

# 협대역 간섭 채널환경에서 IS-OFDM 성능 분석

강현정\* · 이정재

동의대학교

IS-OFDM performance analysis for narrow band interference channel

Hyun-jeong kang\* · Jeong-jae Lee

Dong-eui university

E-mail : kang6640@hotmail.com

## 요 약

본 논문에서는 광대역 무선통신에서 협대역 간섭을 제거할 수 있는 새로운 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식인 IS(Interference Suppressing)-OFDM을 소개한다. 이 IS-OFDM 방식은 직교 Hadamard 계열을 이용하여 분리할 수 있는 여러 단의 기존 OFDM의 병렬 연결로 구성되는 시스템으로 각 서브 캐리어는 전송된 모든 심볼을 포함하며 수신측에서는 동일 서브 캐리어에 존재하는 서로 다른 심볼들을 직교 Hadamard 계열을 이용하여 복조되도록 한다. IS-OFDM 시스템의 성능을 분석하고, 검토하기 위하여 Monte-Carlo 시뮬레이션을 이용하여 협대역 채널 환경에서 기존 OFDM 시스템과 비교하였으며 성능 개선 효과가 있음을 보였다.

## ABSTRACT

In this paper, a new OFDM scheme, IS-OFDM(Interference Suppressing Orthogonal Frequency Division Multiplexing), which has the capabilities of suppressing narrow-band interference for wide-band wireless communication systems, is introduced. This IS-OFDM system is composed of the parallel stages of ordinary OFDM, and each sub-carrier contains all of the transmitted symbols. Using Hadamard sequences, the transmitted information symbols in the same sub-carriers are separated from the other sub-carriers in the receiver. After analyzing and evaluating the performance of IS-OFDM system using Monte-Carlo simulation, the effective improvements of performance in IS-OFDM compare favorably with that of a conventional OFDM system in a narrow-band channel, is shown.

## 키워드

OFDM, IS-OFDM, Narrow-band Interference

## 1. 서 론

OFDM은 무선 광대역 통신을 위한 기술로써 균일한 간격의 주파수를 가지는 N개의 반송파를 이용하여 동시에 변조하는 기법이다. 이로 인해 높은 스펙트럼 효율과 높은 데이터 율을 지원하고, 주파수 선택적 채널에서 신뢰성 있는 데이터 전송을 할 수 있다[1]. 다중 사용자 통신에 이용된 비슷한 방법으로는 multi-user OFDM, multi-carrier CDMA 등이 있다[4-7].

최근 Gerakoulis와 Salmi는 기존 OFDM 시스템이 협대역 간섭으로 인한 성능 저하를 보완하기 위한 새로운 방식인 IS-OFDM을 제안하였다[2,3]. 이 IS-OFDM의 구성은 여러 단의 OFDM을 병렬로 구성되며 각각의 병렬 채널은 직교 Hadamard 계열에 의해 서로 분리되고 직교성을

가진다. 이러한 구조는 하나 또는 그 이상의 서브 캐리어가 주파수 선택적 페이딩이나 협대역 간섭에 영향을 받을 경우 효과적으로 억제할 수 있는 기능을 갖는다[2,3]. 본 논문에서는 IS-OFDM의 송수신기 구조의 특성과 협대역 간섭 채널에서 시스템의 성능 개선 효과를 검토하기 위하여 제 II장에서는 OFDM과 IS-OFDM의 시스템 구조에 대하여 설명하고, 제 III장에서는 협대역 간섭 채널 환경에서 수신신호를 분석하였다. 제 IV장에서는 가우시안 형태의 협대역 간섭 신호를 이용하여 시스템의 성능을 Monte Carlo 시뮬레이션으로 분석하고 기존의 OFDM 시스템과 성능 개선 효과를 비교하였다. 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. OFDM과 IS-OFDM의 시스템

그림 1과 그림 2는 각각 기존의 OFDM 송신기와 수신기 구조를 보여준다.

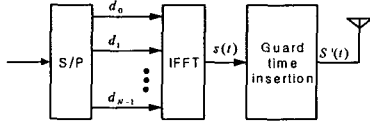


그림 1. OFDM 송신기

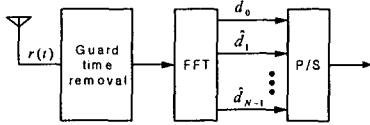


그림 2. OFDM 수신기

송신기에 입력된 고속 데이터는 먼저 N개의 병렬 데이터로 변환되고, 이 각 병렬 채널은 QPSK로 변조된다. N개의 변조된 병렬 데이터는  $(d_0, d_1, d_2, \dots, d_{N-1})$ 로 표현되고, 각  $d_n$ 은 복소수 값을 가진다.  $d_n = d_{I_n} + jd_{Q_n}$ ,  $d_{I_n} = d_{Q_n} = 1, -1$   $d_n$ 은 IFFT를 거치면서 각각에 서브 캐리어들이 곱해져서 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s'(t) = \sum_{k=0}^{N-1} d_k \exp(j2\pi f_k(t - kT_{total})) f'(t - kT_{total})$$

$$f(t) = \begin{cases} 1 & (0 \leq t \leq T_s) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s} \quad (k=0, 1, 2, \dots)$$

$s(t)$ 는 guard time이 삽입되어  $s'(t)$ 로 식 (2)와 같이 표현할 수 있고, 이는 ISI를 줄여준다.

$$f'(t) = \begin{cases} 1 & (-T_g \leq t \leq T_s) \\ 0 & (t < -T_g, t > T_s) \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $T_{total} = T_g + T_s$ 는 보호 간격(guard time)과 심볼 간격(symbol duration)이 더해진 값이다.

송신기로부터 전송된 신호  $s'(t)$ 는 radio 채널 상에서 페이딩과 잡음의 영향을 받아 식 (3)과 같이 나타낼 수 있고  $r(t)$ 는 수신기에 수신된 신호의 식을 의미한다.

$$r(t) = \int_0^\infty h(\tau) s(t - \tau) d\tau + n(t) \quad (3)$$

여기서  $h(\tau, t)$ 는 시간 t에서 radio 채널의 임펄스 응답이고  $n(t)$ 는 AWGN이다.

수신된 신호  $r(t)$ 는 bandpass filter를 통과하고, FFT를 거쳐 다음 식 (4)를 얻게 된다.

$$\hat{d}_i(k) = \frac{1}{T} \int_{kT_{total}}^{(k+1)T_{total}} r(t) \exp(-j2\pi f_i(t - kT_{total})) dt \quad (4)$$

기존의 OFDM 구조와는 달리 IS-OFDM의 송신기와 수신기 구조는 그림 3과 그림 4와 같이 구성된다.

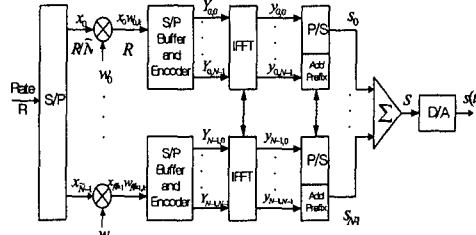


그림 3. IS-OFDM 송신기

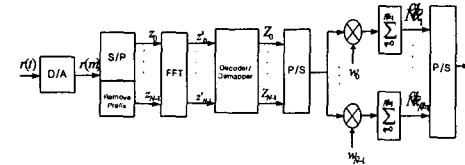


그림 4. IS-OFDM 수신기

그림 3의 송신기에서는 OFDM을 여러 단의 병렬 형태로 구성된다. R bit의 데이터 율로 전송된 신호는 직병렬기를 통해  $N^q$ 개의 병렬 데이터를 가지게 되며, 이때 데이터 율은  $R/N^q$ 이다. 각 병렬 채널의 데이터는 QPSK 변조되어  $N^q$ 의 길이를 가지는 직교 Hadamard 코드  $w_q = [w_{q,0}, w_{q,1}, \dots, w_{q,N^q-1}]$ 에 의해 확산된다. 그래서 데이터 율은 다시 R bit가 되고, 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} x_q &= \alpha_q + j\beta_q \\ X_{q,k} &= x_q w_{q,k} = \alpha_q w_{q,k} + j\beta_q w_{q,k} \quad (5) \\ & \quad (k=0, \dots, N^q-1) \end{aligned}$$

이  $X_{q,k}$ 는 두 번째 직병렬기를 지나면서  $N=2N^q$ 개의 복소 데이터를 가지게 된다. 그 각각의 값은 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$Y_{q,k} = \begin{cases} \alpha_q w_{q,0} & \text{for } k=0 \\ X_{q,k} & \text{for } k=1, 2, \dots, N^q-1 \\ \beta_q w_{q,0} & \text{for } k=N^q \\ X_{q,N-k}^* & \text{for } k=N^q+1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (6)$$

여기서  $(\cdot)^*$ 는 공액 복소수를 의미하며,  $Y_{q,0}$

와  $Y_{q,k}$ 는 실수이다. 이 결과 값들이 IFFT를 거친 출력은 식 (7)과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$y_{qm} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y_{q,k} e^{j2\pi(km/N)} \quad (7)$$

$m=0,1,\dots,N-1$

이 N개의 병렬데이터  $y_{qm}$ 이 직렬로 변환되면서 guard time이 더해지게 된다. 이때 P/S신호의 출력은 식 (8)과 같다.

$$S_q(m) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} Y_{q,k} e^{j2\pi(km/N)} \quad (8)$$

$m = -N_g, \dots, N-1$

이때 샘플 수는  $N_s = N + N_g$  이고,  $N_g$ 는 더해진 guard time의 샘플 수이다.

신호  $s_q(m)$ 의 총합은 식 (9)와 같다.

$$s(m) = \sum_{q=0}^{N_g-1} s_q(m) \quad (9)$$

위의 설명으로부터 알 수 있듯이 병렬 데이터를 직교 Hadamard 코드로 확산하여 IFFT를 하였기 때문에 각 서브캐리어들은 모든 입력 데이터를 포함하고 있다.

그림 4의 IS-OFDM 수신기에서 수신된 신호  $r(m)$ 은 직병렬기에 의해 N개의 병렬 데이터  $z_m$  ( $m=0,1,\dots,N-1$ )이 생성되며, FFT를 거치면서 N개의 복소 데이터 신호를 갖게 된다.

$$z'_k = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} z_m e^{-j2\pi(km/N)} \quad (10)$$

for  $k = 0, 1, \dots, N-1$

그리고 위의 데이터는 decoder/demapper를 통해 다시  $N_g$ 개의 식 (11)과 같이 정의되는 데이터를 얻는다.

$$Z_k = \begin{cases} Z'_k & \text{for } k=1,2,\dots,N_g-1 \\ Z'_0 + jZ'_{N_g} & \text{for } k=0 \end{cases} \quad (11)$$

이 출력은 P/S 컨버터를 거친 뒤 송신 측에서 곱해주었던 직교 Hadamard 코드  $w_q = [w_{q,0}, w_{q,1}, \dots, w_{q,N_g-1}]$  ( $q=0,1,\dots,N_g-1$ )에 의해 역 확산되며,  $N_g$ 개의 각 채널을 분리시킬 수 있다.

### III. 협대역 간섭 채널에서 수신신호 분석

본 논문에서는 협대역 간섭 채널과 균일 페이딩(flat fading)을 고려한다. 이때 수신된 신호는 식 (12)와 같다.

$$r(t) = \sum_i h_i(t) s(t-t_i) + I(t) + n(t) \quad (12)$$

여기서  $I(t)$ 는 협대역 간섭 신호이고,  $n(t)$ 는 잡음(AWGN)이다. 시간  $t_n = nT_N$ 에서 샘플링 한 신호는 식 (13)과 같다.

$$r(n) = \sum_i \sum_{m=-N_g}^{N-1} h_i(n) s(n-m) + I(n) + n(n) \quad (13)$$

보조 간격(guard interval)을 제거한 후에, N개의 샘플링 신호들은  $l$ 번째 프레임에서 식 (14)와 같이 벡터로 표현 할 수 있다.

$$r_l = [r_{l,n}] = [r_{l,0}, r_{l,1}, \dots, r_{l,N-1}] \quad (14)$$

$$r_l = r((n + N_g + lN_s)T)$$

채널은 프레임 주기 동안 변하지 않는다고 가정한다.  $l$ 번째 프레임과  $k$ 번째 부 캐리어에서 FFT의 출력은 식 (15)와 같다.

$$Z'_{l,k} = b_{l,k} \cdot H_{l,k} + I_{l,k} + \eta_{l,k} \quad (15)$$

$$Z'_{l,k} = \sum_{n=0}^{N-1} r_{l,n} e^{-j2\pi nk(n/N)}$$

여기서  $b_{l,k} = \sum_{q=0}^{N_g-1} Y_{q,k}$  이고,  $H_{l,k}$ 는  $k$ 번째 부 캐리어 ( $f_k = k/T$ )에서  $l$ 번째 프레임 동안의 채널 전달함수이다.

$$H_{l,k} = \sum_i h_i(t) e^{-j2\pi k(t_i/T)} \quad (16)$$

또한  $I_{l,k}$ 와  $\eta_{l,k}$ 는 각각  $I(n)$ 과  $n(n)$ 의 FFT 결과이다.  $Z'_{l,k}$ 가 decoder/demapper에 의해 처리된 출력은 식 (17)과 같다.

$$Z_{l,k} = a_{l,k} \cdot H_{l,k} + I_{l,k} + \eta_{l,k}$$

$$a_{l,k} = \sum_{q=0}^{N_g-1} x_q^{(l)} w_{q,k} \quad \text{for } k=0,1,\dots,N_g-1 \quad (17)$$

이것은 P/S로 입력되어 역 확산 된다. 채널이 변하지 않는다고 가정했기 때문에, 여기서는 한 프레임에 대해서만 고려한다. 이때, 역 확산된 결과는 식 (18)과 같다.

$$Z_l = \sum_{k=0}^{N_g-1} Z_k w_{l,k}$$

$$= \sum_{k=0}^{N_g-1} a_k H_k w_{l,k} + \sum_{k=0}^{N_g-1} I_k w_{l,k} + \sum_{k=0}^{N_g-1} \eta_k w_{l,k} \quad (18)$$

여기서 균일 페이딩이라 가정했기 때문에 모든 서브 캐리어  $k$ 에 대해  $H_k = H$ 를 만족한다. ( $k=0,1,\dots,N_g$ )

식 (18)의 첫 번째 항은 정보신호를 포함하고 있으며,  $x_l$ 을 검출하기 위한 식은 식 (19)와 같다.

$$\sum_{k=0}^{N_g-1} a_k H_k w_{l,k} = H \sum_{k=0}^{N_g-1} [\sum_{q=0}^{N_g-1} x_q w_{q,k}] w_{l,k}$$

$$= H \sum_{q=0}^{N_g-1} x_q [\sum_{k=0}^{N_g-1} w_{q,k} w_{l,k}]$$

$$= \begin{cases} H(N_g x_l) & \text{for } q=l \\ 0 & \text{for } q \neq l \end{cases} \quad (19)$$

위의 식으로부터  $x_q$ 는 모든  $k$  ( $k=0,1,\dots,N_g-1$ )에 대해 같은 값을 가지므로 식(20)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_1 = H(N\sigma_{x_1}) + \sum_{k=0}^{N-1} I_k w_{i,k} + \sum_{k=0}^{N-1} \eta_k w_{i,k} \quad (20)$$

각 역 확산 출력 채널에서의 총 전력은  $P_z = P_u + P_I + P_n$ .  $P_u$  는 정보신호 성분 전력이고,  $P_u = (H\sigma_{x_1})^2$ ,  $P_I$  는 간섭신호 전력이며  $I_k$  가 서브 캐리어 k에 독립적이라면,  $P_I = \sum_{k=1}^L E[I_k^2]$ . 또한  $P_n$  는 잡음 전력으로 다음과 같다.  $P_n = N\sigma_n^2$ , 여기서,  $\sigma_n^2 = E(\eta_k^2)$ . 신호 대 간섭과 잡음 비(SINR : Signal-to-Interference and Noise Ratio)는 식 (21) 과 같다.

$$SINR = \frac{\bar{P}_u}{P_I + P_n} = \frac{N\sigma_{x_1}^2}{\sum_{k=1}^L E[I_k^2] + N\sigma_n^2} \quad (21)$$

이때  $\bar{P}_u$  는 정규화된 신호 전력이다.

식 (21)에서 알 수 있듯이  $x_1$  은 모든  $N$  주파수에서 수신된다. 이것이 협대역 간섭에 의한 영향을 받았을 때 신호의 복원이 어려운 OFDM과 비교되는 IS-OFDM의 장점이다. 반면 이로 인해 SINR이 모든 주파수 대역에 걸쳐 평균적인 값은 취한다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

본 시뮬레이션은 신호 대 간섭 비(E/I)를 -10dB에서 10dB까지 변화시키면서 관찰하였고, 협대역 간섭 채널 환경을 위하여 가우시안 펄스를 이용하였다. 발생시킨 가우시안 펄스의 분산은 0.5, 평균은 0이며, 각 채널 마다 쉬프트 되어 입력된다. 그림 5와 그림 6은 기존 OFDM과 IS-OFDM의 협대역 간섭 채널 환경에서의 시뮬레이션 결과를 보여준다.

아래 그림5와 그림6에서 알 수 있듯이 기존 OFDM은 신호 대 간섭 비(E/I)가 줄어들어 따라 BER이 급격히 나빠지는 반면 IS-OFDM은 기존 OFDM에 비해 BER 성능이 개선되었음을 확인할 수 있다.

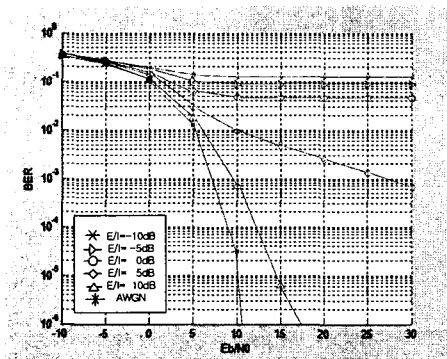


그림 5. OFDM 시뮬레이션 결과

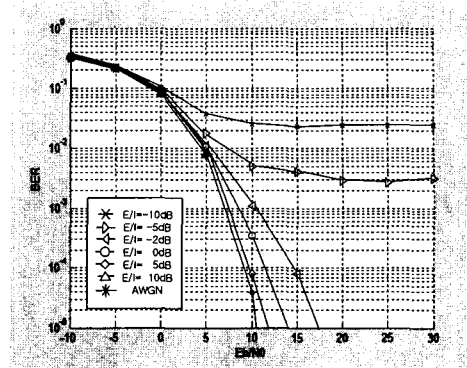


그림 6. IS-OFDM의 시뮬레이션 결과

#### V. 결론

본 논문에서는 기존 OFDM을 병렬 연결하여 구성되는 새로운 간섭제어 OFDM 시스템인 IS-OFDM을 소개하였다. 시뮬레이션을 통하여 IS-OFDM은 기존의 OFDM에 비하여 협대역 간섭 신호 채널에서 성능 개선 효과가 우수함을 보였다. 향후 IS-OFDM에 대한 기초 연구를 바탕으로 구조적인 복잡성을 간단히 할 수 있는 방법과 보다 세부적인 응용을 위한 성능 분석이 계속 진행되어야 한다.

#### 참고문헌

- [1] Heroshi Harada, Ramjee Prasad, "Simulation and Software radio for mobile communications", Artech House Publishers, pp.165-201, 2002.
- [2] Gerakoulis, D. and Salmi, P. , "An Interference Suppressing OFDM System for Ultra Wide bandwidth radio channels", Digest of Papers. IEEE Conference on, pp. 259-264, 2002.
- [3] Gerakoulis, D., Salmi, P. , "An Interference Suppressing OFDM System for Wireless Communications", ICC. IEEE International Conference on , Volume: 1, pp. 480-484, 2002.
- [4] C. Y. Wong , R. S. Cheng, K.B. Letaief and R.D. Murch, "Multiuser OFDM with Adaptive Subcarrier, Bit and Power Allocation" IEEE Journal Selected Areas In Commun., Vol. 17, No 10, pp. 1747-1757, Oct 1999.
- [5] N.Yee, J.P. Linnartz and G. Fettweis, "Multi-Carrier CDMA in Indoor Wireless Radio Networks," IEICE Trans. Commun. vol. E77-B, pp. 255-264, May/June 1994.
- [6] Li Ping, "A Combined OFDM-CsDMA

- Approach to Cellular Mobile Communications" IEEE Trans. on Commun., Vol. 47, No 7, pp. 979-982, July 1999.
- [7] L. Vandendorpe, "Multitone Spread-Spectrum Multiple Access Communications System in a Multipath Rician Fading Channel," IEEE Trans. on Vehic. Tech., Vol. 44, No 2, pp. 327-337, May 1995.