

OFDM 시스템에서 주파수 오프셋 보정에 의한 CIR 성능 향상

준회원 고 성 희*, 정회원 최 정 훈*, 준회원 이 동 호*, 종신회원 김 남**

CIR Performance Enhancement by Frequency Offset Estimation in OFDM System

Seonghui Ko* *Associate Member*, Junghun Choi* *Regular Member*,
Dongho Lee *Associate Member*, Nam Kim** *Lifelong member*

요 약

OFDM 시스템은 전송단과 수신단의 오실레이터의 불일치로 인해 발생하는 주파수 오프셋의 영향에 민감하다는 단점이 있다. 또한 주파수 오프셋은 ICI(Inter Carrier Interference) 문제를 발생시키고 부반송파 사이에 직교성을 왜곡한다. 본 논문에서는 ICI 영향을 분석하고, 기존의 SC 기법을 응용하여 새로운 알고리즘을 제안한다. 제안된 기법의 BER(Bit Error Rate)과 신호 품질을 결정짓는 CIR(Carrier to Interference Ratio)을 분석하기 위하여 MATLAB 프로그램을 사용한다. 모의실험 결과, 주파수 오프셋이 0.3과 0.5 일 때 10^{-3} 의 BER에서 BPSK 변조는 0.5dB, 1dB 이상, QPSK 변조는 1.6dB, 1.5dB 이상의 SNR 성능 향상을 보이며, CIR 성능도 최대 15dB 이상 향상 되었다. 결과적으로 제안한 기법이 기존의 기법보다 시스템 성능 향상에 효과적이다.

Key Words : ICI, CIR, SC cancellation, frequency offset

ABSTRACT

OFDM system has a disadvantage of sensitiveness about the effect of frequency offset caused by the discord of oscillators in the transmitter and receiver. Either, the frequency offsets in mobile radio channels distort the orthogonality between sub-carriers resulting in the inter-carrier interference(ICI). In this paper, we analyze the effect of the ICI and propose a new method using SC technique. To analyze BER(Bit Error Rate) and CIR(Carrier to Interference Ratio) performance of the proposed method. the simulation program MATLAB is used. By the simulation results, SNR performance is improved by this method. In case the frequency offset is 0.3 and 0.5, SNR gains are over 0.5dB and 1dB in the BPSK modulation and 1dB and 2dB in the QPSK modulation at BER of 10^{-3} respectively. In addition, CIR performance is improved over 15dB. As a result, the proposed method is more effective to improve the system performance than the conventional method.

I. 서 론

OFDM은 현재의 고속 데이터 전송에 가장 적합한 무선 통신 변조 기술 방식이다. OFDM은 광대

역의 무선 채널을 여러 개의 협대역 채널로 분할하여 보내기 때문에 주파수 선택적 채널 왜곡에 쉽게 대처할 수 있고, 다수의 반송파 변조를 위한 방식으로 서로 직교하는 다수의 부반송파를 사용하므로

* 충북대학교 정보통신공학과 ({seonghui, jhchil, dhlee}@osp.chungbuk.ac.kr)

** 충북대학교 전자정보대학 (namkim@chungbuk.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-11-521, 접수일자 : 2008년 11월 21일, 최종논문접수일자 : 2009년 3월 12일

부반송파 간의 중첩이 가능하여 스펙트럼 효율성 측면에서 장점을 가지고 있다^[1,3]. 또한 OFDM 심벌에 최대지연 확산 이상의 길이를 가진 Cyclic Prefix를 추가적으로 더해 준 OFDM 심벌을 형성하여 다중경로 페이딩 채널에서 심벌 간의 간섭(inter symbol interference : ISI) 없이 수신기에서 정확한 복조가 이루어지는 장점이 있기 때문에 다양한 무선 통신 시스템 표준화 규격에 핵심 변조 방식으로 사용되고 있다. 그러나 직교 분할 다중 방식의 가장 큰 단점은 주파수 오프셋에 민감하다는 것이다. 반송파 주파수 차이로 인해 주파수 오프셋이 발생하게 되면 수신 신호의 주파수 스펙트럼에 주파수 천이가 발생하여 부반송파간의 직교성이 상실되어 시스템 전체의 성능에 큰 영향을 미친다^[4]. 또한 주파수 오프셋은 송신기와 수신기의 발진 주파수 차이에 의해 주로 발생되며, 또한 채널의 시변성에 의한 도플러(Doppler) 편이에 의해서도 많이 발생된다. 주파수 오프셋의 영향은 신호의 크기 감소와 위상을 회전시켜 인접 부반송파 간의 간섭(inter carrier interference : ICI)을 야기 시킨다^[5-8]. 그러므로 고속 전송의 OFDM 통신 방식에서 시스템 성능에 대한 신뢰성을 확보하기 위해서는 주파수 오프셋에 대한 동기가 반드시 필요하고 매우 중요한 요소 기술 중의 하나이다. 이를 해결하기 위하여 많은 연구가 진행되었고 다양한 알고리즘을 제시하였다. 현재 제안된 대표적인 알고리즘으로 frequency-domain equalization^{[9][10]}, time-domain windowing^[11], ICI self cancellation(SC)^{[12][13]} 등이 있다.

본 논문에서는 총 5장으로 구성되어 있다. 2장에서는 OFDM 시스템 모델과 반송파 간섭(ICI)에 대해 설명하고, self-cancellation 기법을 소개한다. 3장에서는 SC기법을 토대로 새로운 기법을 제안하며, 4장에서는 제안된 알고리즘과 기존의 기법에 대한 모의실험을 통해 성능을 비교하였고, 끝으로 5장에서는 본 논문의 결론을 제시하였다.

II. OFDM 시스템 모델 및 ICI 분석

OFDM 시스템에서 송신되는 심벌은 역 고속 푸리에 변환(Invers Fast Fourier Transform: IFFT)에 의해 생성되며, OFDM 신호는 다음과 같다.

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi kn/N} \quad (1)$$

여기서, X_k 는 k -번째 부반송파를 통해 전송되는 위상 편이 방식(PSK) 또는 직교 진폭 변조된(QAM) 데이터이며, N 는 IFFT의 크기이며, $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 이다.

수신된 OFDM 심벌은 식 (2)와 같이 주어진다.

$$y(n) = x(n) e^{j2\pi n\epsilon/N} + w(n) \quad (2)$$

여기서, $\epsilon = fNT_s$ 이며 정규 주파수 오프셋(normalized frequency offset)을 나타낸다. f 는 송신기와 수신기 사이의 주파수 차이를 의미하고, T_s 는 부반송파의 심벌주기이며 $w(n)$ 는 백색 가우시안 잡음(additive white gaussian noise : AWGN)이다.

수신된 k -번째 OFDM 신호 심벌에 대한 주파수 오프셋의 영향으로 인한 반송파간 간섭(ICI) 성분은 $Y(k)$ 를 고려하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} Y(k) &= \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-j2\pi kn/N}, \quad k=0, 1, \dots, N-1 \\ &= \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} X(k) \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi n(l+\epsilon-k)}{N}} + n_k \\ &= X(k)S(0) + \sum_{l=0, l \neq k}^{N-1} X(l)S(l-k) + n_k \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, N 은 부반송파의 총 수이며, $X(k)$ 는 k 번째 부반송파로 전송된 심벌이며, n_k 는 백색 가우시안 잡음을 나타낸다. 식 (3)의 두 번째 항은 주파수 오프셋 영향으로 발생된 간섭신호(ICI)로서, 수신된 k 번째 부반송파 보다 인접한 다른 부반송파로 인한 반송파간 간섭 복소 계수 성분(complex coefficients)으로 다음과 같다.

$$S(l-k) = \frac{\sin(\pi(l+\epsilon-k))}{N \sin\left(\frac{\pi(l+\epsilon-k)}{N}\right)} e^{j\pi\left(1-\frac{1}{N}\right)(l+\epsilon-k)} \quad (4)$$

수신된 신호에서 원하는 신호와 가장 인접한 부반송파가 가장 크게 간섭 신호를 야기 시키므로 간섭 신호 성분과 원하는 신호의 전력비를 의미하는 CIR(carrier to interference)가 신호 품질을 결정하는 중요한 변수가 된다.

$$CIR = \frac{|S(k)|^2}{\sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{N-1} |S(l-k)|^2} = \frac{|S(0)|^2}{\sum_{l=1}^{N-1} |S(l)|^2} \quad (5)$$

전송된 시 데이터의 평균이 0이고, 각기 다른 부반송파 상에 전송되는 심벌을 통계적 독립이라고 가정한다.

2.1 ICI Self-Cancellation 기법

주파수 오프셋이 감소하지 않는다면 인접한 부반송파 간의 간섭 문제를 해결하는 것은 불가능 하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 2001년에 ICI SC 기법^[12]이 소개되었다.

[12]는 여러 개의 부채널 데이터들을 이용하여 SC 기능을 얻는 방법을 제시하고 있다.

간섭 신호 성분의 복소 계수의 실수와 허수 부분은 부반송파 인덱스 값에 따라 변하며, 대다수의 $(l-k)$ 값에서 $S(l-k)$ 와 $S(l+1-k)$ 의 차이는 매우 작게 나타나므로, 만약 데이터 쌍 $(a,-a)$ 가 두 개의 인접 부반송파 $(l,l+1)$ 상으로 변조 된다면 부반송파 l 상에 생성된 간섭 신호는 부반송파 $l+1$ 상에서 생성된 ICI에 의해 상당부분 제거되는 것을 알 수 있다.

$X(1)=-X(0), X(3)=-X(2), \dots, X(N-1)=-X(N-2)$ 와 같이 제한된 전송 신호를 가정할 때 부반송파 k 와 $k+1$ 상에 수신된 신호와 복소 계수는 다음과 같다.

$$Y'(k) = \sum_{l=0 \& \text{even}}^{N-2} X(l)[S(l-k)-S(l+1-k)] + n_k \quad (6)$$

$$Y'(k+1) = \sum_{l=0 \& \text{even}}^{N-2} X(l)[S(l-1-k)-S(l-k)] + n_{k+1} \quad (7)$$

$$S'(l-k) = S(l-k) - S(l+1-k) \quad (8)$$

ICI cancelling 변조에 의해 각각의 부반송파 쌍은 오직 하나의 데이터 심벌만을 전송하며 신호의 중복(redundancy)은 수신기에서 시스템 성능을 향상시킬 수 있다. 또한 ICI를 더욱 감소시키기 위하여 ICI cancelling 복조 기법을 이용한다.

$k+1$ 번째 부반송파에서 신호는(k 는 짝수) -1 를 곱하고 이후 k 번째 부반송파와 결합하며, 이후에 도출된 데이터 열은 심벌 결정에 사용된다. 도출된 데이터 열과 간섭 신호의 복소 계수는 다음과 같다.

$$Y''(k) = Y'(k) - Y'(k+1) = \sum_{l=0 \& \text{even}}^{N-2} \left\{ X(l)[-S(l-1-k)] + n_k - n_{k+1} + 2S(l+1-k) \right\} \quad (9)$$

$$S''(l-k) = 2S(l-k) - S(l+1-k) - S(l-1-k) \quad (10)$$

이 때 신호 품질 결정의 중요한 변수가 되는 CIR은 다음과 같다.

$$CIR = \frac{|-S(-1) + 2S(0) - S(1)|^2}{\sum_{\substack{l=0 \\ l=\text{even}}}^{N-1} |-S(l-1) + 2S(l) - S(l+1)|^2} \quad (11)$$

III. CIR 성능 향상을 위한 알고리즘

2.2절의 SC기법은 ICI 계수의 실수와 허수 부분이 부반송파 인덱스에 따라 점점 바뀌고, $l-k$ 에서 $S(l-k)$ 와 $S(l+1-k)$ 의 차이가 매우 작게 나타나기 때문에 데이터 쌍을 두 개의 인접 부반송파 상으로 변조하였다.

본 논문에서는 전송 데이터 쌍 (a,a) 와 $(-a,-a)$ 을 네 개의 인접 부반송파 $(l,l+1,l+2,l+3)$ 상으로 변조하여 전송하는 방식이다. 수신 심벌상의 주파수 오프셋의 영향은 k 번째 부반송파 상의 수신 심벌을 고려함으로써 알 수 있다. 부반송파 k 와 $k+1$ 상에 수신된 신호는 다음과 같다.

$$Y^*(k) = \sum_{l=0 \& \text{even}}^{N-2} \left\{ X(l)[S(l-k) - S(l+1-k) - S(l+2-k) - S(l+3-k)] \right\} + n_k \quad (12)$$

$$Y^*(k+1) = \sum_{l=0 \& \text{even}}^{N-2} \left\{ X(l)[S(l-1-k) - S(l-k) - S(l+1-k) - S(l+2-k)] \right\} + n_{k+1} \quad (13)$$

간섭 신호 성분은 수신된 k 번째 부반송파 보다 인접한 다른 부반송파로 인한 반송파간 간섭 신호를 의미하며, 다음과 같이 나타낸다.

$$S^*(l-k) = S(l-k) - S(l+1-k) - S(l+2-k) - S(l+3-k) \quad (14)$$

ICI를 더욱 감소시키기 위하여 ICI cancelling 복조 기법을 이용한다. 도출된 데이터 열은 심벌 결정에 사용되며 도출된 데이터 열과 복소 계수는 다음과 같다.

$$Y^{**}(k) = Y^*(k) - Y^*(k+1) = \sum_{l=0 \& \text{even}}^{N-2} \left\{ X(l)[2S(l-k) - S(l-k-1) - S(l-k+3)] \right\} + n_k - n_{k+1} \quad (15)$$

$$S^{**}(l-k) = -S(l-1-k) + 2S(l-k) - S(l+3-k) \quad (16)$$

도출된 데이터 열과 ICI 상관계수를 통하여 제안된 기법의 CIR를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$CIR_{proposed} = \frac{|-S(-1) + 2S(0) - S(3)|^2}{\sum_{\substack{l=0 \\ l=even}}^{N-1} |-S(l-1) + 2S(l) - S(l+3)|^2} \quad (17)$$

IV. 시뮬레이션 및 결과

이 장에서는 주파수 오프셋으로 인한 반송파 간섭(ICI) 제거 기법인 기존 알고리즘과 제안 알고리즘의 성능 평가를 하였다. 성능 평가를 위하여 모든 수신기에서의 시간 동기는 완벽하다고 가정하였으며, IEEE 802.11a 규격을 기반으로 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 모의실험에서 고려된 환경을 표 1에 나타내었다.

제안된 기법과 SC 기법의 성능을 비교 분석하기 위하여 BER 성능과 신호 품질의 중요한 변수가 되는 CIR 성능을 확인 하였다.

그림 1과 2는 BPSK 변조에서 주파수 오프셋에 따른 BER 성능 곡선을 나타낸다. 그림 1은 주파수 오프셋이 $\epsilon=0.05, \epsilon=0.5$ 일 때, $BER=10^{-3}$ 을 기준으로 제안한 기법이 SC 기법보다 약 1dB 이상 우수한 성능을 보인다. 그림 2 역시 주파수 오프셋이

표 1. 시뮬레이션 파라미터.
Table 1. Simulation parameters

파라미터	value
변조 방식	BPSK/QPSK
부 반송파의 수	64
OFDM 심벌 수	10000
IFFT 크기	256
보호구간	심벌주기의 1/4
채널 환경	AWGN
적용 주파수 오프셋	0.05 0.15 0.3 0.5

$\epsilon=0.15, \epsilon=0.3$ 일 때 제안한 기법이 기존의 알고리즘보다 우수한 성능을 보인다.

그림 3과 4는 QPSK 변조에서 주파수 오프셋에 따른 BER 성능 곡선을 나타낸다. 그림 1은 주파수 오프셋이 $\epsilon=0.05$ 일 때, $BER=10^{-3}$ 을 기준으로 제안한 기법이 SC 기법보다 약 0.5 dB 이상 우수한 성능을 보여준다. 하지만 주파수 오프셋이 $\epsilon=0.5$ 일 경우 기존의 기법보다 개선된 성능을 보이지만 성능 평가 기준인 $BER=10^{-3}$ 에 미치지 못하는 결과를 보인다. 그림 4 역시 주파수 오프셋이 $\epsilon=0.15, \epsilon=0.3$ 일 때 제안한 기법이 기존의 알고리즘보다 우수한 성능을 보여준다.

컴퓨터 모의실험을 통해 성능을 비교 분석한 결

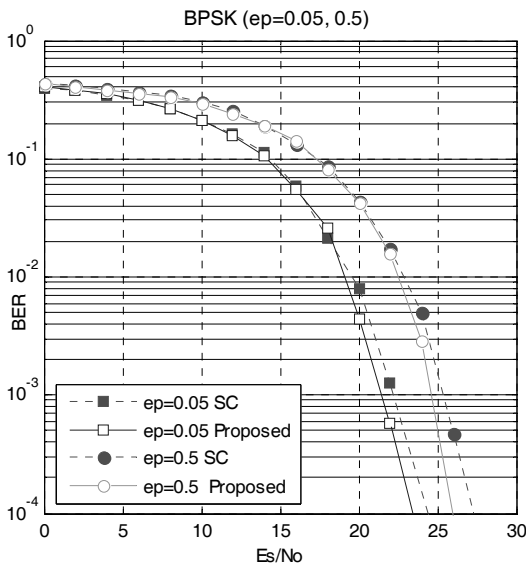


그림 1. BPSK 변조의 BER 성능($\epsilon=0.05, 0.5$)
Fig. 1. BER Performance of BPSK($\epsilon=0.05, 0.5$)

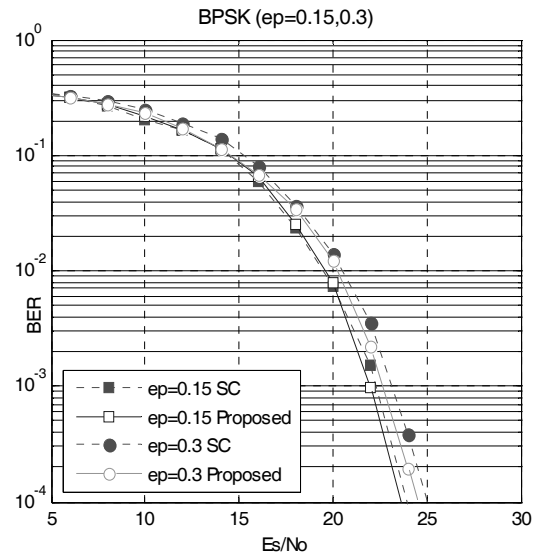


그림 2. BPSK 변조의 BER 성능($\epsilon=0.15, 0.3$)
Fig. 2. BER Performance of BPSK($\epsilon=0.15, 0.3$)

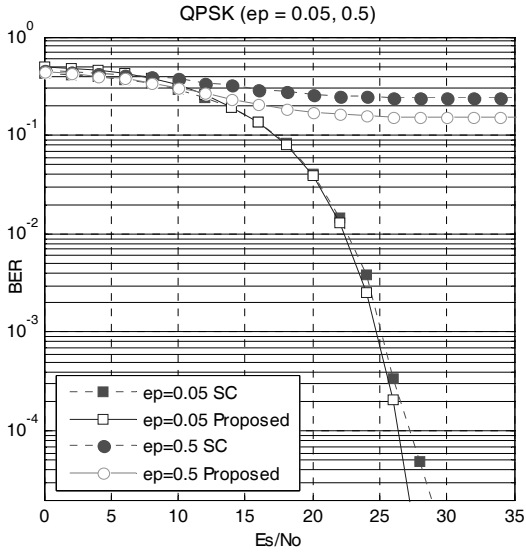


그림 3. QPSK 변조의 BER 성능($\epsilon = 0.05, 0.5$)
Fig. 3. BER Performance of QPSK($\epsilon = 0.05, 0.5$)

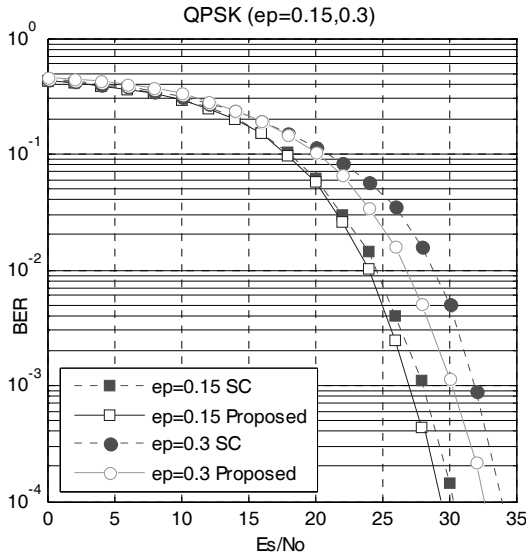


그림 4. QPSK 변조의 BER 성능($\epsilon = 0.15, 0.3$)
Fig. 4. BER Performance of QPSK($\epsilon = 0.15, 0.3$)

과 기존의 SC 알고리즘의 성능보다 제안한 기법의 성능이 우수한 것을 확인 하였다. 그러나 제안한 방식은 대역폭 효율이 기존의 ICI SC 방식보다 2배 정도 감소되는 단점이 있다. 따라서 대역폭 효율을 극대화 할 수 있는 연구가 필요하다.

그림 5는 신호 품질을 결정짓는 변수인 CIR 성능을 나타낸 것이다. CIR은 간섭 신호 성분과 원하

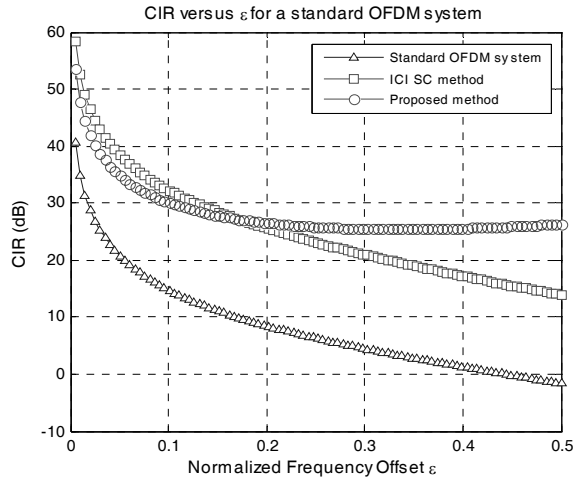


그림 5. CIR 성능
Fig. 5. CIR Performance

는 신호의 전력비를 의미하며, 신호 품질을 결정하는 매우 중요한 변수이다.

제안한 기법의 CIR 성능이 기존의 기법인 ICI SC 성능보다 뚜렷하게 향상된 것을 확인 할 수 있다. 특히 제안한 기법의 성능은 표준 OFDM 시스템보다 최대 28dB 이상 성능 향상은 물론 모든 주파수 오프셋에서 우수한 성능을 보인다. 또한 기존의 SC 기법과 비교했을 때 일정 주파수 오프셋, 주파수 오프셋이 0.17보다 큰 영역에서 최대 15dB 이상의 성능 향상을 보인다. 하지만 주파수 오프셋이 0.17보다 작은 영역에서는 최대 3dB의 열화가 발생한다.

V. 결 론

본 논문에서는 OFDM 시스템에서 ICI 영향을 분석하고 전송기와 수신기 사이에 주파수 오프셋이 존재할 경우 BER과 CIR 성능 측면에서 연구하였으며, 컴퓨터 모의실험을 통하여 성능 개선 효과를 확인하였다. 실험 결과 적용된 주파수 오프셋의 영역에서 제안 기법의 알고리즘의 성능이 기존의 SC 기법의 성능보다 개선된 것을 확인 할 수 있었다. 또한 신호 품질을 결정짓는 중요한 변수인 CIR 성능은 표준 OFDM 시스템보다 모든 주파수 오프셋 영역에서 최대 28dB 이상 성능이 향상 되었고, 기존의 기법보다 일정 영역에서 최대 15dB 이상의 성능 향상을 확인 할 수 있다. 그러나 본 논문에서 제안한 방식은 대역폭 효율 측면에서 표준 OFDM

시스템보다 1/4, 기존의 ICI SC 방식의 1/2로 떨어지는 단점이 있다. 따라서 대역폭 효율을 극대화 하고 ICI 제거를 최대화로 수행할 수 있는 알고리즘의 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] T. Pollet, M. van Baladel, and M. Moeneclaey, "BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and Wiener phase noise," *IEEE Trans. On Commun.*, 43(2/3/4), pp. 191-193, Feb./Mar./Apr. 1995

[2] T. M. Schmidl and D. C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," *IEEE Trans. On Commun.*, 45(12), pp. 1613-1621, Dec. 1997

[3] B. G. Evans and K. Baughan, "Vision of 4G," *Electronics & Communication Engineering Journal*, 12(6), pp. 293-303, Dec. 2000

[4] P. H. Moose, "A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction," *IEEE Trans. On Commun.*, 42(10), pp. 2908-2914, Oct. 1994

[5] J. Shentu, K. Panta, and J. Armstron, "Effects of phase noise on performance of OFDM systems using and ICI cancellation scheme," *IEEE Trans. On Broadcasting*, 49(2), Jun. 2003

[6] J. Armstrong, "Analysis of new and existing methods of reducing intercarrier interference due to carrier frequency offset in OFDM," *IEEE Trans. On Commun.*, 47(3), pp. 365-369, Mar. 1999

[7] 김영준, 우경수, 유현일, 이희수, 조용수, "반송파 주파수 오프셋을 갖는 상호협력 STBC-OFDM 시스템을 위한 반복적 ICI 제거기법," *한국통신학회논문지*, 32(10), pp. 950-957, Oct. 2007

[8] 허근재, 이영선, 유홍균, 정두영, "ICI를 data conversion 방식으로 상쇄하는 OFDM 통신시스템과 성능분석," *한국전자과학회*, 14(11), pp. 1191-1197, Nov. 2003

[9] N. Al-Dhahir and J. M. Cioffi, "Optimum finite-length equalization for multicarrier transceivers," *IEEE Trans. On Commun.*, 44(1), pp. 56-64, Jan. 1996

[10] W. G. Jeon, et al, "An equalization technique

for orthogonal frequency division multiplexing systems in time-variant multipath channels," *IEEE Trans. On Commun.*, 49(1), pp. 27-32, Jul. 2001

[11] C. Muschallik, "Improving an OFDM reception using an adaptive Nyquist windowing," *IEEE Trans. On Consumer Electronics*, 42(3), pp.259-269, Aug. 1996

[12] Y. Zhao and S. Haggman, "Inter-carrier interference self-cancellation scheme for OFDM mobile communication systems," *IEEE Trans. On Commun.*, 49(7), pp. 1185-1191, Jul. 2001

[13] A. Sayedi and G. Saulnier, "General ICI self-cancellation scheme for OFDM systems," *IEEE Trans. On Vehicular Technology*, 54(1), pp. 198-210, Jan. 2005

고 성 희 (Seong-hui Ko)

준회원



2006년 2월 충북대학교 전기전자 컴퓨터공학부졸업(공학사)
2009년 2월 충북대학교 정보통신공학과 졸업(공학석사)
<관심분야> 주파수 오프셋 정정, MIMO, OFDM, Wibro

최 정 훈 (Junghun Choi)

정회원



2000년 2월 대전대학교 정보시스템공학과 (공학사)
2004년 2월 충북대학교 정보통신공학과(공학석사)
2005년 3월~현재 충북대학교 정보통신공학과(박사과정)
<관심분야> UWB, OFDM, MIMO, Wibro

이 동 호 (Dongho Lee)

준회원



2008년 2월 충북대학교 전기전자 컴퓨터공학부 정보통신공학 졸업
2008년 3월 현재 충북대학교 전자정보대학 정보통신공학과 (석사과정)
<관심분야> OFDM, 통신이론

김 남 (Nam Kim)

중신회원



1981년 연세대학교 전자 공학과
(공학사)

1983년 연세대학교 전자 공학과
(공학석사)

1988년 연세대학교 전자 공학과
(공학박사)

1992년~1993년 미 Stanford 대

학 방문교수

2001년~2002년 미 California Technology Institute
방문교수

1989년~현재 충북대학교 전자정보대학 교수

<관심분야> 디지털이동통신, 이동통신, 무선시스템,
전자파해석, EMI/EMC, Diffractive Optics, WDM
Optical Filter & DEMUX Optical Memory,
Holography Application.