

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2014.14.1.1>

IIBC 2014-1-1

OFDMA 시스템에서 SFO와 CFO 저감 기법에 관한 연구

An Enhanced Scheme with CFO and SFO in OFDMA system

이영광*, 이규섭**, 최진규***

Young-Gwang Lee*, Kyu-Seop Lee**, Gin-Kyu Choi***

요약 최근 OFDM시스템의 부반송파의 묶음을 각각 다른 사용자에게 할당하는 다중접속 기법인 OFDMA 기법이 멀티미디어 통신의 무선 다중 접속 능력 때문에 큰 주목을 받고 있다. 기존의 OFDM 통신 시스템에서 채널을 통과한 수신신호를 복조할 때 여러 가지 방법을 사용하는데, 채널을 통과할 때 CFO(carrier frequency offset)와 샘플링을 할 때 SFO(sampling frequency offset)이 생기게 된다. 이러한 주파수 오프셋 때문에 복조를 할 때 정확한 신호를 검출 할 수 없게 된다. 본 논문에서는 다중 사용자 환경인 OFDMA에서 이 CFO와 SFO에 대한 영향력을 감소하는 방법을 제시한다. 또한 CFO로 인하여 MUI(multi user interface)가 생기는데 이는 서로 다른 사용자들 간의 간섭으로 인해 생기는 것으로 일종의 잡음(noise)이라고 볼 수 있다. 이 MUI에 관한 것을 재귀적인 알고리즘을 사용하여 상쇄(cancellation)하고 또 CFO와 SFO에 대한 값을 추정하고 최소화하여 기존의 CFO와 SFO가 일어난 OFDM의 신호에 대한 검출보다 더 좋게 검출을 할 수 있는 알고리즘을 제안한다.

Abstract Recently, orthogonal frequency-division multiplexing(OFDM), with clusters of subcarriers allocated to different subscribers(often referred to as OFDMA), has gained much attention for its ability in enabling multiple-access wireless multimedia communications. In such systems, carrier frequency offsets (CFOs) can destroy the orthogonality among subcarriers. And the mismatch in sampling frequencies between transmitter and receiver can lead to serious degradation due to the loss of orthogonality between the subcarriers. As a result, multiuser interference (MUI) along with significant performance degradation can be induced. In this paper, we present a scheme to compensate for the SFOs and CFOs at the base station of an OFDMA system. A novel sampling frequency offset estimation algorithm is proposed, which is based on the repetition of a symbol at the communication start-up. Then, circular convolutions are employed to generate the interference after the discrete Fourier transform processing, which is then removed from the original received signal to increase the signal to interference power ratio(SIR). Simulation result shows that the proposed scheme can improve system performance.

Key Words : OFDM, OFDMA, CFO, SFO, MUI

1. 서 론

OFDM 통신 기술은 한정된 주파수 안에서 효율적으

로 주파수를 이용할 수 있게 만드는 통신 기술이다. 다중으로 주파수를 분할하여 전송을 하기 때문에 OFDM 시스템은 multipath 환경에 강하다는 장점을 가지고 있다.

*준회원, 홍익대학교 전자전산공학과

**정회원, 홍익대학교 전자전산공학과

***정회원, 홍익대학교 전자전산공학과

접수일자 2014년 1월 1일, 수정완료 2014년 1월 29일

게재확정일자 2014년 2월 7일

Received: 1 January, 2014 / Revised: 29 January, 2014

Accepted: 7 February, 2014

*Corresponding Author: gkchoi@hongik.ac.kr

Dept. of Electronic & Electrical Engineering, Hongik University, Korea

일반적으로 multipath 환경에서는 동일한 신호들이 시간 간격을 두고 여러 번 들어오게 되는데(Delay spread) 이러한 현상을 해결해야만 정확한 데이터들을 수신할 수가 있다. OFDM은 이러한 현상을 해결하기가 수월하며 동시에 하드웨어의 복잡성을 낮출 수 있다. 또한 하나의 부반송파(sub-carrier)에서의 채널 상태가 좋지 않더라도 데이터의 전송률이 크게 감소하지 않는다. 여러 부반송파(sub-carrier)에 데이터를 나눠서 보내기 때문에 적은 대역에서 부반송파의 채널 상태가 좋지 않다 하더라도 데이터를 검출하는데 크게 지장이 없다.^[1] 채널을 통해 수신된 OFDM 신호는 연속시간 신호이므로 데이터 복조를 위해서는 시간 영역에서의 샘플링이 선행되어야 한다. 샘플링 된 신호는 FFT를 거쳐 복조가 되는데, 이때 샘플링 동기가 정확히 이루어져야 올바른 복조가 이루어 질 수 있다. 그러나 샘플링 주파수를 결정하는 발진기(oscillator)의 특성은 이상적이지 못하기 때문에 일반적으로 샘플링 된 신호에는 샘플링 주파수 오프셋(SFO : sampling frequency offset)이 존재하게 된다. 또한 도플러 효과(Doppler effect)와 멀티패스로 인하여 생기는 시간지연(time delay) 때문에 반송파 주파수 오프셋(CFO : carrier frequency offset)이란 것 또한 존재 한다. 이 두 가지의 주파수 오프셋으로 인하여 수신신호의 진폭 왜곡, 인접한 부반송파간의 ICI(inter carrier interference), MUI(multiuser interference)가 생기게 된다.^[2, 3] 이러한 주파수 오프셋과 간섭들은 일반적인 채널 추정과 상쇄기법들로는 완벽하게 보상할 수 없고, 이에 따라 샘플링 주파수 오프셋과 부반송파 주파수 오프셋에 대한 추정은 필수적이다. 또 이로 인하여 생기는 MUI를 상쇄시켜야 보다 더 정확한 신호를 검출해 낼 수 있다. 기존에 CFO와 ICI를 줄이는 여러 방법들이 제시 되었고 본 논문에서는 OFDMA 시스템에서 SFO와 CFO를 줄여 MUI를 감소시키는 기법을 제안한다.

II. SFO 및 CFO의 추정과 보상

1. SFO와 CFO의 추정

SFO와 CFO를 추정하기 위해서는 송신단에서 $2N$ 크기의 심볼을 송신해서 그 신호를 수신단에서 각각 N -point씩 나누어 FFT를 해서 각각 심볼의 위상차를 이용하여 추정할 수가 있다. 이때 앞부분의 심볼은 식(1)

로 나타낼 수 있다.^[4]

$$R_{1k} = \sum_{n=0}^{N-1} r_n e^{-j2\pi \frac{n(k(1+\epsilon_s)+\epsilon_c)}{N}}, \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1)$$

또한 뒷부분의 심볼을 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} R_{2k} &= \sum_{n=N}^{2N-1} r_n e^{-j2\pi \frac{n(k(1+\epsilon_s))}{N}} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} r_{n+N} \cdot e^{-j2\pi \frac{(n+N)(k(1+\epsilon_s)+\epsilon_c)}{N}}, \\ &= R_{1k} \cdot e^{-j2\pi(\epsilon_s \cdot k + \epsilon_c)}, \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (2)$$

이 식을 통하여 위상은 부반송파의 인덱스와 샘플링 주파수 오프셋이 변하는 경우 신호와 ICI 둘 다 비례하여 이동하는걸 보여준다. 따라서 이를 이용하여 각각 SFO와 CFO를 추정할 수 있다.

연속되는 심볼들 사이의 위상차를 이용하여^[5] 식을 만들어보면 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\Delta\theta_i = 2\pi(\epsilon_s \cdot k + \epsilon_c) = \angle \left(\frac{R_{1k}}{R_{2k}} \right) \quad (3)$$

샘플링 주파수 오프셋 ϵ_s 는 이웃하는 두 개의 부반송파의 위상 차이를 이용하여 식(4)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\epsilon}_{s,k} &= (\epsilon_s \cdot k + \epsilon_c) - (\epsilon_s \cdot (k-1) + \epsilon_c) \\ &= \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\angle \left(\frac{R_{1k}}{R_{2k}} \right) - \angle \left(\frac{R_{1k-1}}{R_{2k-1}} \right) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

우리가 수신한 신호는 noise를 포함 하고 있기 때문에 SFO 추정 값의 분산을 줄이기 위해 w_i 라는 가중치를 이용한다. 이 가중치를 식 (4)에서 얻은 추정 값과 결합시켜서 식을 전개 하면 다음의 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\hat{\epsilon}_s = \sum_{k=1}^{N-1} w_k \cdot \hat{\epsilon}_{s,k} \quad (5)$$

가중치 w_i 를 최적화 시키는 값은 식 (5)에서 구한 $\hat{\epsilon}_s$

의 분산을 최소화 하는 값이다. 하지만 이 문제 역시 분석적으로 해결을 할 수가 없다. 따라서 이 가중인자 w_i 를 구하기 위해서 부채널의 신호대비 잡음비(SNR : Signal to Noise Ratio)인 식 (6)을 이용하여 값을 선택한다.

$$w_k = \frac{SNR_k}{\sum_{k=1}^{N-1} SNR_k} \quad (6)$$

이 때, 이웃하는 부채널의 SNR의 차이는 크지 않다고 가정한다.

샘플링 주파수 오프셋을 추정한 값을 가지고 우리는 반송파 주파수 오프셋을 추정할 수 있다. 식 (3)으로부터 비슷하게 구하는 방법으로 반송파 주파수 오프셋을 추정하는 값을 얻을 수 있는데, 그 식은 다음과 같다.

$$\hat{\varepsilon}_{c,k} = \frac{1}{2\pi} \angle \left(\frac{R_{1k}}{R_{2k}} \right) - k \cdot \hat{\varepsilon}_s \quad (7)$$

이 식 역시 노이즈를 포함하지 않은 것으로 식 (6)과 동일한 가중인자를 이용하여서 추정하여 얻은 반송파 주파수 오프셋은 다음과 같이 된다.

$$\hat{\varepsilon}_c = \sum_{k=1}^{N-1} w_k \cdot \hat{\varepsilon}_{c,k} \quad (8)$$

2. SFO와 CFO의 보상

샘플링 주파수 오프셋을 보상하기 위한 전통적인 접근 방법은 신호 샘플의 보간을 이용하는 것이다.^[6] 샘플링 주파수 오프셋의 보상을 하기 위해서 일반적인 DFT 단의 지수 부분을 살펴보면 식 (9)와 같다.

$$W_N^k = e^{-j2\pi kn/N} \quad (9)$$

식 (9)는 샘플링 주파수 오프셋이 포함되지 않은 요소이다. 이제 여기에 식 (8)에서 추정한 샘플링 주파수 오프셋 값을 포함하여 다시 식을 정리하면 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$W_N^{k/(1+\varepsilon_s)} = e^{\frac{-j2\pi kn}{(1+\varepsilon_s)N}} \quad (10)$$

이 식 (10)을 수신 DFT단에서 사용하여 샘플링 주파수 오프셋을 보상할 수 있다. 반송파 주파수 오프셋에 대한 보상과 이에 따라 생기는 ICI를 상쇄시키는 방법은 반복적 ICI 상쇄기법을 이용 하였다.^[7, 8, 9] 가드 인터벌을 제거한 수신 신호 r_n 을 DFT한 신호는 다음의 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} R_k &= DFT_N \left(\sum_{i=1}^M y_n^{(i)} e^{\frac{j2\pi \varepsilon_i n}{N}} + z_n \right) \\ &= \sum_{i=1}^M Y_k^{(i)} \otimes C_k^{(i)} + Z_k \end{aligned} \quad (11)$$

각 기호들을 살펴보면 \otimes 는 circular convolution을 표시하고, $Y_k^{(i)} = DFT_N(y_n^{(i)})$, $C_k^{(i)} = DFT_N(e^{j2\pi \varepsilon_i n/N})$, $Z_k = DFT_N(z_n)$, 그리고 $DFT_N(f(n)) \equiv (1/\sqrt{N}) \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-j2\pi nk/N}$ 가 된다. 편의상 우리는 식 (11)을 다음과 같이 벡터의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} R &= \sum_{i=1}^M Y^{(i)} \otimes C^{(i)} + Z \\ &= Y^{(m)} \otimes C^{(m)} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^M Y^{(i)} \otimes C^{(i)} + Z \end{aligned} \quad (12)$$

이 DFT된 수신 신호를 이용하여 CLJL 기법을 이용하여 CFO를 추정하면 식 (13)을 얻을 수 있다.^[10]

$$\begin{aligned} \hat{Y}_{CLJL}^{(m)} &= A^{(m)} \left((A^{(m)} R) \otimes C'^{(m)} \right) \\ &= A^{(m)} \left((A^{(m)} (Y^{(m)} \otimes C^{(m)})) \otimes C'^{(m)} \right) \\ &\quad + A^{(m)} \left(\left(A^{(m)} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^M Y^{(i)} \otimes C^{(i)} \right) \otimes C'^{(m)} \right) \\ &\quad + A^{(m)} \left((A^{(m)} Z) \otimes C'^{(m)} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

본 논문에서는 위의 CLJL 기법에 반복적으로 ICI를 제거하는 알고리즘을 적용한 기법을 이용하여 식 (14)를 얻을 수 있다.

Initialization: Set $j=0$ and

$$\hat{Y}^{(m),j} = A^{(m)}((A^{(m)}R) \otimes C'^{(m)})$$

for $m = 1, \dots, M$.

Loop : $j = j+1$

$$\text{Set } Y^{(m),j} = R - \sum_{i=1, i \neq m}^M \hat{Y}^{(i),j-1} \otimes C^{(i)},$$

for $m = 1, \dots, M$

$$\hat{Y}^{(m),j} = A^{(m)}((A^{(m)}Y^{(m),jk}) \otimes C'^{(m)}),$$

for $m = 1, \dots, M$ (14)

여기에서 $C'^{(m)}$ 은 $C^{(m)}$ 의 역수가 되고 이것이 반송파 주파수 오프셋의 보상을 해주게 된다. $A^{(m)}$ 은 대각 행렬로서 다음과 같다.

$$A^{(m)}(i+1, i+1) = \begin{cases} 1, & i \in \Gamma_m \\ 0, & i \notin \Gamma_m \end{cases} \quad (15)$$

$A^{(m)}$ 은 일종의 필터 역할을 하는데 우리가 원하는 m 번째 유저의 수신 신호만을 가질 수 있게끔 한다. 즉 식 (14)의 알고리즘을 재귀적으로 실행하여 CFO가 보상된 수신 신호 \hat{Y} 를 얻을 수 있다.

III. 3장 제안된 시스템의 구성

앞서서 샘플링 주파수 오프셋(SFO)과 반송파 주파수 오프셋(CFO)의 영향력들을 완화시키는 방법들을 알아보았다. 본 논문에서 제안하는 방법은 CFO와 SFO를 상쇄하거나 완화시키는 방법을 결합하여 보다 좋은 성능을 낼 수 있도록 하고 있다. 수신단에서 샘플링 주파수 오프셋과 반송파 주파수 오프셋을 제거하기 위해서는 수신단에서 각각의 주파수 오프셋의 값이 필요하고, 그 값은 식 (5)와 식 (8)에서 구하였다. 이 때 수신단에서 preamble의 위상차를 이용하여 주파수 오프셋 값들을 추정하는데 이를 위해서는 송신단에서는 그림 1과 같이 N의 길이를 갖는 preamble 신호 2개를 보내야만 한다.

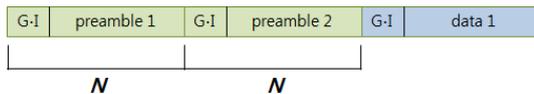


그림 1. 송신 프레임 형태
Fig. 1. Frame of transmitted signal

제안된 시스템의 수신단을 살펴보면 그림 4와 같이 식 (1)과 식 (2)의 DFT단을 거치는 R_{1k} 와 R_{2k} 를 구하여 샘플링 주파수 오프셋을 추정한다. 추정된 값을 가지고 샘플링 주파수 오프셋을 보상하여 다시 DFT를 한다. 그 후, 그림 3의 아랫부분에 있는 블록을 통하여 반송파 주파수 오프셋을 추정한다. 이 추정된 데이터를 통해 식 (14)의 알고리즘을 구현한 그림 3의 마지막 블록을 통하여 최종적으로 우리가 원하는 송신한 데이터를 검출하게 된다.

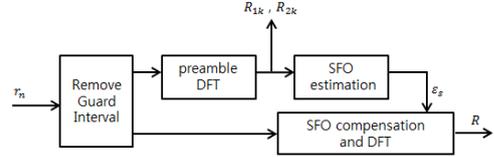


그림 2. 수신단 블록도 1
Fig. 2. Receiver block diagram 1

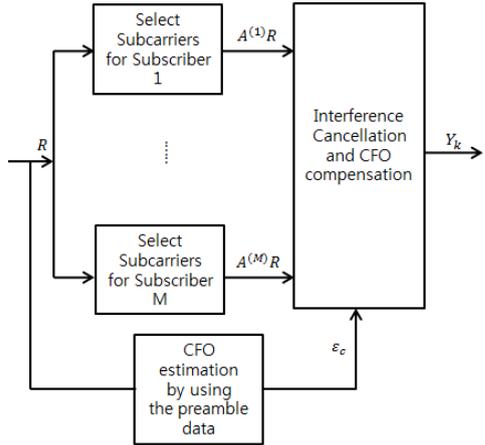


그림 3. 수신단 블록도 2
Fig. 3. Receiver block diagram 2

IV. 실험 및 결과

본 논문에서는 반송파 주파수 오프셋과 ICI 상쇄 기법을 기반으로 샘플링 주파수 오프셋을 추정함에 따라 향상되는 성능을 비교하였다. 성능비교를 위해 AWGN 채널을 이용하였고 샘플링 주파수 오프셋이 추정되었을 때와 샘플링 주파수 오프셋을 추정하지 않았을 경우를 비교하였다. 첫 번째로 반송파 주파수 오프셋을 추정하고 MUI를 상쇄시키는 기법의 시뮬레이션 결과이다. MUI를 상쇄시키는 방법을 기반으로 반송파 주파수 오프셋을

추정한 것과 하지 않은 것의 차이를 살펴보도록 하자. 시뮬레이션을 수행할 때의 각 파라미터들의 조건은 채널은 AWGN이고 사용자 수 $M=4$, DFT포인트는 $N=128$, 전송하려는 데이터는 20000bit , 가드인터벌(Guard Interval)의 길이는 $G=4$, 채널의 길이는 $L=2$ 로 하여서 구하였다. 여기서 반송파 주파수 오프셋은 각 유저마다 다르게 하여 $\varepsilon_1=0.01$, $\varepsilon_2=-0.01$, $\varepsilon_3=-0.005$, $\varepsilon_4=0.005$ 와 같이 설정하였다. 그림 4는 MUI를 상쇄시키고 반송파 주파수 오프셋을 추정하지 않은 것과 추정을 하여서 보상을 한 후의 BER 성능 결과이다.

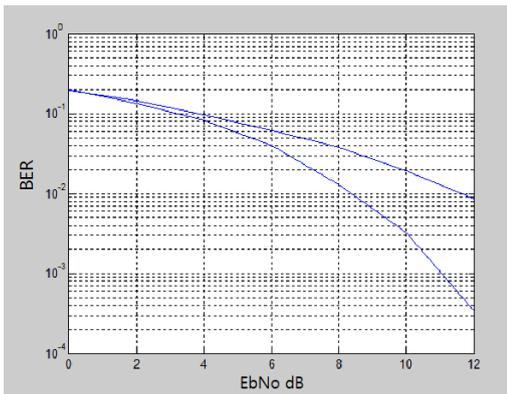


그림 4. CFO 보상된 시스템의 BER 성능 비교
Fig. 4. BER performance comparison for CFO compensation

그림 4에서 조금 더 위쪽의 그래프가 반송파 주파수 오프셋이 추정되지 않은 것을 보여주고 조금 더 아래쪽의 그래프가 추정 후 보상한 그래프를 보여준다. 이를 통하여 반송파 주파수 오프셋을 추정하고 보상한 것이 보상하지 않은 것보다 성능 향상이 있음을 알 수 있다. 그림 5는 본 논문에서 제시한 샘플링 주파수 오프셋의 영향을 결합하여 시뮬레이션을 수행하였다. 샘플링 주파수 오프셋인 $\varepsilon_s = 0.0009$ 을 제외한 나머지 파라미터는 동일하게 하여 시뮬레이션을 수행해 보았다. 접선이 샘플링 주파수 오프셋을 추정하여 보상한 것이고 실선이 보상하지 않은 것이다. 그림 5에서 보듯이 MUI를 상쇄하고 CFO를 보상한 방법에서 주파수 오프셋에 대한 영향을 추정하여 보상한 것이 보상하지 않은 것보다 성능 향상이 있음을 알 수 있다.

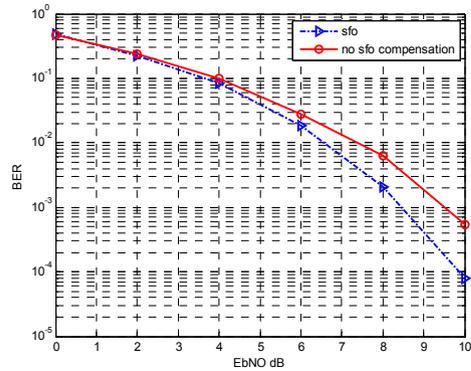


그림 5. SFO 보상된 시스템의 BER 성능 비교
Fig. 5. BER performance comparison for SFO compensation

V. 결론

본 논문에서는 기존에 반송파 주파수 오프셋을 추정하여 보상하고 MUI를 반복 루프를 이용하여서 상쇄시키는 기법에 샘플링 주파수 오프셋으로 인하여 생기는 영향을 제거하는 방법을 제안하였다. 시뮬레이션 결과를 통해서 샘플링 주파수 오프셋이 생겼을 경우 추정하여 보상한 것과 안한 것의 차이를 비교 하였고 이로 인하여 본 논문에서 제안한 방법을 통하여 수신된 데이터를 더 정확하게 검출을 할 수 있었다. 향후 OFDMA 뿐만 아니라 IDMA와 같은 시스템에 본 논문에서 제안된 기법을 적용할 계획을 갖고 있다.

References

- [1] P. H. Moose, "A Technique for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Frequency Offset Correction", IEEE Trans. on Comm., Vol. 42, No. 10, pp. 2908-2914, Oct. 1994
- [2] Juinn-Horng Deng and Yi-Hsin Lin, "An Iterative Receiver Design with CFO, SFO, Channel Estimation and Equalization for OFDM Systems over Multipath Fading Channels" ICACT, 2013 15th International Conference.
- [3] Jinyoung An, Sangchoon Kim, "Performance Analysis of UWB MIMO System with Prerake

- Transmit Processing”, Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 8, No. 9, pp. 43-50, Sep. 2009.
- [4] M. Sliskovic, “Sampling frequency offset estimation and correction in OFDM systems”, Electronics, Circuits and Systems, 2001. ICECS 2001. The 8th IEEE International Conference on Volume 1.
- [5] Joong-Soo Lim, “An Accurate Direction Finding Technology Using a Phase Comparison and Time Difference of Arrival”, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 12, No. 11, pp. 5208-5213, 2011.
- [6] M. Sliskovic, B. Jeren, “Clock frequency synchronisation in OFDM system for Power line Communications”, Proc, 1st Int. Workshop on Image and Signal Processing, Pula, Croatia, pp. 241-246, June 2000.
- [7] Defeng (David) Huang, “An interference-cancellation scheme for carrier frequency offset correction in OFDMA Systems” IEEE. Trans. on Comm. Vol. 53, No. 7, pp. 1155-1165, JULY 2005.
- [8] Juphil Cho1, Sang In Cho, Kyu Min Kang and Heon Jin Hong, “Analysis on WiBro Interfering to WLAN under Co-channel in TV White Spaces”, IJIBC Vol. 5 No. 1 pp. 1-5, Feb. 2013.
- [9] Seung-Gag Lim, “The Performance Comparison of CR-CMA and CM-CMA Adaptive Equalization in 16-QAM Signal”, IIBC VOL. 11, No. 3, pp.137-143, June 2011.
- [10] J. Choi, C. Lee, H. W. Jung, and Y. H. Lee, “Carrier frequency offset compensation for uplink of OFDM-FDMA systems”, IEEE Commun. Lett. vol. 4, no. 12, pp. 414 - 416, Dec. 2000.

저자 소개

이 영 광(준회원)



- 2012년: 홍익대학교 전자전기공학과 (BS)
- 2012년 - 현재 홍익대학교 전자전산공학과 석사과정,
<관심분야: 차세대이동통신, OFDM, 통신신호처리>

이 규 섭(정회원)



- 2009년: 홍익대학교 전자전기공학과 (BS)
- 2011년: 홍익대학교 전자전산공학과 (MS)
- 2011년 - 현재: 홍익대학교 전자전산공학과 박사과정
<관심분야: 차세대이동통신, wavelet, uwb, 통신신호처리>

최 진 규(정회원)



- 1983년: 성균관대학교 전자공학과 (BS)
- 1990년: (미)Polytechnic Univ. 전자전기공학과 (MS)
- 1994년: (미)Polytechnic Univ. 전산과학과 (MS)
- 1996년: (미)Polytechnic Univ. 전자전기공학과 (Ph.D)
- 1983년-1986년: LG 전자, Motorola Korea 연구원
- 1996년-2004년: 삼성전자 통신연구소 수석연구원
- 2004년 - 현재: 홍익대학교 과학기술대 전자전기공학과 부교수
<관심분야: 차세대이동통신, 초광대역 통신, 통신신호처리>

※ 본 논문은 2011학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음. 교신저자 : 최진규