대신에 IDWT(inverse discrete wavelet transform) 블록으로, 수신단의 FFT블록은 DWT(discrete wavelet transform) 블록으로 대체되며, 출력은 P/S (Parallel-to-Serial) 컨버터로 들어가게 되어 하나의 웨이블릿 OFDM 심볼이 생성되는 시스템이다.

웨이블릿 OFDM 변조방식의 송신신호는  $s(t)$ 를 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>[6]</sup>.

$$s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{\infty} d_m(n) \phi_{l,m}(t-nT) \quad (1)$$

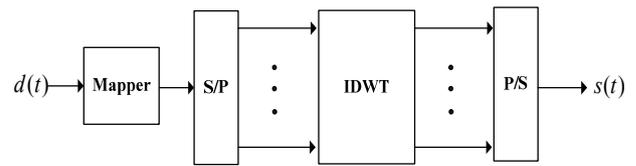


그림 1. 웨이블릿 OFDM 시스템 송신기 구성도  
Fig. 1. Transmitter block diagram of Wavelet-OFDM.

여기서  $d_m(n)$ 은  $n$ 번째 심볼에 대한  $m$ 번째 부채널의 전송 데이터를 의미하며,  $\phi_{l,m}(t)$ 는 2진 트리 구조 웨이블릿 분해 (tree structured wavelet decomposition) 단계에서 1번째 단계의 웨이블릿 패킷 함수를 의미한다.  $T$ 는 심볼 구간이고,  $M$ 은 전송에 사용하는 부채널의 수를 나타낸다.

여기서 웨이블릿 패킷 함수  $\phi_{l,m}(t)$ 는 모함수  $\phi_{01}(t)$ 로부터 다음과 같은 관계식을 만족하도록 확장한다.

$$\begin{aligned} \phi_{l+1,2m-1}(t) &= \sum_n h(n) \phi_{l,m}(t-nT_l) \\ \phi_{l+1,2m}(t) &= \sum_n g(n) \phi_{l,m}(t-nT_l) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $T_l = 2^l T_0$ 이고,  $h(n)$ ,  $g(n)$ 은  $g(n) = (-1)^n h(2k+1-n)$ 의 관계를 가지며, 각각 저역 필터 고역 필터에 해당한다. 그리고 각 분해 단계의 웨이블릿 함수 사이에는 2배 팽창(dilation) 관계로써  $\phi_{l,1}(t) = 2^{-l/2} \phi_{01}(2^{-l}t)$  관계식이 성립하며, 동일 단계 및 서로 다른 단계에 있는 모든 함수는 서로 직교한다. 또 동일 단계에서의 평행이동 함수(translation)사이에도 다음과 같이 직교관계가 성립한다.

$$\langle \phi_{l,m}(t), \phi_{l,m}(t-nT_l) \rangle = \delta(n) \quad (3)$$

따라서 각 단계의 기저 함수  $\phi_{l,m}(t)$ 는 전체가 직교 기저함수를 이루게 된다. 한편 이와 같은 기저함수는 모함수  $\phi_{01}(t)$ 에 의해 모두 결정되며, 이것은 모함수에 따라 통신 시스템의 성능이 결정됨을 의미한다. 같은 단계에 있는 동계함수 사이의 직교성은 심볼 간 간섭 제거에 용이하게 이용할 수 있으며, 같은 함수가 평행이동한 경우  $T_l$  심볼 구간의 정수배 이동해도 직교하는 함수이다. 따라서 모함수  $\phi_{01}(t)$ 의 형태는 웨이블릿의 직교조건만 만족하면 되므로 다양한 형태의 함수를 설계할 수 있다는 장점을 갖는다. 그리고 이와 같이 설

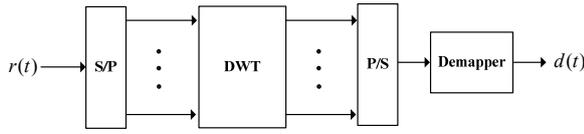
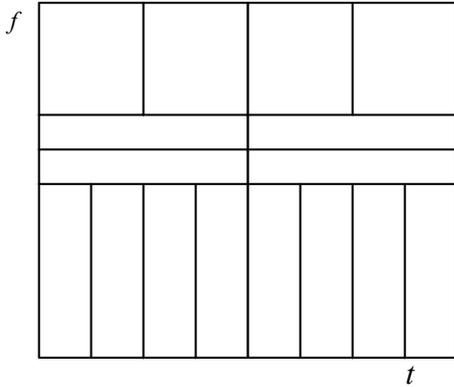
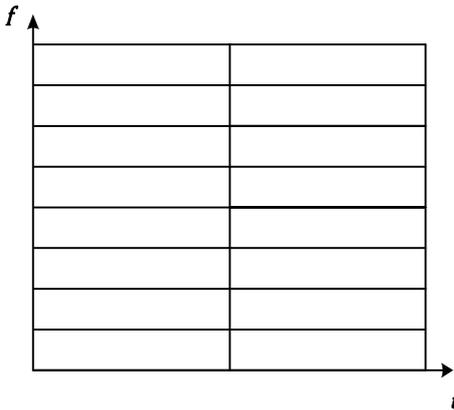


그림 2. 웨이블릿 OFDM 시스템 수신기 구성도.  
Fig. 2. Receiver block diagram of Wavelet-OFDM.



(a) 웨이블릿 OFDM 스펙트럼.



(b) OFDM 스펙트럼.

그림 3. 시간 주파수 영역에서 본 웨이블릿 OFDM 및 OFDM 스펙트럼 비교.

Fig. 3. Comparison spectrum of wavelet OFDM with OFDM.

계한 웨이블릿 함수는 웨이블릿 패킷 변조뿐 아니라, 그림 3과 같이 서로 다른 모양의 시간 주파수 영역을 차지하도록 서로 다른 단계의 웨이블릿 함수를 변조함으로써 다중속도(multi-rate) 전송 시스템을 용이하게 구현할 수 있다.

## 2. FD-OFDM 시스템

### 가. FD-OFDM 송신기 구성

그림 4은 FD-OFDM의 송신부 구성도를 보인다<sup>[4]</sup>. 입력단에서 R bits/sec 의 속도로 입력 데이터가 S/P

컨버터로 들어가게 되고 그것은  $R/N'$  bits/sec의 속도로  $N'$  개의 병렬 데이터를 공급하게 된다. S/P 컨버터의 출력 데이터 신호  $x_q$  는 직교 Walsh Hadamard 시퀀스  $W_q = [w_{q,0}, w_{q,1}, \dots, w_{q,N'-1}]$ 에 의해 확산되며, 확산 후에 데이터 속도는 다시 R bits/sec로 된다 ( $q=0, \dots, N'-1$ ).  $x_q$  가 QAM constellation에서의 복소수로 가정한다면 확산신호는 다음과 같다.

$$X_{q,k} = x_q w_{q,k} = \alpha_q w_{q,k} + j\beta_q w_{q,k} \quad \text{for } k=0, \dots, N'-1 \quad (4)$$

위의 과정은 orthogonal code division multiplexing(OCDM) 이라 불려지고 서로 직교코드에 의해 분리된  $N'$  의 병렬 데이터의 세트에 공급한다.

다음 단계로 각각의 병렬 직교 스트림은 일반 OFDM과 같이 처리된다. 즉, 확산된 신호가 두 번째 S/P 비트 버퍼와 encoder에 들어가고  $N$  개의 병렬 서브 스트림을 공급한다. encoder는 코딩 이득(coding gain)이 2 일 때 다음과 같이 정의된  $N = 2N'$  의 복소 데이터를 만든다.

$$Y_{q,k} = \begin{cases} \alpha_q w_{q,0} & \text{for } k = 0 \\ X_{q,k} & \text{for } k = 1, 2, \dots, N'-1 \\ \beta_q w_{q,0} & \text{for } k = N' \\ X_q^* w_{N-k} & \text{for } k = N'+1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (5)$$

만약 코딩 이득이 4일 때는 코딩 이득이 2일 때의 코딩된 데이터를 두 배로 보내주며 이는 아래와 같이 나타낼 수 있다. 이때  $N = 4N'$  이 된다.

$$Y_{q,k} = \begin{cases} \alpha_q w_{q,0} & \text{for } k = 0 \\ X_{q,k} & \text{for } k = 1, 2, \dots, N'-1 \\ \beta_q w_{q,0} & \text{for } k = N' \\ X_q^* w_{N-k} & \text{for } k = N'+1, \dots, N-1 \\ \alpha_q w_{q,0} & \text{for } k = 2N' \\ X_{q,k} & \text{for } k = 2N'+1, \dots, 3N'-1 \\ \beta_q w_{q,0} & \text{for } k = 3N' \\ X_q^* w_{N-k} & \text{for } k = 3N'+1, \dots, N-1 \end{cases}$$

그리고 이 과정에 의해 IFFT 출력은 다음과 같이 정의된다.

$$y_{q,m} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} Y_{q,k} e^{j2\pi(km/N)} \quad \text{for } m = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

$N$  개의 병렬 IFFT 출력은 P/S 컨버터로 들어가고 그것은 또한 guard - time 또는 cyclic prefix를 각각에 프레임에 첨가하게 된다. 병렬 스트림  $q$ 의 출력 P/S 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$s_q(m) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} Y_{q,k} e^{j2\pi(km/N)} \quad \text{for } m=0,1,\dots,N-1 \quad (7)$$

OFDM 프로세스는 각각의  $q$ 에 의해 병렬로 위치시키고 모든  $N'$  병렬 OFDM 스트림은 주파수와 시간영역에서 동기화 된다. 즉  $N'$  병렬 OFDM은 정확히 똑같은 서브캐리어 주파수와 그것들의 시간 - 프레임이 정확히 동기화 된다. 병렬 신호  $s_q(m)$ 은 합쳐져서 D/A 컨버터로  $s(t)$ 를 공급하기 위해 들어가게 된다.

출력신호는 위 설명에 근거하여 다음과 같은 행렬  $D_{N'}$ 로 표현할 수 있다.

$$D_{N'} = \begin{bmatrix} x_0 & x_0 & \dots & x_0 \\ x_1 & x_1 & \dots & x_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{N'-1} & x_{N'-1} & \dots & x_{N'-1} \end{bmatrix} \begin{matrix} \leftarrow w_0 \\ \leftarrow w_1 \\ \dots \\ \leftarrow w_{N'-1} \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \uparrow & \uparrow & \dots & \uparrow \\ f_0 & f_1 & \dots & f_{N'-1} \end{matrix}$$

모든 OFDM 서브캐리어 주파수 또는  $f_i$ , ( $i=0, \dots, N'-1$ )는 모든 데이터 비트  $x_0, x_1, \dots, x_{N'-1}$ 를 포함한다. 그리고 Walsh Hadamard 시퀀스  $W_q = [w_{q,0}, w_{q,1}, \dots, w_{q,N'-1}]$ 에 의해

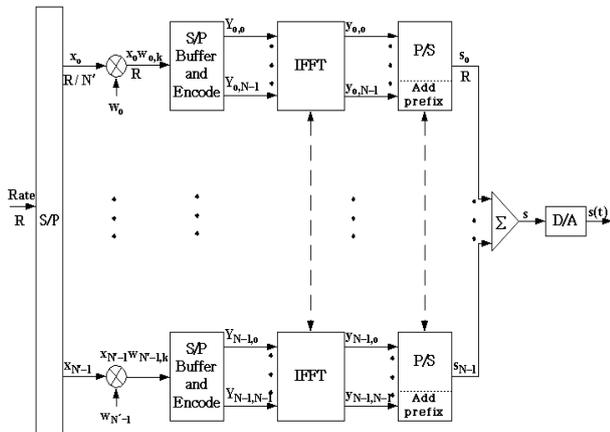


그림 4. FD-OFDM 시스템 송신기 구성도.  
Fig. 4. Transmitter block diagram of FD-OFDM.

서 각각 구별된다. 이것은 각각의 데이터 비트의 전력이 확산 되었다는 것을 의미한다.

특별히 직교 시퀀스가 Walsh Hadamard가 아니라 (0,1)을 가지고 있다면 다음과 같다.

$$W_q = [w_{q,k}] \quad \text{where } w_{q,k} = \begin{cases} 1 & \text{for } q=k \\ 0 & \text{for } q \neq k \end{cases} \quad (8)$$

이 경우, FD-OFDM는 보통의 OFDM과 같이 된다.

$$D_{N'} = \begin{bmatrix} x_0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & x_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & x_{N'-1} \end{bmatrix}$$

#### 나. FD-OFDM 수신기 구성

기본적인 FD - OFDM의 수신기의 구조는 그림 5와 같다.

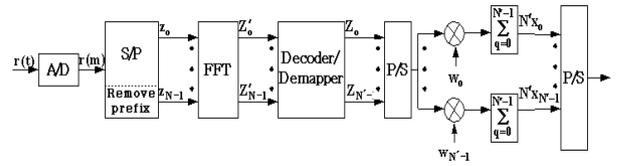


그림 5. FD-OFDM 시스템 수신기 블록도.  
Fig. 5. Receiver block diagram of FD-OFDM.

복조 와 A/D (Analog-to-Digital) 변환 후의 수신 신호  $r(m)$ 은 S/P 컨버터로 들어간다. 그리고  $N$  개의 병렬 데이터 포인트  $Z_m$ 을 공급 한다 ( $m=1, 2, \dots, N-1$ ). 병렬 데이터  $Z_m$ 은 그때 DFT에 들어가고  $N$  복소 데이터 신호 포인트는 다음과 같이 주어진다.

$$Z'_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=0}^{N-1} z_m e^{-j2\pi(km/N)} \quad (9)$$

위의 병렬 데이터는 decoder/demapper 에 들어가고  $N' = N/2$  데이터 포인트를 만들며 이는 다음과 같이 정의된다.

$$Z_k = \begin{cases} Z'_k & \text{for } k=1, 2, \dots, N'-1 \\ Z'_0 + jZ_{N'} & \text{for } k=0 \end{cases} \quad (10)$$

이것은 일반 OFDM 시스템과 같이 처리된다. P/S 컨버터에 들어가는  $N'$  병렬  $Z_k$  포인트는  $N'$  Hadamard 시퀀스  $W_q = [w_{q,0}, w_{q,1}, \dots, w_{q,N'-1}]$ 에 의해 그림 5에서 처럼 데이터를 복원하기 위해 역 확산된다 ( $q = 0, 1, \dots, N' - 1$ ).

기본적인 FD-OFDM 시스템의 함수들을 정의하기 위해 A/D 컨버터의 출력의 수신 신호가 송신된 신호와 같다고 가정한다. 그때의 FFT의 출력은 다음과 같다.

$$b_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=0}^{N-1} s_m e^{-j2\pi(km/N)} \quad \text{for } m=0, 1, \dots, N-1 \quad (11)$$

$s_m$  은 S/P 컨버터의 출력이고 cyclic prefix가 제거된 후의 신호 포인트이다. 그리고 그때의 decoder/demapper의 출력에서 신호 포인트는 다음과 같다.

$$a_k = \sum_{m=0}^{N'-1} x_q w_{q,k} \quad \text{for } m=0,1,\dots, N'-1 \quad (12)$$

P/S 컨버터 후의 0번째 역확산기의 출력에서 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{N'}} \sum_{k=0}^{N'-1} a_k w_{o,k} &= \frac{1}{\sqrt{N'}} \sum_{k=0}^{N'-1} \left[ \sum_{q=0}^{N'-1} x_q w_{q,k} \right] w_{o,k} \\ &= \frac{1}{\sqrt{N'}} \sum_{q=0}^{N'-1} x_q \sum_{k=0}^{N'-1} w_{q,k} w_{o,k} = \begin{cases} \sqrt{N'} x_o & \text{for } q=0 \\ 0 & \text{for } q \neq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

### III. 성능분석과 논의

#### 3-1 협대역 간섭 성능

협대역 간섭이 일정한 대역폭을 갖고 JSR(jamming to signal power ratio)이  $-10 \sim +10$  dB로 증가할 때, 그리고 일정한 JSR을 갖고 대역폭이 점차 넓어질 때의 두가지 측면으로 BER성능을 나타낸다. 편이를 위해 간섭 대역폭을 band라 표현하며 이는 간섭 대역폭 내에 위치하여 그 영향을 받는 부 반송파의 수를 나타낸다. 성능분석에 사용되는 FD-OFDM과 웨이블릿 OFDM은 일반 OFDM과 동등한 비교를 위해 encoding 부분을 생략하며 부반송파의 수  $N' = 16$ 과 256으로 한다. 변조 방식은 QPSK이며 채널 환경은 협대역 간섭과 AWGN(additive white gaussian noise) 채널이라 가정

한다. 모든 성능 분석은 Monte Carlo 시뮬레이션을 이용하였다.

#### 가. JSR의 크기에 따른 성능.

일정한 간섭 대역폭에서 JSR의 크기에 따라 나타나는 BER 성능을 앞에서 언급한 두 가지 부 반송파의 경우 각각 비교 분석한다. 첫째로, 간섭 대역폭 band = 4이며, 부반송파 수는 16으로 설정한다. 이는 시스템 내에서 연속된 4개의 부반송파가 차지하는 대역과 같다. JSR은  $P_i/P_s$ 로 정의하며 3dB, 6dB, 9dB에서 측정한다. 여기서  $P_i$ 는 간섭 전력이며  $P_s$ 는 신호 전력이다. 성능 곡선의 Y축  $P_e$ 는 BER을 의미한다.

위의 그림 6, 그림 7과 그림 8은 JSR이 3dB씩 증가

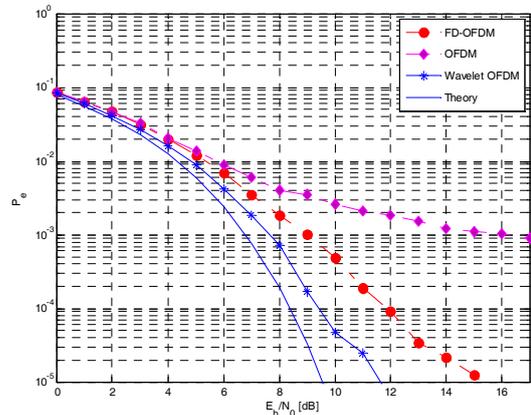


그림 6. 1/4 시스템 대역에 걸쳐 협대역 간섭이 존재 할 때 성능곡선 (JSR = 3dB)  
Fig. 6. BER Performance with narrow-band interference over 1/4 system bandwidth @ JSR = 3dB.

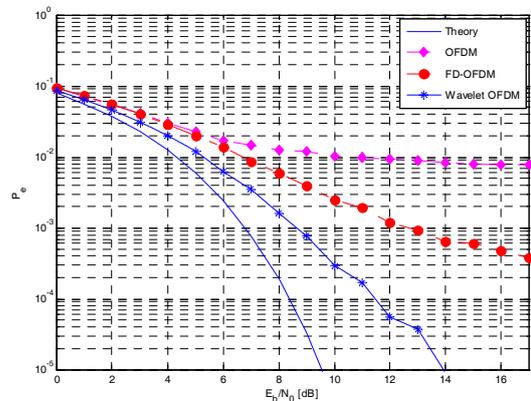


그림 7. 1/4 시스템 대역에 걸쳐 협대역 간섭이 존재 할 때 성능곡선 (JSR = 6dB)  
Fig. 7. BER Performance with narrow-band interference over 1/4 system bandwidth @ JSR = 6dB.

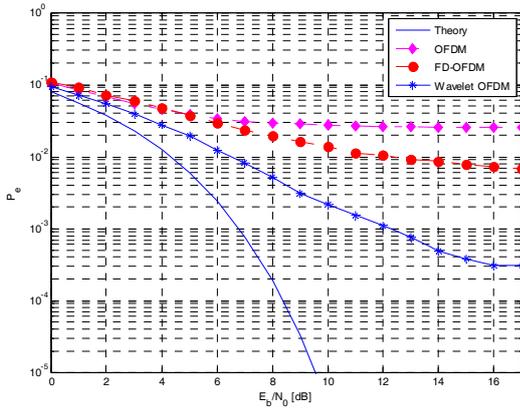


그림 8. 1/4 시스템 대역에 걸쳐 협대역 간섭이 존재 할 때 성능곡선 (JSR = 9dB)  
Fig. 8. BER Performance with narrow-band interference over 1/4 system bandwidth @ JSR = 9dB.

할 때, OFDM과 FD-OFDM과 웨이블릿 OFDM의 BER 성능을 나타낸다. 그림에서 보는 것과 같이 JSR이 3 dB에서 FD-OFDM과 웨이블릿 OFDM의 BER 곡선은 크게 차이가 나지 않지만, 일반 OFDM의 BER 곡선은 매우 큰 폭으로 점차 높아짐을 알 수 있다. 그러나 JSR이 계속 증가하면 FD-OFDM의 BER 곡선은 크게 상승하고 웨이블릿 OFDM의 BER 곡선은 비교적 그 상승의 폭이 작아짐을 알 수 있다. 결국 위의 결과로부터 웨이블릿 OFDM이 FD-OFDM과 일반 OFDM보다 JSR이 일정 크기 이하일 때 매우 좋은 성능을 갖는다는 것을 확인할 수 있으며, 웨이블릿 변조가 Walsh Hadamard 시퀀스를 이용한 대역 확산보다 협대역 간섭에 강인함을 알 수 있다.

두 번째로 간섭 대역폭 band = 4이며, 부반송파가 256 일 때, JSR이 -10~+10 dB로 변화시키며 각각의 시스템에 성능을 측정한다. 그림 9와 그림 10 그리고 그림 11은 위의 주어진 조건하에 그려진 OFDM과 FD-OFDM 그리고 웨이블릿 OFDM의 BER 성능을 나타낸다. 그림에서 보는 것과 같이 JSR이 5dB 이하에서는 FD-OFDM과 웨이블릿 OFDM이 비슷한 경향으로 BER 곡선이 크게 변하지 않고 일반 OFDM의 BER 곡선만 매우 큰 폭으로 높아지며, error floor를 나타낸다. 그러나 JSR이 계속 증가하면 FD-OFDM과 웨이블릿 OFDM이 비슷한 경향으로 BER 곡선이 크게 상승하고 일반 OFDM의 BER 곡선은 비교적 그 상승의 폭이 작아짐을 확인할 수 있다. 이러한 error floor는 JSR이 협대역 간섭 대 신호의 비이므로 그 크기가 시스템의 한계를 넘어서는 환경에서는 SNR(signal to noise

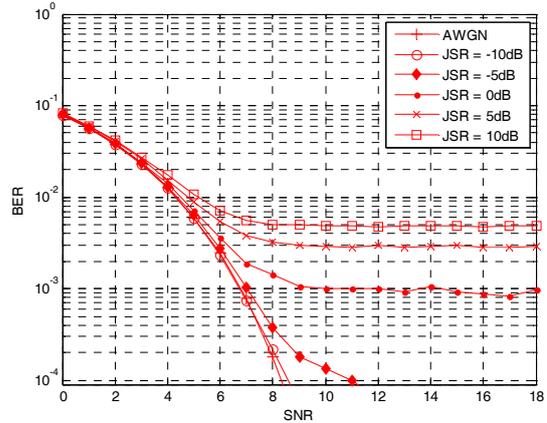


그림 9. 일반 OFDM의 JSR에 따른 BER성능.  
Fig. 9. BER performance of OFDM when JSR = -10 ~ +10 dB.

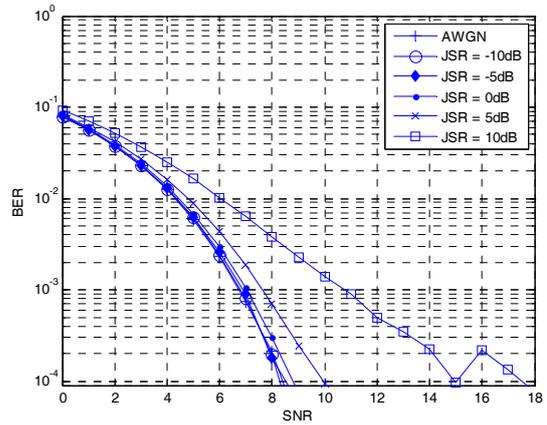


그림 10. FD-OFDM의 JSR에 따른 BER성능.  
Fig. 10. BER performance of FD-OFDM when JSR = -10 ~ +10 dB.

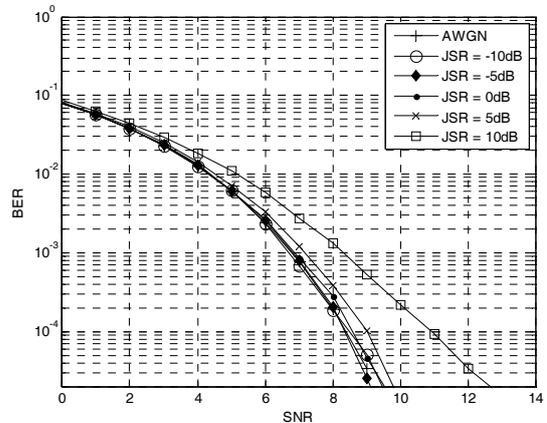


그림 11. 웨이블릿 OFDM의 JSR에 따른 BER성능.  
Fig. 11. BER performance of wavelet OFDM when JSR = -10 ~ +10 dB.

ratio)이 증가하여도 BER이 더 이상 감소하지 않게 되는 것이다. 위의 결과로부터 FD-OFDM과 웨이블릿 OFDM이 일반 OFDM보다 협대역 간섭에 강건성이 더 크다는 것을 알 수 있으며, 웨이블릿 OFDM이 FD-OFDM보다 비교적 더 강건하다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 JSR이 일정 크기이하일 때, FD-OFDM과 웨이블릿 OFDM 모두 매우 좋은 성능을 갖는다.

나. 간섭 대역폭에 따른 성능.

일정한 JSR에서 간섭 대역을 변화하였을 때 나타나는 BER 성능을 분석한다. 여기에서 JSR = 0dB로 하며 간섭 대역, 즉 band = 2, 4, ..., 64, 128 에서 측정한다.

그림 12과 그림 13 그리고 그림 14는 각각 OFDM과 FD-OFDM 그리고 웨이블릿 OFDM 의 협대역 간섭 대역폭 변화에 따른 BER 특성을 나타낸다. 그림에서와

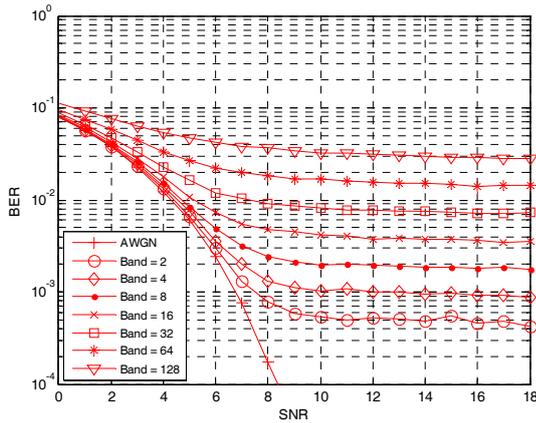


그림 12. Band에 따른 일반 OFDM의 BER 성능.  
Fig. 12. BER performance of OFDM when Band = 2 ~ 128.

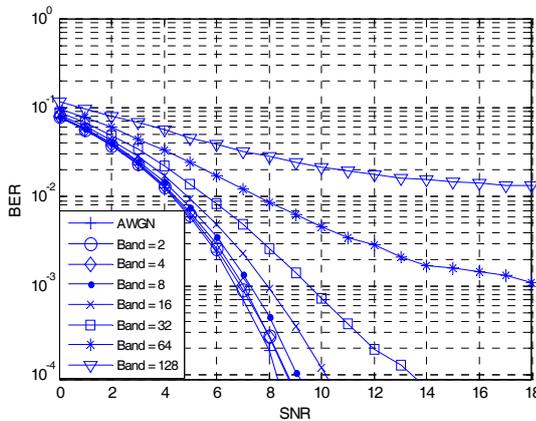


그림 13. Band에 따른 일반 FD-OFDM의 BER 성능.  
Fig. 13. BER performance of FD-OFDM when Band = 2 ~ 128.

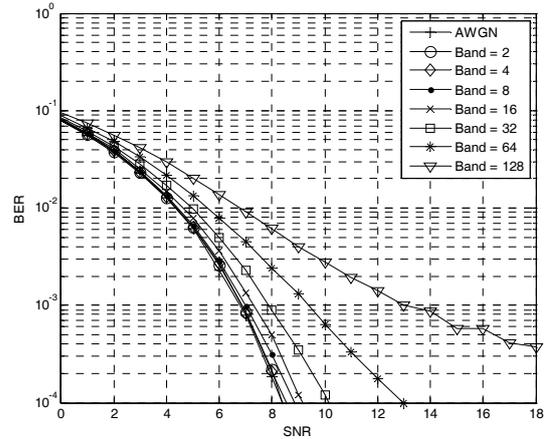


그림 14. Band에 따른 웨이블릿 OFDM의 BER 성능.  
Fig. 14. BER performance of Wavelet OFDM when Band = 2 ~ 128.

같이 band = 128 일 때는 OFDM과 FD-OFDM은 성능 차이가 크지 않지만 웨이블릿 OFDM의 성능이 가장 우수한 것을 확인할 수 있다. 또한, band가 작아지면, 특히 band < 32 일 때 OFDM과의 성능 차이가 매우 크게 나타난다. 하지만, FD-OFDM과 웨이블릿 OFDM의 성능 차이는 크지 않다. 웨이블릿 OFDM과 FD-OFDM은 OFDM보다 일정 대역폭 이하의 협대역 간섭에서 우수한 성능을 갖는다는 것을 알 수 있다.

3-2. 하모닉 잡음에 대한 성능비교

하모닉 잡음은 임펄스 형태로 나타나며 시스템 대역 전체에 걸쳐 일정한 주파수 간격으로 균일하게 분포한다. 하모닉 잡음의 조밀도는 시스템 대역 내에 분포하는 하모닉 잡음들이 차지하는 대역폭과 시스템 대역폭

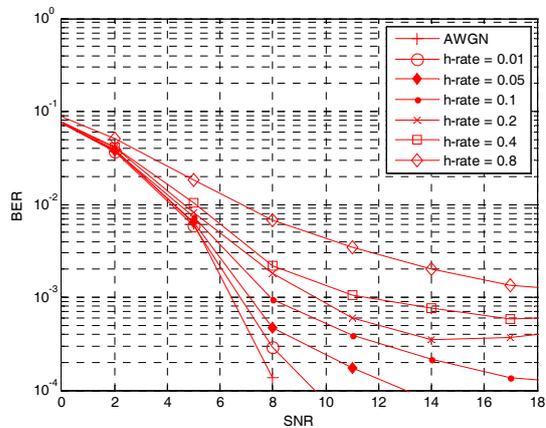


그림 15. 일반 OFDM의 h-rate(0.01~0.8)에 따른 BER 성능.  
Fig. 15. BER performance of OFDM when h-rate = 0.01 ~ 0.8.

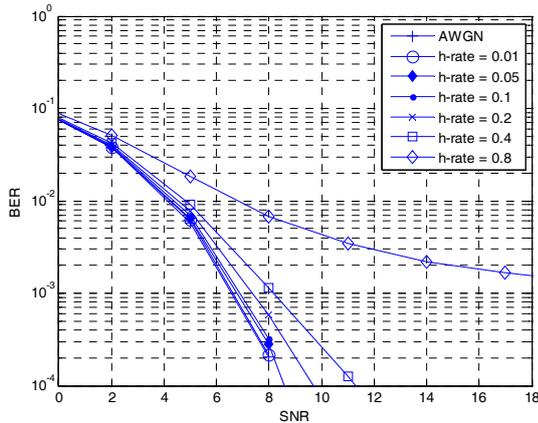


그림 16. FD-OFDM의 h-rate(0.01~0.8)에 따른 BER 성능.  
Fig. 16. BER performance of FD-OFDM when h-rate = 0.01 ~ 0.8.

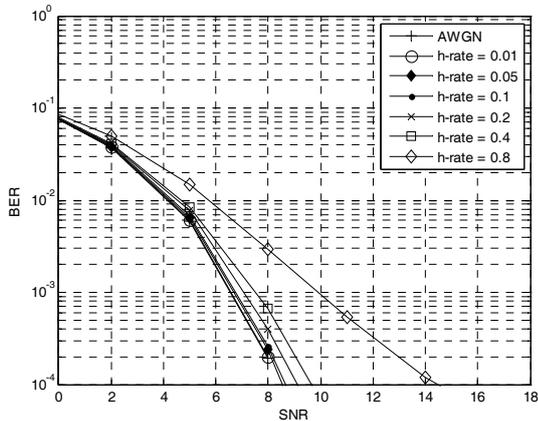


그림 17. 웨이블릿 OFDM의 h-rate(0.01~0.8)에 따른 BER 성능.  
Fig. 17. BER performance of Wavelet OFDM when h-rate = 0.01 ~ 0.8.

의 비율로 나타낼 수 있으며 본 논문에서는 'h-rate'라 표기하였다. 하모닉 잡음과 신호의 전력비 JSR = 0 dB로 정하고 h-rate이 0.01, 0.05, 0.1, ..., 0.8 일 때 세 가지 시스템의 BER 성능을 비교 및 분석한다.

위의 그림 15와 그림 16 그리고 그림 17은 각각 OFDM과 일반 FD-OFDM 그리고 웨이블릿 OFDM의 h-rate에 따른 BER 성능을 나타낸다. 앞의 1절에서와 유사하게 낮은 h-rate에서 일반 OFDM과 나머지 두 시스템의 성능차이는 크게 나타나며 h-rate > 0.4 일 때 FD-OFDM의 BER 곡선이 매우 높아져 결국 h-rate = 0.8 일 때 OFDM 시스템과 성능은 같게 나타난다. 하지만 웨이블릿 OFDM은 h-rate = 0.8 일 때도 가장 강건함을 알 수 있다.

이러한 결과로부터 하모닉 잡음 환경에서 웨이블릿

변환이 탁월한 효과가 있으며, 웨이블릿 OFDM 성능이 FD-OFDM과 일반 OFDM보다 좋은 성능을 갖는다는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 웨이블릿 OFDM과 FD-OFDM의 협대역 간섭과 하모닉 노이즈에 대한 강건함을 일반 OFDM 시스템과 비교한다. 협대역 간섭에 대한 성능분석 결과 일정한 대역폭의 협대역 간섭이 있는 경우 JSR이 -10 ~ +10dB로 증가할 때, 낮은 JSR에서는 웨이블릿 OFDM과 FD-OFDM이 성능이 비슷하고 우수하며, 일반 OFDM이 가장 나쁘다. 하지만, JSR이 증가되면 웨이블릿 OFDM 성능이 가장 우수하다. 그리고 일정 JSR에서 협대역 간섭의 대역폭이 증가할 때도 역시 유사한 성능특성을 보인다. 하모닉 노이즈에 대한 성능분석 결과 또한 JSR이 0 dB인 하모닉 노이즈의 조밀도 h-rate이 0.01 ~ 0.8로 증가할 때 위의 결과들과 유사한 성능특성을 나타낸다.

이러한 성능 분석으로부터 웨이블릿 OFDM과 FD-OFDM의 성능이 일반 OFDM보다 간섭에 대해 매우 강건함을 알 수 있으며, 하모닉 노이즈 환경에서는 특히 웨이블릿 OFDM이 가장 좋은 것을 알 수 있으며, 이는 웨이블릿 변환이 Walsh Hadamard 시퀀스 확산보다 왜곡에 탁월한 효과가 있음을 확인 할 수 있다. 하지만 웨이블릿 방식은 필터 뱅크 구조로 이루어져 있어 기존 OFDM보다 하드웨어 복잡도가 증가한다는 단점이 있으며, FD-OFDM 또한 코딩 이득이 커지면 상대적으로 bit rate는 감소하므로 너무 큰 코딩 이득은 시스템의 효율을 저하시키는 결과를 가져 올 수 있다. 두 가지 방식 모두 전송속도 및 시스템이 사용되는 채널 환경을 고려하여 적절히 선택해야 한다.

이러한 결과들로 볼 때 웨이블릿 OFDM 시스템은 간섭에 의한 영향을 줄이는 가장 좋은 해결 방안이 될 수 있으며, 특히 간섭이 크게 작용하는 전력선 통신이나 무선 통신 채널에 가장 좋은 방식을 확인 할 수 있다.

#### REFERENCES

[1] Ramjee Prasad and Shinsuke Hara, "An Overview of Multi-Carrier CDMA," IEEE Communications Magazine, vol. 35, no. 12, pp.

- 126-133, December 1997.
- [2] J. A. C. Bingham, "Multi carrier modulation for data transmission: an idea whose time has come," IEEE Communications Magazine, vol. 28, no. 5, pp. 5-14, May 1990.
- [3] H. Sari, G. Karam, and I. Jeanclaude, "Transmission techniques for digital terrestrial TV broadcasting," IEEE Communications Magazine, vol. 33, no. 2, pp. 100-109, February 1995.
- [4] Diakoumis Gerakoulis and Paola Salmi, "An Interference Suppressing OFDM System for Ultra Wide Bandwidth Radio Channels," IEEE Conf. on Ultra Wideband Systems and Technologies, pp. 259-264, 2002.
- [5] Sohaib Kiani, Sabia Baig, M. Junaid Mughal, "Overlap Frequency Domain Equalization for Wavelet OFDM," 대한전자공학회, International Technical Conf. on Circuits Systems, Computers and Communications, pp. 1346-1349, July 2009.
- [6] M. K. Lakshmanan, D. Karamehmedović, H. Nikookar, "An Investigation on the Sensitivity of Wavelet Packet Modulation to Time Synchronization Error," Springer US Wireless Personal Communications, vol. 58, Issue 3, pp 483-502, June 2011.
- [7] K. M. Wong, et. al, "Performance of Wavelet Packet-Division Multiplexing in Impulsive and Gaussian Noise," IEEE Trans. on Commun, vol. 48, no. 7, pp.1083- 1086, July 2000.
- [8] B. G. Negash, H. Nikookar, "Wavelet-Based Multi carrier Transmission over Multipath Wireless Channels," IEE Electronics Letters, vol. 36, no. 21, pp.1787-1788, October 2000.

---

 저 자 소 개
 

---



이 준 서(정회원)  
 2003년 충북대학교 전자공학과  
 학사.  
 2005년 충북대학교 전자공학과  
 석사.  
 2007년 충남대학교 전자공학과  
 박사 수료.

2011년~현재 LG이노텍 OS개발실 주임연구원.  
 <주관심분야 : 신호 및 영상처리, 디지털 통신,  
 FPGA 설계>



김 지 훈(정회원)-교신저자  
 2004년 KAIST 전기 및 전자공학  
 과 학사.  
 2009년 KAIST 전기 및 전자공학  
 과 박사.(석박통합과정)  
 2009년~2010년 삼성전자  
 DMC연구소 책임연구원.

2010년~현재 충남대학교 전자공학과 조교수.  
 <주관심분야: 통신모뎀, SoC (System-on-Chip),  
 프로세서>



김 환 우(평생회원)-교신저자  
 1996년 서울대학교 전자공학과  
 학사.  
 2000년 한국과학기술원 전기 및  
 전자공학과 석사.  
 2004년 University of Utah,  
 전자공학과 박사.

1980년~현재 충남대학교 전기정보통신공학부  
 교수  
 2004년~2005년 IEEE 대전섹션 의장  
 2007년~현재 대한전자공학회 대전충남지부  
 지부장  
 <주관심분야 : 신호처리, 디지털 통신, 무선 통  
 신>