

직교 주파수분할다중화 시스템을 위한 채널간간섭 자기소거법

진혜길* · 강석근**

An Interchannel Interference Self-Cancellation Scheme for the Orthogonal Frequency Division Multiplexing System

Huijie Chen* · Seog-Geun Kang**

요약

주파수 오프셋으로 인하여 직교 주파수분할다중화의 수신 심볼에는 채널간간섭이 발생된다. 채널간간섭 자기소거법은 직교 주파수분할다중화 심볼의 부채널에 할당되는 신호를 조정함으로써 다른 부채널에 의한 간섭을 상쇄시키는 기술이다. 기존 인접심볼반복법은 원거리 부채널에 의한 간섭을 감소시키기는 하지만 가장 인접한 부채널에 의한 간섭은 완화시키지 못하거나 심지어는 증가시키는 경우도 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 새로운 인접심볼반복 기반 채널간간섭 자기소거법을 제안하고 성능을 분석한다. 여기서는 연속된 3개 부채널의 간섭계수를 이용하여 구한 t -파라미터를 적용한다. 그 결과, 제안된 방법은 원거리 부채널에 의한 영향을 감소시키는 능력은 기존 방법과 거의 동일한 반면 최인접 부채널에 의한 채널간간섭은 크게 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

Due to the frequency offset, interchannel interference (ICI) is occurred in the received symbols of the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems. The ICI self-cancellation (ICI-SC) technique appropriately adjusts the subchannel signal assignment of the OFDM symbols, thereby canceling the interference caused by other subchannels. The conventional adjacent symbol repetition (ASR) method can reduce the interference caused by remote subchannels. However, it may not mitigate or even increases the ICI produced by some nearest subchannels. To solve the problem, a new ASR based ICI-SC technique is proposed and its performance is analyzed in this paper. Here, a t -parameter obtained by the interference coefficients of 3 successive subchannels is applied. As a result, the proposed method has the same capability to reduce the influence of remote subchannels. However, it can reduce the ICI caused by the nearest subchannels significantly.

키워드

Frequency Offset, Interchannel Interference, Self-Cancellation, OFDM
주파수 오프셋, 채널간 간섭, 자기 소거법, 직교 주파수 분할 다중화

* 경상대학교 대학원 전기전자공학과(chenhuijie3289@gmail.com) • Received : May. 02, 2018, Revised : Jun. 23, 2018, Accepted : Aug. 15, 2018
** 교신저자 : 경상대학교 반도체공학과 • Corresponding Author : Seog-Geun Kang
• 접수일 : 2018. 05. 02 Dept. Semiconductor Engineering, Gyeongsang National University
• 수정완료일 : 2018. 06. 23 Email : sgkang@gnu.ac.kr
• 게재확정일 : 2018. 08. 15

1. 서 론

직교 주파수분할다중화(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)와 같은 다중 반송파 전송시스템은 활용 가능한 주파수대역을 다수의 부채널로 나누고, 각 부채널에 서로 직교인 신호를 중첩되게 할당함으로써 높은 대역폭 효율을 갖는다[1-2]. 하지만 직교 주파수분할다중화 시스템의 송신기와 수신기에서 사용되는 국부발진기의 주파수 차이로 인한 주파수 오프셋(frequency offset)은 부채널 신호 간의 직교성을 와해시켜 수신된 심볼에서는 채널간간섭(interchannel interference, ICI)이 발생된다. 주파수 오프셋으로 인한 채널간간섭을 완화시키기 위한 방법으로는 최우추정법(maximum likelihood estimation, MLE) 등^[3-5]과 같이 오프셋 양의 추정을 통한 보상 방법과 심볼에 할당되는 부채널 신호를 적절히 조정함으로써 간섭을 상쇄시키는 채널간간섭 자기소거법(ICI self-cancellation, ICI SC) 등이 있다[6]-[10].

신호처리 관점에서 직교 주파수분할다중화는 각 부채널의 반송주파수를 중심으로 표본화함수 창(window)에 신호사상기(signal mapper)의 출력신호가 곱해진 형태로 할당한다. 따라서 인접한 부채널은 원거리에 위치한 부채널에 비하여 더 큰 표본화함수 값을 가지므로 주파수 오프셋에 의한 간섭계수도 크게 나타난다. 이 점에 주목하여 Zhao 등은 인접 부채널의 부호를 반전시켜 할당하는 인접심볼반복(adjacent symbol repetition, ASR)을 통하여 복조된 심볼에서 발생하는 채널간간섭을 감소시키는 방법을 제안하였다[8]. 이와는 달리 이산 푸리에변환(discrete Fourier transform, DFT)의 대칭성을 이용하는 대칭심볼반복(symmetric symbol repetition, SSR) 기법도 제시된 바 있다^[7]. 한편, 다중레벨 위상편이키잉 신호사상기를 이용하는 경우 위상수가 증가될수록 성능저하가 커지는 점에 주목하여 Habib 등은 인접 부채널에 켈레복소수를 할당하는 인접켈레위상가산(adjacent conjugate phase addition, ACPA) 방법을 소개하였다[10].

이와 같은 채널간간섭 자기소거법은 전송채널의 특성에 구애받지 않으며 오프셋 추정을 위한 부가정보의 전송이 요구되지 않는 등의 장점이 있다. 하지만 기존의 방법들은 주파수 영역에서 원거리에 위치한

부채널에 의한 채널간간섭은 충분히 감소시킬 수 있지만 최근접 부채널에 의하여 발생하는 간섭은 크게 완화시키지 못하거나 오히려 증가되는 경우도 있다. 따라서 본 논문에서는 인접 부채널에 의한 채널간간섭을 집중적으로 감소시키기 위한 새로운 인접심볼반복 기반 자기소거법을 제시한다. 여기서는 연속되는 3개 부채널의 간섭계수(ICI coefficient)를 이용하여 가중치를 계산하고 인접 부채널의 신호할당에 적용한다. 모의실험 결과, 원거리 부채널에 의한 채널간간섭의 경우 제시된 방법은 Zhao 등이 제시한 방법과 동일한 자기소거 능력을 가지는 반면 최근접 부채널에 의한 간섭은 크게 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다[8].

II. 주파수 오프셋 모델과 채널간간섭

2.1 일반적인 직교 주파수분할다중화 시스템

직교 주파수분할다중화 시스템에서는 정보원의 고속 이진 데이터를 직병렬변환을 통하여 다수의 저속 데이터 열로 변환하고, 실수 또는 복소수 신호로 사상하여 부채널에 할당한다. 각 부채널에 할당된 신호는 직교 신호집합을 이용하여 변조된다. 직교 신호집합으로는 정현함수와 여현함수가 주로 사용되며 이산 역푸리에변환(또는 고속 역푸리에변환)으로 구현된다. 따라서 전송신호의 기저대역 모델은 식 (1)과 같다.

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi nk/N}, n=0, 1, \dots, N-1, \quad (1)$$

여기서 N 은 부채널의 수를 나타낸다. 가산성 백색 가우시안(additive white Gaussian noise, AWGN) 채널을 통하여 수신된 신호는 $y(n) = x(n) + w(n)$ 로 표현된다. 여기서 $w(n)$ 은 백색 가우시안 잡음을 나타내는 랜덤변수로서 평균이 0이고 분산은 σ^2 인 것으로 가정한다. 수신된 신호는 이산 푸리에변환을 이용하여 식 (2)와 같이 복조된다.

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi nk/N} + W(k), \quad (2)$$

여기서 $W(k)$ 는 부채널에 포함된 잡음 스펙트럼이다.

2.2 주파수 오프셋과 채널간섭

직교 주파수분할다중화 시스템의 송신단과 수신단에는 중간주파수 변조와 복조를 위한 국부발진기가 사용된다. 국부발진기들의 주파수 차이에 의한 주파수 오프셋이 있는 전송채널은 그림 1과 같이 모델링된다.

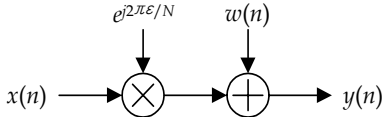


그림 1. 주파수 오프셋이 있는 채널 모델
Fig. 1 A channel model with the frequency offset

여기서 ϵ 는 부채널 주파수 간격에 대한 상대적인 주파수 오프셋의 양을 나타내며 $\epsilon = |f_s - f_r|/\Delta f$ 로 정의된다. 여기서 f_s 와 f_r 은 각각 송수신기 국부발진기의 주파수를 나타낸다. 따라서 주파수 오프셋은 $|\epsilon| \leq 0.5$ 의 범위를 갖는다.

주파수 오프셋이 있는 채널에서 수신되는 신호는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(n) = x(n)e^{j2\pi n\epsilon/N} + w(n) \quad (3)$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{j2\pi nk/N} e^{j2\pi n\epsilon/N} + w(n)$$

따라서 복조된 직교 주파수분할다중화 심볼은 식 (4)와 같다.

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[\frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} X(l)e^{j\frac{2\pi nl}{N}} \right] e^{j\frac{2\pi n\epsilon}{N}} e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} + W(k) \quad (4)$$

$$= X(k)S(0) + \sum_{l=0, l \neq k}^{N-1} X(l)S(l-k) + W(k),$$

여기서 등호 우측의 첫 항은 채널에 의하여 감쇄된 k 번째 부채널 신호이다. 두 번째 항은 주파수 오프셋의 영향으로 l 번째 부채널 신호성분이 k 번째 부채널에 나타나는 채널간섭으로 그 영향의 정도는 식 (5)의 간섭계수로 표현된다. 여기서 $Sa(x) = \sin(x)/x$ 이다.

$$S(l-k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi n(l+\epsilon-k)/N} \quad (5)$$

$$= \frac{Sa(\pi(l+\epsilon-k))}{Sa(\pi(l+\epsilon-k)/N)} e^{j\pi(l+\epsilon-k)(1-1/N)}.$$

III. 채널간섭 자기소거법

3.1 기존 채널간섭 자기소거법

주파수 오프셋이 발생하는 경우 직교주파수분할다중화 심볼의 각 부채널에는 계수 $S(l-k)$ 에 의존하는 채널간섭 성분이 나타난다. 이러한 채널간섭은 최인접 부채널의 영향이 가장 크고 주파수 영역에서 원거리에 위치한 부채널의 영향은 작다. 이러한 특성에 주목하여 Zhao 등^[8]은 인접 부채널 신호를 이용하여 간섭을 상쇄시킬 수 있는 인접심볼반복(adjacent symbol repetition, ASR)법을 제시하였다. 여기서는 식 (6)과 같이

$$X(k+1) = -X(k), \quad 0 \leq k \leq N-1, \quad (6)$$

$(k+1)$ 번째 부채널에 k 번째 부채널 신호의 부호반전 신호를 할당한다. 여기서 k 는 짝수이다.

인접심볼반복 자기소거법에서 식 (6)에 따라 할당된 직교주파수분할다중화 심볼에 대한 k 번째와 $(k+1)$ 번째 부채널 복조신호는 각각 식 (7), 식 (8)과 같이 나타난다.

$$Y(k) = X(k)\{S(0) - S(-1)\} + \sum_{l=0, l \neq k}^{N-1} X(l)\{S(l-k) - S(l-k-1)\} + W(k), \quad (7)$$

$$Y(k+1) = X(k)\{S(1) - S(0)\} + \sum_{l=0, l \neq k}^{N-1} X(l)\{S(l-k+1) - S(l-k)\} + W(k+1), \quad (8)$$

여기서 l 은 짝수이다. 따라서 복조된 직교 주파수분할다중화 심볼의 k 번째 부채널 신호는 식 (9)와 같다.

$$Y'(k) = Y(k) - Y(k+1) = X(k)\{2S(0) - S(1) - S(-1)\} + \sum_{l=0, l \neq k}^{N-1} X(l)\{2S(l-k) - S(l-k-1) - S(l-k+1)\} + W'(k), \quad (9)$$

여기서 $W'(k) = W(k) - W(k+1)$ 로서 잡음 스펙트럼 성분을 나타낸다. 따라서 기존 인접심볼반복법에서 자기소거 이후 잔류 채널간간섭(residual ICI)은 식 (10)과 같은 간섭계수에 의존한다.

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

3.2 새로운 인접심볼반복 자기소거법

식 (10)을 통하여 인접심볼반복 자기소거법에서는 최인접 부채널의 표본화 함수값이 잔류 심볼간간섭에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 하지만 기존 방법에서는 표본화 함수값에 대한 고려 없이 단순히 부호 반전 신호를 연속된 부채널에 할당한다. 특히, $(l-k) < 5$ 인 부채널에 의한 간섭계수가 $-10 \sim 3$ [dB] 정도임을 감안하면 기존 방법에서 근접한 부채널에 의한 채널간간섭은 오히려 2배 가량 증가될 수 있음을 의미한다.

본 논문에서는 잔여 채널간간섭에 상대적으로 더 큰 영향을 미치는 인접 부채널의 간섭계수를 최소화시키고자 한다. 이를 위하여 여기서는 연속되는 3개 부채널의 간섭계수를 나타내는 식 (10)을 식 (11)과 같이 변형한다.

$$I(k) = 2S(l-k) - t\{S(l-k+1) + S(l-k-1)\}. \quad (11)$$

이로부터 채널간간섭을 최소화시키는 최적 t 값은 식 (12)과 같다.

$$t = \frac{2S(l-k)}{S(l-k+1) + S(l-k-1)} \quad (12)$$

이에 따라 개선된 인접심볼반복 자기소거법에서 각 부채널에 할당되는 신호는 식 (13)과 같다.

$$X(k+1) = -t \cdot X(k), \quad 0 \leq k \leq N-1. \quad (13)$$

여기서 k 는 짝수이다.

IV. 모의실험 및 성능분석

제안된 인접심볼반복 자기소거법의 성능을 확인하기 위하여 그림 2에 나타낸 직교주파수분할다중화 시스템 모델을 이용하여 모의실험을 수행하였다. 여기서 전송채널은 그림 1의 모델을 이용하였다. 기존 인접심볼반복 자기소거법과 제안된 방법에서 신호사상과 자기소거를 위한 부채널 할당된 신호는 각각 식 (6)과 식 (13)을 이용하였다. 모의실험에 사용된 전체 직교주파수분할다중화 심볼의 수는 100,000개이고, 각 심볼당 부채널의 수는 64개로 정하였다. 그리고 신호사상기로는 이진위상편이키잉을 이용하였다.

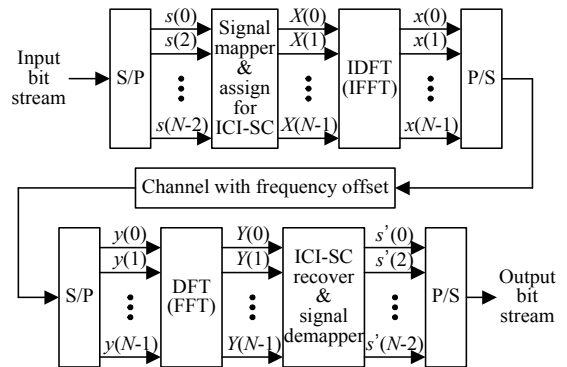


그림 2. 채널간간섭 자기소거법이 적용된 직교주파수분할다중화 시스템의 모의실험을 위한 블럭도
Fig. 2 The block diagram for computer simulation of an OFDM system with ICI self-cancellation

자기소거법이 적용되지 않은 직교주파수분할다중화 시스템과 기존 Zhao 알고리즘이 적용된 시스템^[8], 그리고 제안된 방법이 적용된 시스템에서 부채널 차이에 따른 간섭계수를 그림 3에 비교하여 나타내었다. 여기서 t 값을 구하기 위한 주파수 오프셋은 최대 크기의 1/2에 해당하는 $\epsilon = 0.25$ 로 가정하였다.

자기소거법이 적용되지 않은 시스템의 경우 점선으로 표시된 것처럼 간섭계수 $S(l-k)$ 는 자기소거법이 적용된 시스템들의 간섭계수보다 훨씬 크게 나타난다. 또한 부채널 간격 $l-k$ 가 0에 가까운 인접 부채널의 간섭계수가 가장 큰 값을 가지는 것도 확인할 수 있다. 이에 비하여 기존 자기소거법이 적용된 시스템에서는 부채널 간격이 $l-k = N/2$ 인 경우 간섭계수는 -60 [dB]까지 감소됨을 알 수 있다. 하지만 $l-k$ 가 0

에 가까운 부채널들에 의한 간섭계수는 자기소거법이 적용되지 않은 시스템보다 3 [dB] 가량 증가되는 것을 확인할 수 있다. 이는 매우 인접한 부채널들에 의한 채널간간섭이 자기소거법의 적용으로 인하여 오히려 더 증가될 수 있음을 의미한다.

한편, 제안된 채널간간섭 자기소거법이 적용된 시스템의 경우 $l-k > 5$ 인 영역에서는 기존 방법이 적용된 시스템과 구분이 가능하지 않을 정도로 거의 동일한 간섭계수를 가진다. 하지만 $l-k \leq 5$ 인 영역에서 제안된 방법은 -160 [dB] 보다 적은 간섭계수를 가지는 것으로 나타났다. 즉, 기존 방법에 비하여 제안된 자기소거법은 인접한 부채널들에 의한 채널간간섭을 매우 크게 감소시킬 수 있다.

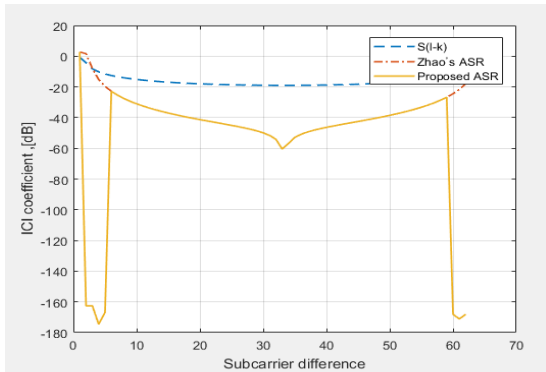


그림 3 기존 자기소거법과 제안된 자기소거법의 채널간간섭 계수

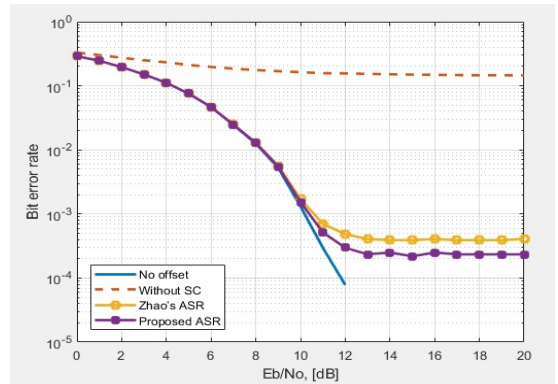
Fig. 3 The coefficients of the conventional and the proposed self-cancellation schemes

주파수 오프셋의 변화에 따른 인접심볼반복 기반 자기소거법이 적용된 직교주파수분할다중화 시스템의 비트오율(bit error rate, BER)을 그림 4에 비교하여 나타내었다. 여기서 주파수 오프셋은 $\epsilon = 0.1$ 과 0.4로 정하여 실험하였다. E_b 와 N_0 는 각각 신호와 백색 가우시안 잡음의 평균전력을 나타낸다.

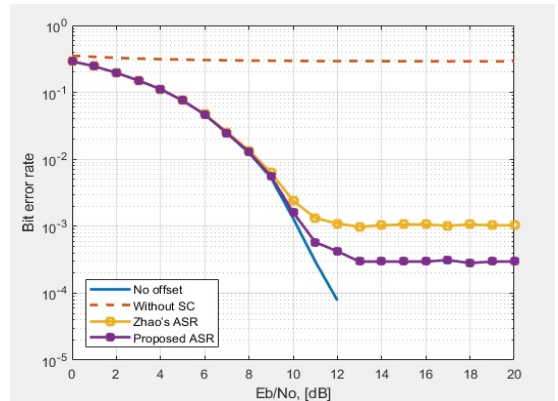
채널간간섭 자기소거법이 적용되지 않은 직교주파수분할다중화 시스템의 비트오율은 자기소거법이 적용된 시스템에 비하여 훨씬 큰 것으로 나타났다. 전자의 경우 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)를 20 [dB]까지 증가시켜도 비트오율은 $BER = 2.0 \times 10^{-1}$ 정도로 매우 크게 나타난다. 이에 비하여 자기소거법이 적용된 시스템들은 현저히 개선된 비트오

류성능을 가지는 것을 알 수 있다.

주파수 오프셋이 $\epsilon = 0.1$ 인 경우 기존 인접심볼반복 자기소거법이 적용된 시스템의 비트오율은 $E_b/N_0 = 13$ [dB]에서 약 4.2×10^{-4} 정도로 나타나지만 오프셋을 0.4로 증가시키면 $BER \approx 1.1 \times 10^{-3}$ 정도로 증가된다. 이에 비하여 제안된 자기소거법이 적용된 시스템은 $\epsilon = 0.1$ 인 경우 $BER \approx 2.5 \times 10^{-4}$ 정도이고, $\epsilon = 0.4$ 로 증가되면 $BER \approx 3.0 \times 10^{-4}$ 정도의 비트오율을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 주파수 오프셋이 증가됨에 따라 채널간간섭도 증가되므로 오류성능은 더욱 열화됨을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 새로운 자기소거법은 기존 방법에 비하여 훨씬 향상된 오류성능을 제공하는 것으로 판단된다.



(a)



(b)

그림 4. 주파수 오프셋이 있는 환경에서 직교 주파수분할다중화의 비트오율 (a) $\epsilon = 0.1$ (b) $\epsilon = 0.4$

Fig. 4 The bit error rate of the OFDM system with frequency offset (a) $\epsilon = 0.1$ (b) $\epsilon = 0.4$

한편, 채널간간섭 자기소거법이 적용된 시스템들은 $E_b/N_0 = 10$ [dB]까지는 주파수 오프셋이 없는 백색 가우시안 잡음채널에서의 성능에 필적하는 오류성능을 보인다. 하지만 $E_b/N_0 = 13$ [dB] 이상이 되면 신호 대 잡음비를 증가시켜도 오류성능이 거의 개선되지 않는 오류마루현상이 발생하는 특성을 보인다. 이는 자기소거법을 적용하더라도 여전히 남아 있는 잔류 채널간간섭의 영향인 것으로 분석된다.

V. 결론

본 논문에서는 개선된 인접심볼반복 기반 자기소거법을 제안하고, 그 성능을 분석하였다. 여기서는 연속된 3개 부채널의 간섭계수를 이용하여 인접한 부채널들에 의한 채널간간섭을 최소화시키는 t -파라미터를 적용하였다. 모의실험 결과, 제안한 자기소거법은 원거리 부채널의 영향은 기존의 방법과 동일하지만 인접 부채널에 의한 채널간간섭은 크게 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 이로 인하여 개선된 자기소거법이 적용된 직교주파수분할다중화 시스템은 기존 시스템보다 현저히 우수한 심볼오류 특성을 가지는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2018년 교육부 및 한국연구재단의 이공학개인지초연구지원사업의 지원에 의하여 이루어졌음. (No. 2015R1D1A1A01060057).

References

- [1] A. Bahai, B. Saltzberg, and M. Ergen, *Multi-Carrier Digital Communications: Theory and Applications of OFDM*. New York: Springer, 2004.
- [2] T. Pollet, M. VanBladel, and M. Moeneclay, "BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and Wiener phase noise," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, no. 2/3/4, Feb./Mar./Apr. 1994, pp. 191-193.
- [3] P. Moose, "A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 42, no. 10, Oct. 1994, pp. 2908-2914.
- [4] S. Swang, "Channel estimation based on LMS algorithm for MIMO-OFDM system," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 6, Dec. 2012, pp. 1455-1461.
- [5] W. Cho, "A measurement study of midamble based channel estimation in IEEE 802.11p WAVE system," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 8, no. 5, May 2013, pp. 733-738.
- [6] K. Him and B. Seo, "Efficient ICI self-cancellation scheme for OFDM systems," *ETRI J.*, vol. 36, no. 4, Aug. 2014, pp. 537-544.
- [7] M. Rahman, P. Dey, and M. Rashid, "An improved ICI self cancellation scheme for OFDM systems under various channels," *Int. J. Electrical and Computer Eng.*, vol. 6, no. 2, Apr. 2016, pp. 690-699.
- [8] Y. Zhao and S. Gaggman, "Intercarrier interference self-cancellation scheme for OFDM mobile communication systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 49, no. 7, July 2001, pp. 1185-1191.
- [9] A. Seyedi and G. Saulnier, "General ICI self-cancellation scheme for OFDM systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 54, no. 1, Jan. 2005, pp. 198-210.
- [10] S. Habib, R. Sayed, H. Hamed, and M. Fikri, "New ICI self cancellation scheme for OFDM system," *Int. J. of Computer and Commun. Eng.*, vol. 3, no. 1, Jan. 2014, pp. 1-5.

저자 소개



진혜걸(Huijie Cheng)

2017년 라오닝과학기술대학교 전자
계측공학과 졸업(공학사)
2017년 ~ 현재 경상대학교 대학원
전기전자공학과 석사과정

※ 관심분야 : 디지털통신시스템, 통신신호처리 등



강석근(Seog-Geun Kang)

1988년 경북대학교 전자공학과 졸
업(공학사)
1993년 경북대학교 대학원 전자공
학과 졸업(공학석사)

1999년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

1993년 ~ 1994 국방과학연구소 연구원

2000년 ~ 2003 싱가포르국립대학교 전기및컴퓨터공
학과 Research Fellow

2003년 ~ 현재 경상대학교 반도체공학과 교수

2003년 ~ 현재 경상대학교 공학연구원 책임연구원

※ 관심분야 : 디지털통신시스템, 통신신호처리, OFD
M, 전력선통신시스템

