

주파수 영역 등화기를 사용하는 단일 반송파 전송 시스템을 위한 저 전력 전송 기법

Low Power Transmission Technique for Single-Carrier Modulation with Frequency Domain Equalization

정 혁 구[†]
(Hyeok Koo Jung)

Abstract - This paper proposes a low power transmission technique for single-carrier modulation with frequency domain equalization. As time domain signals and frequency domain signals have unique corresponding functions, inserting zeros after each symbol causes a repetition in other domain, so maximal ratio combining technique using repetitive transmission can be applied in the frequency domain. In this paper, we configure transmit signals to insert zeros after each symbols for single-carrier modulation with frequency domain equalization and maximal ratio receive combining block in the receiver structures, propose a structure for transmitter and receiver and show that its performance is better than the traditional algorithm by simulations.

Key Words : ad-hoc, Single carrier, Low power, mrc, FDE

1. 서 론

오에프디엠은 단일 송수신 안테나 환경인 IEEE802.11a 및 다중 송수신 안테나 환경인 IEEE802.11n[1]를 비롯한 다중 경로 채널인 실내 무선 랜 환경의 경우에 효과적인 변조 방식으로 알려져 있으며, 이러한 오에프디엠에 선택적 결합과 또한 최대 윌 수신 결합[2]을 하이브리드하게 결합한 기술은 단일 송신 안테나 시스템에서 우수한 전력효율을 얻을 수 있는 알고리즘으로 제시되어 왔다. 이러한 오에프디엠 환경에서 송신 안테나 개수를 증가시키는 경우에 수신 안테나 개수를 증가시킬 때 얻을 수 있는 최대 윌 수신 결합 이득을 얻고자 하는 기술로서, Alamouti는 시공간 블록코드[3]를 제안하였으며, 이것을 블록의 형태로 처리하는 오에프디엠에 활용하는 연구들이 있었으며, 이것을 Al-Dhahir[4]는 단일 반송파 시스템 중에서 주파수 영역 등화기를 사용하는 SC-FDE(single-carrier modulation with frequency domain equalization) 등에서 활용 연구결과를 제시하였다. 이와 같은 오에프디엠 환경에서의 전력 전송효율 증가 연구는 송신기 안테나의 경우에 교번하는 스위치를 사용하고 수신기에서는 최대 윌 수신 결합 방법을 사용하는 교번 스위칭 공간 또는 주파수 영역 블록 코딩 방법[5-7]이 제안되어 왔다. 이

러한 오에프디엠의 연구 응용을 단일 반송파 전송시스템으로 응용하는 방법을 이 논문에서 제시하고 있으며, 송신기에서는 교번 스위치를 사용하지 않고 수신기에서 최대 윌 결합 방법을 사용하며, 또한 이와 함께 수신기에서 선택적 결합 방법을 사용하기 위하여 수신 안테나만을 하나 더 추가하면 오에프디엠 시스템에서 얻을 수 있는 선택적 / 최대 윌 결합 방법의 이득을 얻을 수 있다.

이 논문은 기존에 연구되었던 오에프디엠 시스템 송신기에서 심볼을 반복 전송하고 수신기에서 수신 결합 알고리즘을 사용하던 알고리즘[2]을 단일 반송파 시스템에서 영('0')을 각 심볼들 후에 삽입함으로써 수신기 주파수 영역에서 최대 윌 결합 방법을 사용할 수 있도록 하며, 그에 따라 수신기에서 얻을 수 있는 이득에 추가적으로 하나의 안테나만을 사용하여 수신 전력이 좋은 상태의 안테나 신호를 사용하는 선택적 결합 방법을 사용한다. 이와 같은 단일 반송파 전송 기술은 저 전력 전송기법으로 활용될 수 있으며 실내 무선 랜 환경의 채널인 HiperLAN/2 채널 A 환경에서 모의 실험하여 그 결과를 제시한다. 모의 실험결과는 종래의 방법인 단일 반송파 시스템과 비교하였으며 그리고 선택적 결합 방법이 있는 경우와 없는 경우를 비교하였으며, 결과는 비트 오류율로서 제시하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 종래의 단일 반송파 시스템에 대하여 설명하고, 3장에서는 제안하는 저 전력 전송을 사용하는 단일 반송파 시스템에 대하여 기술하고, 4장에서는 모의 실험결과와 고찰 그리고 5장에서는 결론을 제시하였다.

[†] Corresponding Author : Dept. of Information and Communication Engineering, Hanbat National University, Korea

E-mail : junghk@hanbat.ac.kr

접수일자 : 2017년 9월 5일

최종완료 : 2017년 10월 20일

2. 주파수 영역 등화기를 사용하는 단일 반송파 전송 시스템

그림 1은 주파수 영역 등화기를 사용하는 단일 반송파 시스템의 송신기와 수신기 블록도를 보인다. 송신기의 구조는 사용자 데이터는 입력 비트(Input Bits) 블록으로 표현하였으며, 그 이진 데이터들은 변조 레벨별로 심볼로 맵핑되고 수신기에서 에프에프티(FFT : Fast Fourier Transform) 이후에 사용되는 사이클릭 프리픽스(Cyclic Prefix)를 추가한 후 알에프(RF) 신호로 만든 후 안테나를 통하여 전송된다.

만일 전송하고자 하는 데이터 블록을 \mathbf{x} 라 하고, \mathbf{x} 의 심볼 개수를 N 이라 하면,

$$\mathbf{x} = [x(1) x(2) x(3) \cdots x(N)] \quad (1)$$

수신기의 채널추정블록에서 에프에프티하는 경우에 사용하기 위하여 사이클릭 프리픽스를 삽입하면 전체 데이터 \mathbf{x} 의 개수 N 의 1/4에 해당하는 뒷부분의 데이터를 앞부분에 복사하게 된다.

$$\mathbf{x}_1 = [CP(1) \cdots CP(N/4) x(1) x(2) \cdots x(N)] \quad (2)$$

여기에서,

$$CP(1) = x(3N/4 + 1), \dots, CP(N/4) = x(N)$$

수신기에서는 알에프 블록에서 신호를 기저대역으로 변환한 후 에프에프티하여 주파수 영역으로 변환한 후 채널 추정 블록에서 추정된 채널의 주파수 응답을 이용하여 채널 보상을 한 후 역에프에프티(Inverse FFT) 하여 시간 영역 신호를 만든 후 데이터를 결정하게 된다. 이와 같은 단일 반송파 시스템은 종래의 시스템과 비교할 때 주파수 영역에서 채널 보상하는 블록을 수행한 것으로써 시간 영역 등화기를 사용하는 종래의 방식보다 채널 보상하는 블록이 간단하여 많이 사용되고 있다.

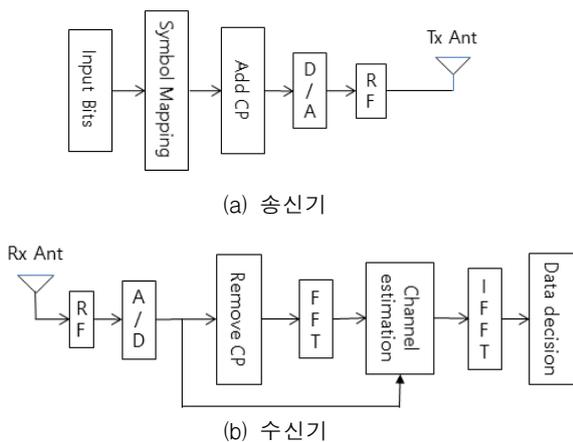


그림 1 주파수 영역 등화기를 사용하는 단일 반송파 송수신기 블록도

Fig. 1 Block diagram of transmitter and receiver in single-carrier system with frequency domain equalization

3. 제안하는 저 전력 전송 기법

그림 2는 제안하는 저 전력 전송기법의 단일 반송파 시스템의 송신기와 수신기 블록도를 보인다. 주파수 영역 등화기를 사용하는 것은 종래의 방법과 같으며, 송신기의 구조는 전송할 예정인 각 데이터 심볼마다 그 데이터 심볼 뒤에 영('0')을 삽입하는 방법을 사용한다. 이와 같은 영 삽입 방법을 사용하게 되면 데이터의 전송율이 절반으로 줄어들게 되지만, 수신기에서는 주파수 영역에서 볼 때 두 번 반복된 신호를 전송받는 것이 되며, 이렇게 수신되고 변환된 신호는 최대 유효 결합 방법을 사용함으로써 반복 회수가 증가할수록 그에 따른 이득을 얻을 수 있게 되고 데이터 전송율이 줄어드는 손실을 극복할 수 있게 된다.

사용자 데이터는 입력 비트(Input Bits) 블록으로 표현하였으며, 그 이진 데이터들은 변조 레벨별로 심볼로 맵핑되어, 만일 전송하고자 하는 임의의 l 번째 데이터 블록을 \mathbf{x} 라 하고, \mathbf{x} 의 심볼 개수를 N 이라 하면, 각 요소는 l 번째 데이터 블록의 k 번째 데이터 심볼 $x(k)$ 에 전송되는 M -ary 데이터 심볼을 의미한다.

$$\mathbf{x} = [x(1) x(2) x(3) \cdots x(N)] \quad (3)$$

영 삽입부에서 각 데이터 심볼마다 그 뒤에 영을 삽입하게 되면 다음과 같이 총 $2N$ 개의 데이터가 된다.

$$\mathbf{x}_1 = [x(1) 0 x(2) 0 x(3) \cdots x(N) 0] \quad (4)$$

수신부 채널 보상하는 부분에서 에프에프티하는 경우에 사용하기 위하여 사이클릭 프리픽스를 삽입하면 전체 데이터 \mathbf{x}_1 의 개수 $2N$ 의 1/4에 해당하는 뒷부분의 데이터를 앞부분에 복사하게 된다.

$$\mathbf{x}_2 = [CP(1) \cdots CP(N/2) x(1) 0 x(2) 0 \cdots 0 x(N) 0] \quad (5)$$

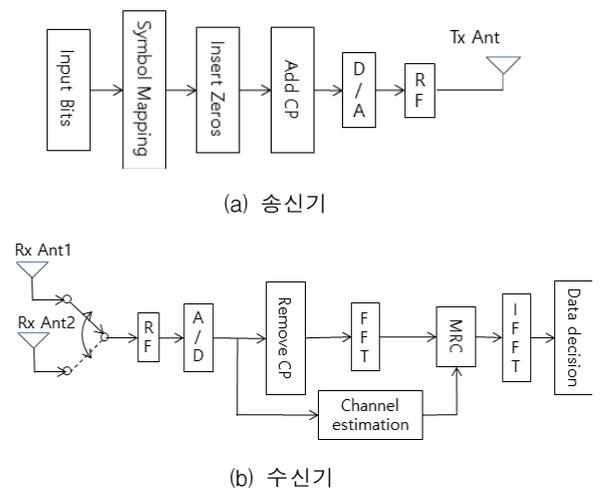


그림 2 저 전력 전송 기법의 블록도

Fig. 2 Block diagram of low power transmission and reception technique

여기에서,

$$CP(1) = x(3N/4+1), \dots, CP(N/2-1) = x(N), \\ CP(N/2) = 0$$

이와 같이 구성된 \mathbf{x}_2 는 디지털 아날로그 컨버터(D/A)를 거쳐 알에프 신호로 만들어진 후 안테나를 통하여 전송되게 된다.

이 \mathbf{x}_2 가 채널을 통과하게 되면, 총 $2.5N$ 개의 데이터가 출력되는데, 각 데이터 블록은 시간영역에서 채널을 통과하게 되는데, 채널을 통과한 신호중에서 $0.5N$ 개의 사이클릭 프레픽스 구간을 지나간 데이터 $2N$ 개는 사이클릭 프레픽스를 거쳤으므로 선형 컨벌루션이 아닌 순환 컨벌루션을 의미하고 따라서 그 $2N$ 개의 데이터를 에프에프티한 주파수 영역 신호를 채널의 주파수 응답으로 나눠주면 주파수 영역 데이터 블록을 추정할 수 있게 된다. 이 $2N$ 개의 신호를 \mathbf{a} 라 하고 \mathbf{a} 의 각 요소는 $a(l,k)$ 으로 표현한다. 여기에서 l 은 데이터 블록의 인덱스이며, k 는 데이터 블록내의 데이터 심볼의 인덱스이다.

수신기에서는 수신안테나가 두 개 준비되어 있는데, 두 개의 안테나는 동시에 사용되는 것이 아니라 전력이 보다 강한 신호가 들어오는 안테나만을 사용하게 하여 좀 더 페이딩을 겪지 않은 신호를 선택하여 사용하게 된다. 실험시 안테나를 선택하는 방법은 각 데이터 심볼 블록 \mathbf{x}_2 마다 두 블록의 신호전력이 어느 안테나로부터 들어오는 전력이 강한지를 선택하여 그 신호를 사용하는 선택적 결합 방법을 사용한다.

H_l^j 는 송신 안테나와 j 번째 수신 안테나와의 사이의 채널 주파수 응답으로서 $N \times N$ 행렬인 $diag\{H_{l,1}^j, H_{l,2}^j, \dots, H_{l,N}^j\}$ [8, 9]로 표현된다. 여기에서 사이클릭 프레픽스구간은 채널의 최대 지연확산보다 길고, 동기는 이상적이라고 가정한다. l 번째 데이터 블록 주기 동안 j 번째 수신기에서 수신된 시간 영역 신호가 에프에프티(FFT) 블록을 통과한 주파수 영역 데이터 블록 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{Y}_l^j = \mathbf{H}_l^j \mathbf{A}_l + \mathbf{N}_l^j \quad (6)$$

여기에서 제안하는 방법의 채널 보상은 주파수 영역에서 수행하게 되는데, 알에프블록에서 기저대역 신호로 변환된 신호를 에프에프티하여 주파수 영역 신호로 변환한 후 이 변환된 신호를 채널 추정값인 주파수 응답으로 나누어 주면 주파수 영역에서의 채널 보상이 이루어진다. 이와 같은 채널 보상은 시간 영역에서 다수 개의 탭으로 이루어진 등화기를 사용하여 채널 보상이 복잡하게 이루어지던 것을 주파수 영역에서는 나누기라는 간단한 산술연산으로 수행된 것을 말한다.

이렇게 구성된 주파수 영역 신호는 시간영역에서 각 심볼 뒤에 삽입된 0의 개수만큼 주파수 영역에서는 반복된 신호를 의미함으로 최대 윌 결합 방법을 사용할 수 있게 된다. 즉, \mathbf{A}_l 은 $2N$ 개중의 앞의 절반과 뒤의 절반이 각 요소들의 데이터 값이 같으므로 하나의 데이터 블록내에서 두 번 수신이 된 수신다이버시티와 같은 결과를 갖는다.

즉,

$$A_l(1) = A_l(N), A_l(2) = A_l(N+1), \dots \\ A_l(N) = A_l(2N)$$

인 것을 이용하여 최대 윌 결합 방법을 사용하면, k 가 1에서 N 까지의 정수일 때,

$$Y_l^j(k) = H_l^j(k)A_l^j(k) + N_l^j(k) \quad (7) \\ Y_l^j(N/2+k) = H_l^j(N/2+k)A_l^j(N/2+k) \\ + N_l^j(N/2+k)$$

여기에서 $A_l^j(k) = A_l^j(N/2+k)$ 이므로, 또한 \mathbf{A}_l 은 잡음이 섞인 \mathbf{x} 데이터 블록의 주파수 영역 신호이므로

$$\hat{\mathbf{X}}_l^j(k) \cong \frac{H_l^j(k)^* Y_l^j(k) + H_l^j(N/2+k)^* Y_l^j(N/2+k)}{|H_l^j(k)|^2 + |H_l^j(N/2+k)|^2} \quad (8)$$

이와 같은 방법으로 추정된 \mathbf{X}_l^j 은 수신안테나가 j 일 때의 수신 다이버시티를 적용한 결과가 되며, 블록도에 있는 것처럼 수신 안테나가 두 개인 경우 두 개중에 수신 전력 세기가 큰 것을 선택하여 선택적 결합 방법을 사용하게 되면 2에서 3dB 정도의 추가 이득이 있게 된다. 따라서 제안하는 알고리즘의 이득은 수신 안테나가 두 개인 경우의 이득에 선택적 결합 알고리즘이 합해진 이득을 얻을 수 있게 된다.

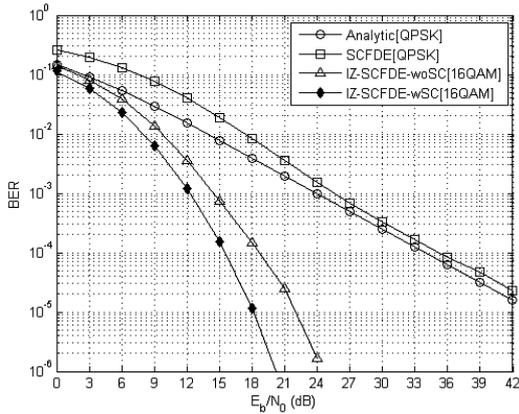
이와 같이 추정된 주파수 영역 신호 $\hat{\mathbf{X}}_l^j$ 는 역에프에프티(IFFT) 과정을 통하여 시간영역 신호가 되며, 데이터 결정과정을 통하여 원래의 송신데이터 \mathbf{x} 를 추정할 수 있게 된다.

$$\hat{\mathbf{x}} = \text{IFFT}[\hat{\mathbf{X}}_l^j] \quad (9)$$

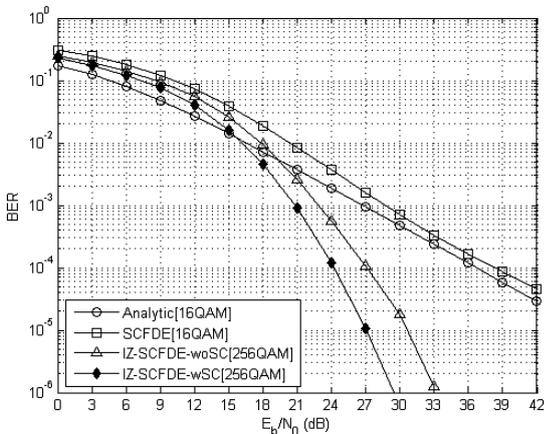
4. 모의 실험

모의실험에 사용한 단일 반송파 시스템의 환경변수는 다음과 같다. 전체 20MHz 대역은 $2N=64$ 개의 데이터 블록들로 나누어진다. 유효 심볼 주기(3.2μs)와 보호 구간(0.8μs)을 포함한 하나의 데이터 심볼 주기는 4μs이다. 송신기에서는 80개의 심볼들(데이터 페이로드는 64, CP는 16 데이터 심볼)마다 그룹으로 묶어서 전송한다. HiperLAN/2 채널 A를 모의 실험 환경으로 사용하였으며 채널 상태 정보는 완벽하게 알고 있다고 가정하고, 도플러 주파수 $f_d=50\text{Hz}$ 로 가정하였다. 그림 3은 제안하는 영을 삽입하는 저 전력 단일 반송파 시스템의 성능을 주파수 영역 등화기를 사용하는 단일 반송파 알고리즘과 비교한 것이다. 그림 3의 (a)-(c)는 모의 실험 환경 변수를 다르게 한 것으로서 (a)는 대역폭효율을 2 bps/Hz로 하고 (b)는 4 bps/Hz, (c)는 6 bps/Hz로 각각 가정한 것이다. 제안하는 저 전력 단일 반송파 알고리즘은 종래의 알고리즘과의 데이터 전송율을 동일하게 하기 위하여 종래의 단일 반송파 알고리즘이 QPSK 이면 16QAM으로, 16QAM 이면 256QAM 으로, 64QAM이면 4096QAM으로 실험하여 동일한 실험환경 결과에서 성능을 비교하였다.

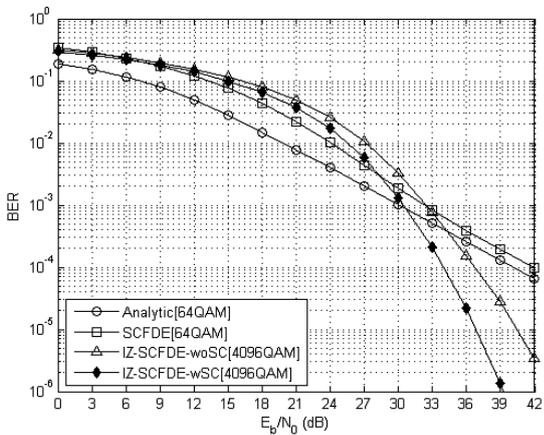
실험결과를 고찰하면, 그림 (a)와 (b)와 같이 대역폭 효율이 4 bps/Hz이하인 경우에는 제안하는 영 삽입 저전력 알고리즘이 우수한 성능을 보이지만, 대역폭 효율이 4 bps/Hz를



(a) 대역폭 효율 2 bps/Hz



(b) 대역폭 효율 4 bps/Hz



(c) 대역폭 효율 6 bps/Hz

그림 3 제안하는 영 삽입 저 전력 단일 반송파 알고리즘 (IZ-SCFDE-wSC)과 종래의 알고리즘의 성능 비교표

Fig. 3 Performance comparison between the proposed insert zeros algorithm of single carrier algorithm with selection combining(IZ-SCFDE-wSC) and the conventional algorithms
 IZ : Insert Zeros,
 SCFDE : Single Carrier Frequency Domain Equalization
 wSC : with Selection Combining,
 woSC : without Selection Combining

초과하는 (c) 6 bps/Hz의 경우에는 E_b/N_0 가 27dB 이상인 경우에만 우수한 성능을 보인다. 따라서 제안하는 알고리즘은 4 bps/Hz이하에서 종래의 알고리즘에 비하여 우수하며, 특히 2 bps/Hz에서는 BER = 10^{-5} 에서 26dB, 그리고 4 bps/Hz에서는 20dB의 성능 이득이 있고, 6 bps/Hz의 경우에는 E_b/N_0 가 27dB 이상인 경우에서 13dB 이득을 보인다. 본 모의 실험에서는 채널 코덱을 사용하지 않는 데이터를 송수신하여 성능을 측정하였다.

5. 결론

이 논문은 영 삽입 알고리즘을 사용하여 주파수 영역 등화기를 사용하는 단일 반송파 시스템에 적용하는 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 알고리즘은 종래의 알고리즘에 비하여 16QAM 이하 변조레벨에서 우수한 성능을 보이고 있으며, 64QAM 인 경우에 제한적인 범위에서만 우수한 성능을 보인다. 제안하는 알고리즘의 활용범위로는 저 전력 단일 송수신 시스템에서 사용하며, ad-hoc 네트워크로도 확장 사용가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았음.

References

- [1] *IEEE P802.11nTM/D3.00, Part 11, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications.*
- [2] W. G. Jeon and H. K. Jung, "Hybrid SC/MRRC Technique for OFDM Systems," *IEICE Trans. Commun.* vol. E89-B, no. 3, pp. 1003-1006, March, 2006.
- [3] S. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [4] N. Al-Dhahir, "Single-Carrier Frequency-Domain Equalization for Space-Time Block-Coded Transmissions Over Frequency-Selective Fading Channels," *IEEE Commun. Letters*, vol. 5, no. 7, pp. 304-306, July. 2001.
- [5] H. K. Jung, "Alternate Time-Switched Space-Time Block Coding Technique for OFDM Systems," *IEICE Trans. Commun.* vol. E95-B, no. 9, pp. 1038-3041, Sept, 2012.
- [6] H. K. Jung, "Alternate Time-Switched Space-Frequency Block Coding Technique for OFDM Systems," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 12, no. 4, pp. 287-289, Dec. 2012.
- [7] H. K. Jung, "Alternate Time-Switched Multiplexed Space-Frequency Block Coding technique for

Single-Carrier System," *Trans. of KIEEP*, vol. 65P, no. 4, pp. 316-320, Dec. 2016.

[8] G. Strang, *Linear algebra and its applications*, 3rd ed., Harcourt Brace & company, 1988.

[9] A. Oppenheim and R. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989.

저 자 소 개



정혁구 (鄭赫九)

1985년 연세대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1987년 연세대학교 공과대학 일반대학원 전기공학과 공학 석사 졸업. 2004년 중앙대학교 공과대학 전자공학과 공학 박사 졸업. 1987년 - 1992년 (주)금성사 정보기기연구소 선임연구원, 1993년 - 2004년 전자부품연구원 수석연구원, 2004년 - 현재 한밭대학교 정보기술대학 정보통신공학과 교수