

주파수 다이버시티를 이용한 IS-OFDM 시스템의 간섭 성능 분석

Anti-Interference Analysis of IS-OFDM using the Frequency Diversity

김상우 · 박종현 · 유흥균 · 이상태* · 정순기

Sang-Woo Kim · Jong-Hyun Park · Heung-Gyoon Ryu · Sang-Tae Lee* · Soon-Key Jung

요 약

본 논문에서는 IS-OFDM(Interference Suppressing Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템과 일반 OFDM 시스템을 비교 분석하였다. 입력된 IS-OFDM의 각 병렬 브랜치 시퀀스로 곱해진 뒤 모든 부반송파에 분배되고, 각 부반송파는 주어진 프레임에서 각 병렬 브랜치의 심볼 조각들의 합으로 이뤄진 정보를 전달한다. 한 부반송파 내에 포함된 모든 심볼들은 직교 시퀀스로 구별된다. IS-OFDM은 주파수 다이버시티 특성을 가지며 간섭에 강하다. 시스템의 성능분석은 협대역 간섭과 하모닉 잡음 환경에서 각각 BER 성능을 분석하였다. 협대역 간섭에 대한 성능분석 결과, 일정한 대역폭의 협대역 간섭인 경우는 JSR(jamming to signal power ratio)이 $-10 \sim +10$ dB로 증가할 때, 낮은 JSR에서는 IS-OFDM이 우수하며, JSR이 증가되면 그 성능차가 작아진다. 그리고 일정 JSR에서 협대역 간섭의 대역폭이 증가할 때도 역시 유사한 성능특성을 보인다. 하모닉 잡음에 대한 성능분석 결과 또한 JSR이 0 dB인 하모닉 잡음의 조밀도 h-rate이 0.01~0.8로 증가할 때 위의 결과들과 유사한 성능특성을 나타낸다. 그러므로 IS-OFDM의 성능이 일반 OFDM보다 간섭에 강건함을 알 수 있다.

Abstract

In this paper, we compare the performance of IS-OFDM(interference suppressing orthogonal frequency division multiplexing) system with that of the conventional OFDM system. Each parallel branch symbol of IS-OFDM 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. The structure of IS-OFDM shows the frequency diversity characteristic. Therefore, IS-OFDM can be robust to the narrowband interference. BER performances are found in the narrow-band interference and a harmonic noise channels. When JSR(Jamming to signal ratio) increases from -10 dB to $+10$ dB in the constant interference bandwidth, IS-OFDM outperforms the conventional OFDM and the BER difference between IS-OFDM and OFDM is reduced as JSR increases. Also, the similar property can be shown when interference bandwidth increases at the constant JSR. In the harmonic noise channel, we can find the good performance of IS-OFDM when the h-rate(harmonic noise bandwidth to signal bandwidth ratio) increases from 0.01 to 0.8. So, simulation results show that the IS-OFDM is more robust to the interference than the conventional OFDM.

Key words : OFDM, Frequency Diversity, Narrow-band Interference

I. 서 론

OFDM은 고속 전송률을 갖는 데이터 열을 낮은

충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 및 컴퓨터정보통신연구소(Dept. of Electrical, Electronic and Computer Engineering, and Research Institute of Computer, Information & Communication, Chungbuk National University)

*한국표준과학연구원 정보전산그룹(Group of Information and Computer, Korea Research Institute of Standards and Science)

· 논문 번호 : 20030523-077

· 수정완료일자 : 2003년 7월 24일

전송률의 많은 병렬 데이터 열로 나누고, 이들을 다수의 부반송파를 사용하여 동시에 전송한다. 전송률이 낮아진 심벌의 주기가 증가되므로 다중경로에 대하여 강건하게 된다. 그리고 FFT 기반의 MC 기술을 사용하여 기저대역에서 변복조를 처리할 수 있으므로 송수신기의 효과적인 디지털 구성이 가능하다. 또한 모든 OFDM 심벌사이에 채널의 지연확산보다 긴 보호구간을 삽입하여 부반송파간 간섭을 피할 수 있는 장점이 있다^{[1]-[3]}. 그러나 이러한 OFDM 시스템은 간섭에 강한 환경에서 그 성능저하가 크게 나타난다.

이런 강한 간섭에 의한 성능저하를 줄이는 방법으로는 IS-OFDM이 연구되었다^[4]. IS-OFDM은 입력된 각 병렬 브랜치의 심벌들에 직교 시퀀스로 곱한 뒤 모든 부반송파에 분배하고, 각 부반송파는 주어진 프레임에서 각 병렬 브랜치의 심벌 조각들의 합으로 이뤄진 정보를 전달하는 방식이다. 부반송파 내에 다른 들은 직교 코드에 의해 구별된다. IS-OFDM의 이런 구조는 주파수 다이버시티 특성을 갖으며 간섭에 강하다.

본 논문에서는 협대역 간섭 및 하모닉 잡음에 대한 IS-OFDM의 시스템 성능을 일반 OFDM과 비교 분석하였으며, 또한 IS-OFDM 시스템 내부 encoder의 coding gain에 의한 성능향상을 분석하였다.

II. 시스템 구성과 특성

2-1 송신기 구성

그림 1은 IS-OFDM 시스템의 구성도를 나타낸다. 입력단에서 R bits/sec의 속도로 입력 데이터가 S/P converter로 들어가게 되고 그것은 R/N' bits/sec의 속도로 N' 의 병렬 데이터를 공급하게 된다. S/P converter의 출력 데이터 신호 x_q 는 orthogonal binary Hadamard sequence $W_q=[w_{q,0}, w_{q,1}, \dots, w_{q,N-1}]$ 에 의해 확산된다($q=0, \dots, N-1$). 확산 후에 signal rate는 다시 R bits/sec로 된다. x_q 가 QAM constellation에서의 복소수로 가정한다면 확산신호는 다음과 같다.

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

위의 과정을 orthogonal code division multiplexing(OCDM)이라 하며 서로 직교 코드에 의해 분리

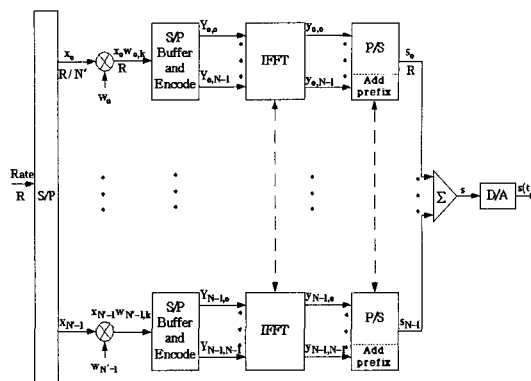


그림 1. IS-OFDM 시스템 송신기 구성도
Fig. 1. Block diagram of IS-OFDM transmitter.

된 N' 의 병렬 데이터의 set으로 공급한다. 다음 단계로 각각의 병렬 직교 stream은 일반 OFDM과 같이 처리된다. 즉, 확산된 신호가 두 번째 S/P bit-buffer와 encoder에 들어가고 N' 개의 병렬 sub-stream을 공급한다. encoder는 coding gain이 2일 때 다음과 같이 정의된 $N=2N'$ 의 복소 데이터를 만든다.

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

만약 coding gain이 4일 때는 coding gain이 2일 때의 coding된 데이터를 두 배로 보내주며 이는 아래와 같이 나타낼 수 있다. 이 때 $N=4N'$ 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.

$$y_{q,m} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} Y_{q,k} e^{j2\pi(km/N)} \quad \text{for } m=0,1,\dots,N-1 \quad (3)$$

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

$$s_q(m) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} Y_{q,k} e^{j2\pi(km/N)} \quad \text{for } m=0,1,\dots,N-1 \quad (4)$$

각각의 q 에 의해 병렬로 위치시키고 모든 N' 병렬 OFDM stream은 주파수와 시간영역에서 동기화된다. 즉 N' parallel OFDM은 정확히 똑같은 frequency bin과 그것들의 time-frame이 정확히 동기화된다. 병렬 신호 $s_q(m)$ 은 합쳐져서 D/A converter로 $s(t)$ 를 공급하기 위해 들어가게 된다.

출력신호는 위 설명에 근거하여 다음과 같은 matrix $D_{N'}$ 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 frequency bin 또는 f_i ($i=0, \dots, N'-1$)는 모든 데이터 비트($x_0, x_1, \dots, x_{N'-1}$)를 포함한다. 그리고 orthogonal Hadamard sequences $W_q = [w_{q,0}, w_{q,1}, \dots, w_{q,N'-1}]$ 에 의해서 각각 구별된다. 이것은 각각의 data bit의 전력이 확산되었다는 것을 의미한다. 특별히 적교 sequences가 Hadamard가 아니라 (0, 1)을 가지고 있는 다음과 같은 sequence라면

$$W_q = [w_{q,k}] \quad \text{where } w_{q,k} = \begin{cases} 1 & \text{for } q=k \\ 0 & \text{for } q \neq k \end{cases} \quad (5)$$

그 때 IS-OFDM은 보통의 OFDM과 같이 된다.

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

2-2 수신기 구성

기본적인 IS-OFDM의 수신기가 그림 2와 같다.

복조와 A/D 변환 후의 수신 신호 $r(m)$ 은 S/P converter로 들어간다. 그리고 N 개의 병렬 데이터

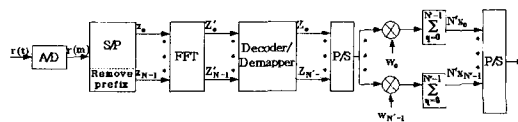


그림 2. IS-OFDM 시스템 수신기 블록도

Fig. 2. Block diagram of IS-OFDM receiver.

points z_m 을 공급한다($m=1, 2, \dots, N-1$). 병렬 데이터 z_m 은 그때 FFT에 들어가고 N 복소 data signal points는 다음과 같이 주어진다.

$$Z'_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=0}^{N-1} z_m e^{-j2\pi(km/N)} \quad (6)$$

위의 병렬 데이터는 decoder/demapper에 들어가고 $N'=N/2$ 데이터 point를 만들며 이는 다음과 같이 정의된다.

$$Z_k = \begin{cases} Z'_k & \text{for } k=1, 2, \dots, N'-1 \\ Z'_0 + jZ_{N'} & \text{for } k=0 \end{cases} \quad (7)$$

이것은 일반 OFDM 시스템과 같이 처리된다. P/S converter에 들어가는 N' 병렬 Z_k point는 N' Hadamard sequence $W_q = [w_{q,0}, w_{q,1}, \dots, w_{q,N'-1}]$ 에 의해 그림 2에서처럼 데이터를 복원하기 위해 역 확산된다($q=1, 2, \dots, N'-1$).

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

$$b_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=0}^{N-1} s_m e^{-j2\pi(km/N)} \quad \text{for } m=0, 1, \dots, N-1 \quad (8)$$

s_m 은 S/P converter의 출력이고 cyclic prefix가 제거된 후의 signal point이다. 그리고 그 때의 decoder/demapper의 출력에서 signal points는 다음과 같다.

$$a_k = \sum_{m=0}^{N'-1} x_q w_{q,k} \quad \text{for } m=0,1,\dots, N'-1 \quad (9)$$

P/S converter 후의 despreader-0의 출력에서 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{N'}} \sum_{k=0}^{N'-1} a_k w_{0,k} &= \frac{1}{\sqrt{N'}} \sum_{k=0}^{N'-1} \left[\sum_{q=0}^{N'-1} x_q w_{q,k} \right] w_{0,k} \\ &= \frac{1}{\sqrt{N'}} \sum_{q=0}^{N'-1} x_q \sum_{k=0}^{N'-1} w_{q,k} w_{0,k} = \begin{cases} \sqrt{N'} x_0 & \text{for } q=0 \\ 0 & \text{for } q \neq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

III. 성능분석과 논의

3-1 협대역 간섭 성능

협대역 간섭이 일정한 대역폭을 갖고 JSR이 $-10 \sim +10$ dB로 증가할 때, 그리고 일정한 JSR을 갖고 대역폭이 점차 넓어질 때의 두 가지 측면으로 BER 성능을 나타낸다. 편이를 위해 간섭 대역폭을 band 라 표현하며 이는 간섭 대역폭 내에 위치하여 그 영향을 받는 부반송파의 수를 나타낸다. 성능분석에 사용되는 IS-OFDM은 일반 OFDM과의 동등한 비교를 위해 encoding부분을 생략하며 부반송파의 수 $N' = 256$ 으로 한다. 변조방식은 QPSK이며 채널 환경은 협대역 간섭과 AWGN 채널이라 가정한다. 모든 성능 분석은 Monte Carlo simulation을 이용하였다.

3-1-1 JSR의 크기에 따른 성능

일정한 간섭 대역폭에서 JSR의 크기에 따라 나타나는 BER성능을 비교 분석한다. 간섭 대역폭, 즉 band = 4이며 이는 시스템 내에서 연속된 4개의 부반송파가 차지하는 대역폭과 같다. JSR은 P_i/P_s 로 정의하며 -10 dB \sim $+10$ dB에서 측정한다. 여기서 P_i 는 간섭 전력이며 P_s 는 신호 전력이다. 그림 3과 그림 4는 위의 주어진 조건 하에서 그려진 OFDM과 일반 IS-OFDM의 BER 성능을 나타낸다. 그림에서 보는 것과 같이 JSR이 5 dB 이하에서 IS-OFDM의 BER 곡선은 크게 변하지 않고 일반 OFDM의 BER 곡선은 매우 큰 폭으로 점차 높아지며 쉽게 error floor을 나타낸다. 그러나 JSR이 계속 증가하면 IS-OFDM의 BER 곡선은 크게 상승하고 일반 OFDM의 BER 곡선은 비교적 그 상승의 폭이 작아짐을 알 수 있다. 이러한 error floor는 JSR이 협대역 간섭 대 신호의 비이므로 그 크기가 시스템의 한계를 넘어서는 환경에서는 SNR이 증가하여도 BER이 더 이상 감소하지 않게 되는 것이다. 결국 위의 결과로부터 IS-OFDM이 일반 OFDM보다 협대역 간섭에 대한 시스템 강건성이 더 크다는 것을 알 수 있으며, 따라서 JSR이 일정크기 이하일 때 매우 좋은 성능을 갖는다.

3-1-2 간섭 대역폭에 따른 성능

일정한 JSR에서 간섭 대역폭을 변화하였을 때 나

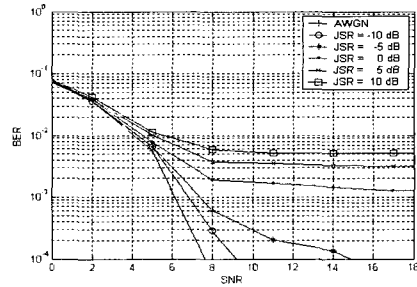


그림 3. 일반 OFDM의 JSR에 따른 BER
Fig. 3. BER of OFDM when JSR = $-10 \sim +10$.

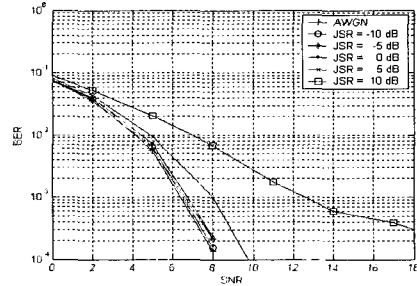


그림 4. IS-OFDM의 JSR에 따른 BER
Fig. 4. BER of IS-OFDM when JSR = $-10 \sim +10$.

타는 BER성능을 분석한다. JSR=0 dB로 하며 간섭 대역폭, 즉 band = 2, 4, ..., 64, 128에서 측정한다.

그림 5와 6은 각각 OFDM과 일반 IS-OFDM의 협대역 간섭 대역폭의 변화에 따른 BER 특성을 나타낸다. 그림에 나타나는 floor현상은 앞의 1-1절과 같은 이유로 협대역 간섭의 대역폭 즉, Band가 커지면서 협대역 간섭이 신호에 크게 작용하므로 나타난다. 두 시스템을 비교해 보면, 그림에서와 같이 band=128일 때는 그 성능 차이가 크지 않지만 band가 작아질 때, 특히 band < 32일 때 그 차이가 매우

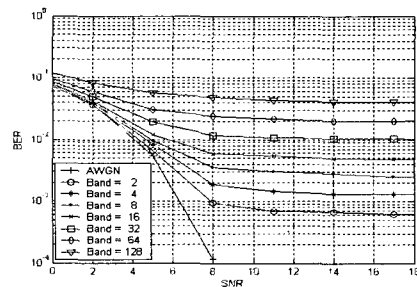


그림 5. Band에 따른 일반 OFDM의 BER
Fig. 5. BER of OFDM when Band = 2 \sim 128.

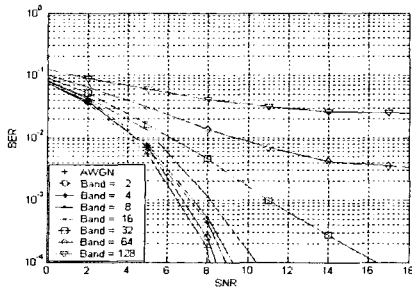


그림 6. Band에 따른 IS-OFDM의 BER
Fig. 6. BER of IS-OFDM when Band = 2~128.

크게 나타난다. 이는 앞의 1-1절에서와 유사한 특성으로 IS-OFDM이 일반 OFDM보다 일정 대역폭이하의 협대역 간섭에 우수한 성능을 갖는다.

3-2 하모닉 잡음에 대한 성능

하모닉 잡음은 impulse 형태로 나타나며 시스템 대역 전체에 걸쳐 일정한 주파수 간격으로 균일하게 분포한다. 하모닉 잡음의 조밀도는 시스템 대역내에 분포하는 하모닉 잡음들이 차지하는 대역폭과 시스템 대역폭의 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 두 시스템의 BER 성능을 비교 및 분석한다. 그림 7과 그림 8은 각각 OFDM과 일반 IS-OFDM의 h-rate에 따른 BER 성능을 나타낸다. 앞의 1절에서와 유사하게 낮은 h-rate에 >0.4일 때 IS-OFDM의 BER 곡선이 매우 높아져 결국 h-rate=0.8일 때 두 시스템의 성능은 같게 나타난다. 이러한 결과로부터 일정 h-rate 이하에서 IS-OFDM이 하모닉 잡음에 대해 일반 OFDM보다 좋은 성능을 갖는다는 것을 알 수 있다.

3-3 Coding Gain에 따른 성능 분석

IS-OFDM 시스템 내부 encoder가 갖는 coding gain에 따라 달라지는 IS-OFDM의 성능을 분석한다. 채널 환경은 JSR=10 dB, Band=4인 협대역 간섭과 AWGN 채널을 사용하였고 각 coding gain은 1, 2, 4 이렇게 세 가지에 대하여 나타낸다. 그림 9에서 coding gain이 증가하면 성능이 매우 좋아진다. 그러나 일정한 대역 제한을 두었을 때 coding gain이 커짐에 따라 상대적으로 bit rate는 감소하므로 너무 큰 coding

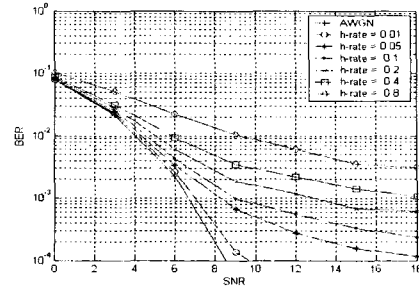


그림 7. 일반 OFDM의 h-rate(0.01~0.8)에 따른 BER
Fig. 7. BER of OFDM when h-rate = 0.01~0.8.

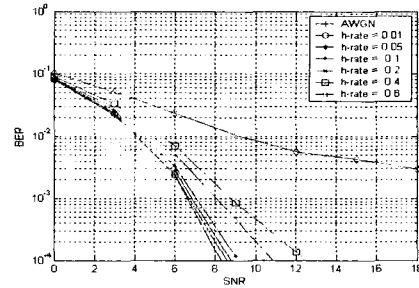


그림 8. IS-OFDM의 h-rate(0.01~0.8)에 따른 BER
Fig. 8. BER of IS-OFDM when h-rate = 0.01~0.8.

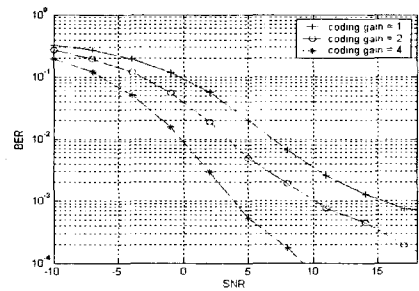


그림 9. Coding gain에 따른 IS-OFDM의 BER
Fig. 9. BER at coding gain = 1, 2 and 4.

gain은 시스템 효율을 저하시킨다. 따라서 데이터 전송속도 및 채널 환경을 고려하여 선택해야 한다.

IV. 결 론

협대역 간섭에 대한 성능분석 결과 일정한 대역폭의 협대역 간섭의 경우, 낮은 JSR에서는 IS-OFDM이 우수하며, JSR이 증가되면 그 성능차가 작아진다. 일정 JSR에서 협대역 간섭의 대역폭이 증가할 때도 역시 유사한 성능특성을 보인다. 하모닉 잡음에 대

한 성능분석 결과 또한 JSR이 0 dB인 하모닉 잡음의 조밀도 h-rate이 0.01~0.8로 증가할 때 유사한 성능 특성을 나타낸다. 그러므로 IS-OFDM의 성능이 간섭에 대해 매우 강하며, 내부의 coding gain을 증가시키면 더욱 향상된다. 그러나 대역 제한에서 coding gain이 커짐에 따라 상대적으로 bit rate는 감소하므로 너무 큰 coding gain은 시스템의 효율을 저하시킨다. 따라서 coding gain은 데이터 전송속도 및 채널 환경을 고려하여 선택해야 한다. 그러므로 IS-OFDM 시스템은 협대역 간섭이 크게 작용하는 전력선 통신이나 무선 통신 채널에 사용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] Ramjee Prasad, Shinsuke Hara, "An Overview of

Multi-Carrier CDMA", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 12, pp. 126-133, Dec. 1, 1997.
 [2] J. A. C. Bingham, "Multicarrier 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, Feb. 1995.
 [4] Diakoumis Gerakoulis, Paola Salmi, "An Interference Suppressing OFDM System for Ultra Wide Bandwidth Radio Channels", *IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies*, pp. 259-264, 2002.

김 상 우



2003년 2월: 한밭대학교 전자공학과 (공학사)
 2003년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] OFDM 통신시스템, UWB 통신 및 무선 LAN 등

이 상 태



1977년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
 1992년 8월: 전북대학교 전자 및 통신공학 (공학석사)
 1998년 2월: 전북대학교 전자 및 통신공학 (공학박사)
 1981년~1985년: 국제상사 컴퓨터

사업본부

1985년 12월~현재: 한국표준과학연구원 정보전산그룹 그룹장

[주 관심분야] Network Traffic 제어, 원격측정 등

박 종 현



2003년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
 2003년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] OFDM 통신시스템, DSP 통신신호처리, 확산 스펙트럼 시스템 등

정 순 기



1985년~현재: 충북대학교 컴퓨터공학과 교수
 [주 관심분야] 데이터베이스 시스템, 실시간 시스템, 소프트웨어공학

유 흥 균



1988년~현재: 충북대학교 전자공학과 정교수
 2002년 3월~현재: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
 [주 관심분야] 디지털 통신 공학, 이동/위성 통신 시스템, 통신 회로 설계 및 통신 신호 처리