The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)
Vol. 21, No. 6, pp.43-48, Dec. 31, 2021. pISSN 2289-0238, eISSN 2289-0246

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.6.43
JIIBC 2021-6-6

MC-CDMA 시스템에서 주파수 대역 효율에 관한 연구

A Study on the Bandwidth Efficiency of MC-CDMA System

지인호*

Innho Jee*

요 약 MC-CDMA 기법에서 효과적인 주파수 자원을 사용하기 위한 부채널 간섭을 줄이기 위해서 FFT 기법대신에 2 채널 필터 뱅크 기법을 제안하였다. 웨이브렛 특성을 가지는 원형 필터 뱅크는 보다 적은 sidelobe를 가지도록 설계되므로 가장 가까운 상호채널 간섭과 부호간의 간섭은 효과적으로 감소된다. 제안하는 MC-CDMA 시스템의 확산신호는 보다 적은 chip rate가 요구되고 자기상관 특징을 고려하지 않는 Walsh 코드가 최적의 신호 세트로 사용된다. 우리는 백색잡음 채널과 임의의 정현파 방해자가 존재하는 조건하에서 제안된 시스템의 성능을 추정하기 위해서 비트 오차 속도와 신호대잡음비를 고려하였다. 기존의 FFT 기반의 MC-CDMA 모의시험 결과와 비교하여 제안된 시스템이 간섭 효과를 줄이는 관점에서 기존의 MC-CDMA 기법보다 좋은 성능을 나타냄을 증명하였다.

Abstract We propose 2-channel filter bank method instead of FFT method to decrease sub-channel interference for using of efficient frequency resource in MC-CDMA method. Since a prototype filter of filter bank having wavelet characteristic is designed having more less side-lobe, the nearest co-channel interference and inter symbol interference are decreased efficiently. Since the spreading signal of suggesting MC-CDMA system is being demanded for less chip rate and is not being considering for autocorrelation characteristic, the Walsh code can be used as a optimal orthogonal signal set. We consider bit error rate and signal to noise ratio to estimate the performance of suggested system on condition that white noise channel and arbitrary sinusoidal jammer are existing. As a result of comparing to traditional FFT-based MC-CDMA simulation result, our suggested system has shown better performance than traditional MC-CDMA method on the side of minimizing interference effect.

Key Words : MC-CDMA, Discrete Wavelet Transform, Walsh Code, Interference

*정회원, 홍익대학교 소프트웨어융합학과
접수일자 2021년 11월 3일, 수정완료 2021년 12월 3일
게재확정일자 2021년 12월 10일

Received: 3 November, 2021 / Revised: 3 December,2021 / Accepted: 10 December, 2021
*Corresponding Author: ijee@hongik.ac.kr
Dept. of Software and Communication Engineering, Hongik University, Korea

Ⅰ. 서 론

라디오 주파수 대역은 제한된 자원으로 미래의 이동통신 네트워크에서 할당된 주파수 대역의 효율적인 사용을 필요로 한다. 무선 채널에서 디지털 데이터를 송수신하기 위해 특별히 설계된 변조와 다중 접속기술은 이러한 목적을 달성하기 위해 중요한 역할을 한다. 이러한 무선 통신 기술 중에서 DS-SS(Direct Sequence Spread Spectrum) 기법에 근거한 CDMA(Code Division Multiple Access)기법은 무선 환경에서 많은 관심을 모으고 있는 대표적인 방법이다. 일반적으로 DS-SS CDMA 시스템의 성능은 높은 데이터 율을 요구하는 응용에서 다중 사용자 간섭(Multi-User-Interference:MUI)과 칩간의 간섭(Inter-Chip-Interference:ICI) 또는 부호간의 간섭(Inter-Symbol-Interference:ISI)에 의해 제한을 받는다. 데이터 율이 낮고 심벌간 간섭의 양을 무시해도 다중경로 페이딩(fading)은 채널간의 간섭(Inter-Channel-Interference:ICI) 때문에 성능의 감소 요인이 된다. DS-SS CDMA 시스템의 성능저하 요소인 심벌간 간섭과 칩간 간섭 문제를 해결하기 위하여 다중 반송파(multi-carrier) 변조방식을 CDMA와 결합한 MC-CDMA 시스템이 제안되었다. 송신데이터 열을 동시에 여러 개의 협대역(narrow band) 부 반송파(sub-carrier)를 통하여 전송하여 부호 주기가 지연확산보다 매우 크기 때문에 부호간 간섭 문제에 직면하지 않게 된다. 또한 같은 데이터 부호를 다수의 협대역 직교 부 반송파의 스펙트럼 확산이 없이 전송함으로써 채널간 간섭 문제를 해결할 수 있다. 그리고 MC-CDMA 시스템은 주파수 다이버시티(Frequency Diversity)를 이용하기 때문에 상대적으로 안정된 송신 데이터의 획득이 가능하다.

이러한 기술들은 고속 푸리에 변환 (Fast Fourier Transform:FFT)을 적용하여 용이하게 구현될 수 있다. 그러나 FFT를 사용한 다중 반송파 변조는 이웃채널과의 스펙트럼 중복에 의하여 이웃한 채널간의 간섭을 낳게 된다. 또한 약간의 주파수 천이 현상이 발생하면 스펙트럼 중첩이 증가하여 시스템 성능은 상당히 감소된다.

이 문제를 극복하기 위한 신호처리 방법으로 2채널 부대역 필터 뱅크를 제안하였다. 이산 웨이브렛 변환(Discrete Wavelet Transform:DWT)을 사용하게 된다. 시스템은 부 채널간의 스펙트럼을 제한하게 된다. 즉, 웨이브렛 변환의 시간 및 주파수 국부(localization) 특징 때문에 부 반송파간 간섭을 줄여 이웃 채널간의 간섭을 감소시킨다.

제안된 시스템은 확산율이 작기 때문에 기존의 상호상관이 크면서 길이가 긴 확산코드를 사용할 필요가 없다. 따라서 상호상관이 좋으면서 길이가 짧은 확산코드인 Walsh 코드의 사용이 가능하다.

Ⅱ. MC-CDMA 시스템 모델

1. 송신기 모델

직교 MC-CDMA에서 각 데이터 부호는 $\Delta f = 1/T_b$ 만큼 떨어진 N 개의 서브캐리어로 동시에 전송된다. 전송에 앞서 N개의 병렬 가지에 있는 데이터 부호는 동일한 길이를 갖는 확산코드 $\{c_i\}$와 곱해진다. 그림 1에 MC-CDMA 시스템의 송신기 모델을 보인다[3].

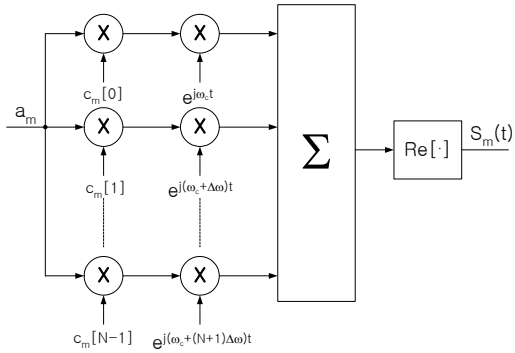

그림 1. MC-CDMA 시스템의 송신기 모델
Fig. 1. Transmitter model of MC-CDMA system

여기서, a_m은 m번째 사용자의 입력 데이터 부호 구간 $(0 \le t \le T_b)$에서의 데이터 부호를 나타내며, $\Delta f = \frac{\Delta\omega}{2\pi}$ 이다. 전송신호 $s_m(t)$는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s_m(t) = Re\left\{ \sum_{k=0}^{N-1} c_m[k]\ a_m\ e^{j(w_c + k\Delta w)t} \right\} \quad (1)$$

여기서, $c_m[k]$는 m번째 사용자에게 할당된 확산수열로 다음을 만족한다.

$$E\left\{c_m[k]c_{m'}[k+i]\right\} = 0 \qquad \text{for} \quad i \neq 0,\ \forall m,\ m' \quad (2)$$

이산시간 시스템에서는 그림 2와 같이 역 FFT를 사용해서 구현할 수 있다.

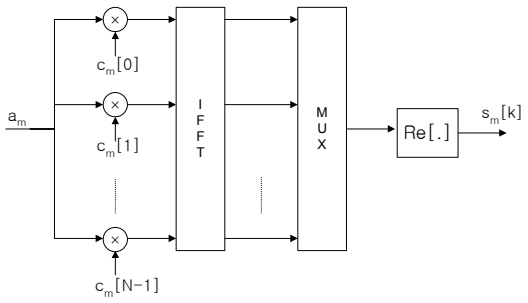

그림 2. IFFT를 이용한 MC-CDMA 송신기 모델
Fig. 2. MC-CDMA transmitter model using IFFT

2. 수신기 모델

MC-CDMA 시스템의 수신기는 N개의 상관기 출력을 역 확산하여 결합한 후 비트 판정을 한다. 기존의 DS-CDMA에서는 다중 경로 신호의 상관기 출력 결과를 결합하는 레이크(rake) 수신기가 시간영역 수신기임에 비해, MC-CDMA 수신기는 주파수영역 레이크 수신기이다. 따라서 동일이득결합기(EGC)나 최대비결합기(MRC)와 같은 전통적인 다이버시티 결합방식을 주파수 영역에서 사용할 수 있다. 직교 MC-CDMA 시스템에서 부 반송파의 직교성은 적당한 부 반송파 간격을 선택함으로써 얻을 수 있으며, 사용자간 직교성은 직교확산 코드에 의해 얻어진다. 다중경로 페이딩 채널에서는 사용자간 직교성이 손상된다.

그림 3은 사용자 m에 대한 MC-CDMA 수신기를 표본화된 형태로 실현한 예를 보인다[3].

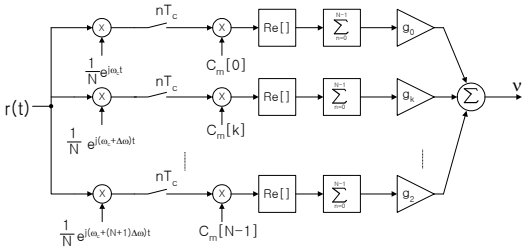

그림 3. MC-CDMA 시스템의 수신기 모델
Fig. 3. Receiver model of MC-CDMA system

여기서, $c_m[k]$는 사용자 m의 확산수열이며, k번째 수신기 상관기 출력은 g_k의 이득을 가지고 결합된다. 판정을 위한 결정변수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v = \sum_{k=0}^{N-1} g_k \sum_{n=0}^{N-1} Re\left\{\frac{1}{N} c_m[k] r(nT_c)\ e^{-j(w_c + k\Delta w)nT_c}\right\} \quad (3)$$

여기서, $r(t)$는 수신된 신호이다. $T_c = T_b/N$이며, $\Delta\omega = 2\pi/T_b$이므로 v는 다음과 같이 된다.

$$v = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} g_k\ c_m[k] \sum_{n=0}^{N-1} Re\left\{r(nT_c)\ e^{-jw_c nT_c}\ e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}\right\} \quad (4)$$

Ⅲ. 웨이브렛과 필터 뱅크

그림 4는 2-채널 필터 뱅크의 블록도이다. 여기에서 완전 재생을 만족하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족해야만 한다[3][4][5].

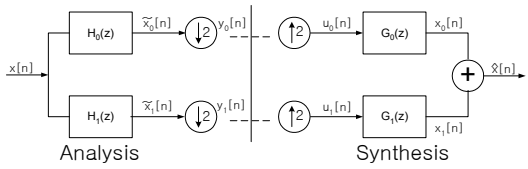

그림 4. 2-채널 필터뱅크
Fig. 4. Filter banks of 2-channel

식(5)는 $H_0(z)$와 $H_1(z)$가 Quadrature Mirror Filters (QMF)조건을 보장하는 식이고, 식(6)은 겹침(Aliasing)을 제거하기 위한 관계식이 되며, 마지막 식은 시간영역 관계식으로 $H_0(z)$의 필터 계수에서 $N/2$은 완전재생을 만족하고 나머지 $N/2$의 필터 계수의 결정은 특정한 적용, 반 간섭을 위한 적용에 사용한다. 이렇게 생성된 계수들은 직교성을 보장한다[4].

합성(synthesis) 필터뱅크에서 두 개의 확산 수열의 교차 상관은 다음과 같다[4].

$$R_{g_0 g_1} = \sum_{n=0}^{N-1} g_0(n) g_1(n) = \sum_{n=0}^{N-1} (-1)^n h(n) h(N-1-n) = 0 \quad (5)$$

교차상관의 특징은 MC-CDMA시스템에서 직교 관계의 반송자로 사용되도록 만들어진다.

Ⅳ. 이산 웨이브렛 멀티 캐리어 CDMA 시스템

MC-CDMA 통신시스템에서 기존에 사용했던 FFT 변

환 대신 이산 웨이브렛 변환을 사용하여 반송파간의 직교성을 보장한 시스템으로 통신 전체의 블록도는 그림 5와 같다.

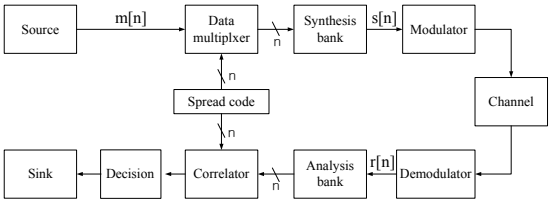

그림 5. 웨이브렛 변환을 사용한 확산 스펙트럼 통신시스템
Fig. 5. Spread spectrum communication system using wavelet transform

신호 확산을 포함한 이 방법의 장점은 코드의 복잡도, 하드웨어의 실행, 코드의 변화와 그리고 다른 영역등을 개선시킨다. 이 시스템은 직교 기저를 생성하기 위해 Daubechies에 의해 구해진 웨이브렛 계수를 사용한다. 일반적으로 기저 함수들은 파형에서 원하는 특성을 공급하여야 한다. 그래서 CDMA환경에서는 교란에 강인하고, 다중사용자 간섭에 강인한 파형의 특성을 공급하여야 한다[1].

그림 6은 이산 웨이브렛 MC-CDMA시스템의 블록도로 송신기에서, k번째 데이터 부호는 부 채널로 복사되고 확산신호와 곱하여진다. 부 채널의 신호는 직교 완전 재생 필터 뱅크의 합성 필터 뱅크를 통과한 후 전송에 앞서 주 반송파를 변조한다. 이 과정은 역 이산 웨이브렛으로 구현된다. 수신기에서는 웨이브렛 변환에 의하여 멀티 캐리어 복조를 한다. 복조기의 출력 신호 열은 확산 코드를 곱한 후 판정을 위하여 결합된다.

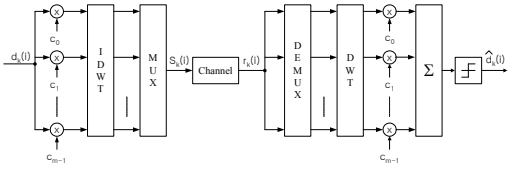

그림 6. 이산 웨이브렛 MC-CDMA 시스템
Fig. 6. MC-CDMA system using discrete wavelet transform

V. 모의실험 및 결과

백색 가우시안 잡음 채널 환경에서 비트 오류율을 기반으로 한 제안된 구조의 주파수 대역 효율과 최적 확산 코드의 성능을 분석하기 위해 Monte Carlo 실험을 수행하였다. 여기서는 다중사용자 간섭 및 다중경로 문제는 고려하지 않았다. 그리고 송·수신간은 동기되었다고 가정한다. 웨이브렛 변환에 사용된 필터는 8-tap의 Daubechies 필터이다.

그림 7은 정현파 교란(jammer)이 존재하지 않고, 백색 가우시안 잡음만이 존재하는 채널에서의 비트 오류율 실험결과이다.

그림에서는 기존의 단일 반송파 CDMA(Single Carrier-CDMA:SC-CDMA) FFT를 사용한 MC-CDMA와 이산 웨이브렛 변환을 사용한 DWT MC-CDMA의 신호 대 잡음비에 따른 성능을 보여준다. 확산 코드는 길이 31의 PN코드를 사용하였다.

SC-CDMA에서의 확산은 데이터의 16배로 부호 당 16비트가 필요하고 FFT는 4개의 부대역에 데이터의 4배로 확산되어 결과적으로 부호 당 16비트가 된다. DWT MC-CDMA에서는 4개의 부대역에서 8배로 확산되어 부호 당 14비트가 된다. 따라서 비슷한 대역폭에서 DWT MC-CDMA의 성능이 더 우수하다는 것을 알 수 있다.

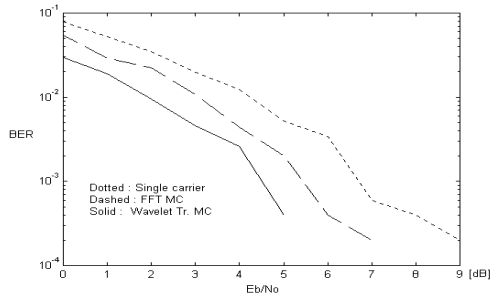

그림 7. 교란이 없는 AWGN 채널에서의 DWT MC-CDMA의 비트 오류율 성능
Fig. 7. The bit error rate performance of DWT MC-CDMA without no interference

그림 8과 그림 9는 백색 가우시안 잡음이 존재하는 채널에 정현파 교란의 진폭이 3, 7로 존재할 때의 비트 오율 성능을 나타낸다. 마찬가지로 확산 코드는 길이 31의 PN코드를 사용하였다. 정현파 교란이 존재하더라도 부반송파간의 스펙트럼 확산이 없어 채널간 간섭 문제를 해결할 수 있어 DWT MC-CDMA가 가장 우수한 성능을 나타내었다.

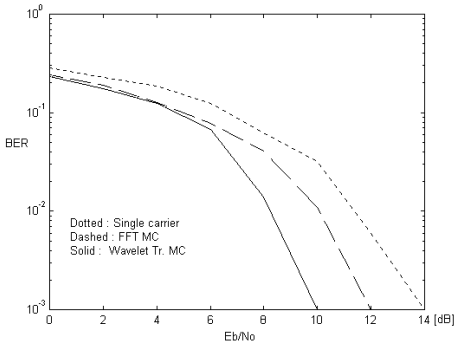

그림 8. 진폭 3의 교란이 존재할 때의 DWT MC-CDMA의 성능
Fig. 8. DWT MC-CDMA performance existing with amplitude-3 interference

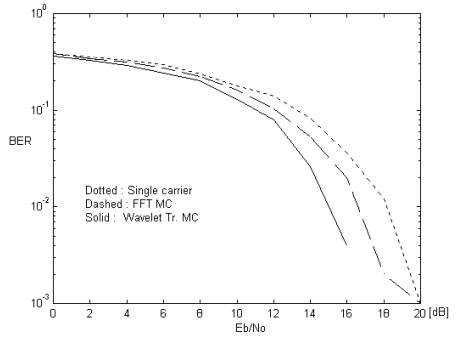

그림 9. 진폭 7의 교란이 존재할 때의 DWT MC-CDMA의 성능
Fig. 9. DWT MC-CDMA performance existing amplitude-7 interference

그림 10은 DWT MC-CDMA의 최적 확산 코드의 실험으로 PN 코드, Gold 코드, Walsh 코드에 따른 교란이 존재하는 백색 잡음 채널에서 비트 오류율 성능을 나타낸 것이다. PN코드와 Gold 코드의 길이는 31이고 Walsh 코드의 길이는 32이다. FFT를 사용한 MC-CDMA에서는 Walsh 코드가 가장 우수한 성능을 보였으나, 이 실험에서는 신호 대 잡음비가 작은 영역에서는 Walsh 코드가 우수하며 신호 대 잡음비가 큰 부분에서는 Gold 코드가 더 우수하다는 것을 알 수 있다. Gold 코드는 PN 코드보다 좋은 주기적 상호 상관 특성을 갖기 때문에 실제의 CDMA에서 사용되는 이유이며, 또한 Walsh 코드에 비해 비슷한 길이에서 생성되는 직교 코드의 종류가 다양하므로 우수하게 나오는 것은 당연한 결과이다. 그러나 코드 생성의 복잡도 면에서 Walsh 코드가 가장 간단하게 생성되므로 신호대잡음비가 작은 채널에서는 유용하게 사용될 수 있다.

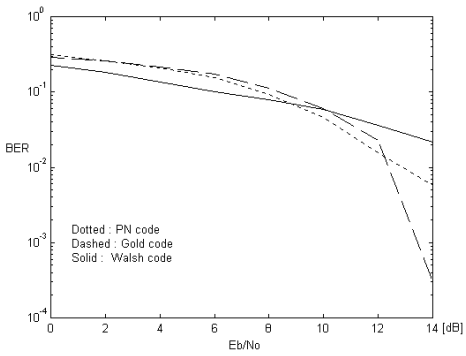

그림 10. 코드에 따른 DWT MC-CDMA의 비트 오류율 성능
Fig. 10. Bit error rate performance of DWT MC-CDMA with codes

Ⅵ. 결 론

본 논문에서는 2채널 웨이브렛 필터 뱅크를 사용한 이산 웨이브렛 MC-CDMA 시스템을 제안하였고, 이 시스템의 주파수 대역 효율과 최적의 확산 코드를 비트 오류율로 성능을 분석하였다. 직교 2-대역 완전재생 필터를 사용하면 여러 데이터 펄스들이 시간적으로 중첩되며, 그 결과 부 채널의 스펙트럼을 제한하여 대역폭 효율이 높아진다. 또한 보다 적은 확산을 통해 대역폭 효율을 증가 시킬 수 있다. 최적의 직교신호 집합 실험에서 신호대 잡음비가 작은 환경에서 Walsh 코드의 사용이 가능하며 신호 대 잡음비가 약 12dB 이상이면 Gold 코드의 성능이 급격히 좋아지는 것을 볼 수 있다.

따라서 잡음에 민감한 채널에서는 Walsh 코드가 최적의 코드가 된다. 보다 나은 직교 성질을 보장하기 위해서는 M-밴드를 사용한 웨이브렛 실행과 천이 영역에서 응답이 보다 우수한 필터의 설계가 요구되어진다. 또한 웨이브렛 변환과정에서 나타나는 계산량의 증가와 시스템의 복잡도를 제거하기 위한 다위상(polyphase)방식의 웨이브렛 변환이 요구된다.

References

[1] Jongbok Lee, "Effects Analysis of DRAM for Digital Signal Processor Performance" Vol. 18 No. 3, pp. 177 -183, June 2018.
DOI: https://doi.org/10.7236/JIIBC.2018.18.3.177

[2] Laurence B. Milstein, "Waveform and Receiver Design Considerations on Wideband CDMA," IEEE Personal Comm., pp. 24 - 30, Oct. 1999.

[3] Branislav M. Popovic, "Spreading Sequences for Multicarrier CDMA Systems," IEEE Trans. on Comm., Vol. 47, No 6, pp. 918 - 926, June 1999.

[4] Ali N Akansu, Mehmet V. Tazebay, Michael J.Medley, Pankaj K. Das, "Wavelet and Subband Transforms : Fundamental and Communication Applications," IEEE Communication Magazine, pp. 104 - 115, Dec. 1997.

[5] Kenneth Hetling, Gary Saulnier, and Pankaj Das, "Optimized Filter Design for PR-QMF Based Spread Spectrum Communications," IEEE, pp. 1350 - 1354, 1995.

[6] Kenneth Hetling, Michael Medley, Gary Saulnier, and Pankaj Das, "A PR-QMF(Wavelet) Based Spread Spectrum Communications System," IEEE, pp. 760 - 764, 1994.

[7] Mike Mettke, Michael J. Medley, Gary J. Saulnier and P. Das, "Wavelet Transform Excision Using IIR filters in Spread Spectrum Communication Systems," IEEE, 1994.

[8] Cormac Herley, Martin Vetterli, "Wavelet and Recursive Filter Banks," IEEE Transaction on Signal Processing. Vol. 41, No. 8, Aug. 1993.

[9] I. Daubechies, "Orthonormal basis of compactly supported wavelets," Comm. Pure and Appl. Math, XLI:909 - 996, 1988.

[10] Jeongsu Kim and Monho Lee, "Multi-User X-Channel Interference Alignment in 5 Generation MIMO Mobile Communications", Vol. 17 No. 5, pp. 61 - 69, October 2017.
DOI: https://doi.org/10.7236/JIIBC.2017.17.5.61

[11] Ho-Young Cheong, "A Study on Hamming Codes for Mitigating ISI on the Diffusion-based Molecular Communication Channel," JKAIS, 21-2, Vol.14 No. 1, pp. 1 - 6, Febr. 2021.
DOI: https://doi.org/10.17661/jkiiect.2021.14.1.1

저 자 소 개

지 인 호(정회원)

- 1980년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학사
- 1983년 8월 : 서울대학교 전자공학과 공학석사
- 1995년 6월 : Polytechnic School of Engineering at New York University, USA, 전기 및 컴퓨터공학과, 공학박사
- 1982년 ~ 1988년 : 국방과학연구소 선임연구원
- 2004년 ~ 2005년 : University of Maryland at College Park, USA, 연구교수
- 2012년 ~ 2013년 : Temple University at Philadelphia, USA, 연구교수
- 1995년 ~ 현재 : 홍익대학교 소프트웨어융합학과 교수
- 주관심분야 : DSP and 3D Image Processing, Multimedia Security, Multimedia Signal Processing

※ 본 논문은 2019년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.