
시변 채널 하에서의 MC-DS-CDMA 시스템의 성능 분석

최승국*

Performance Evaluation of MC-DS-CDMA Systems over Time Variant Channels

Seung-kuk Choi*

이 논문은 인천대학교 2009년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음

요 약

MC-DS-CDMA 전송 방식에서는 서로 직교성이 있는 여러 개의 부반송파들을 사용함으로써 주파수 다이버시티 효과를 얻을 수 있어 우수한 성능의 전송이 가능하다. 시변 페이딩 채널은 전송되는 MC-DS-CDMA 신호에 인접 부반송파 간섭을 발생시켜 수신단에서 데이터 재생 시 비트 오류율이 증가된다. 본 논문에서는 파일럿 심볼을 이용하여 채널을 추정하는 MC-DS-CDMA 시스템에서 신호가 시변 채널을 통하여 전송될 때의 시스템 성능을 분석한다. 이러한 다중 반송파 전송 방식에서는 채널 추정 에러, 송수신간 반송 주파수 편차 등에 의하여 시스템 성능이 열화된다. 그러므로 위와 같은 영향들을 모두 고려하여 송신 신호가 다중 경로 페이딩 채널을 통하여 전송될 때의 데이터 비트 오류율 성능을 분석한다.

ABSTRACT

MC-DS-CDMA is technique where a single data symbol is transmitted at multiple subcarriers which are orthogonal to each other. With this technique, frequency diversity can be achieved. Time variant channels lead to interchannel interference which increases the bit error rate for MC-DS-CDMA systems. The performance of PSAM MC-DS-CDMA system over time variant channels is analyzed. The BER performance of this system over multipath fading environment is evaluated, considering the channel estimation error, carrier frequency offset.

키워드

MC-DS-CDMA, 시변 채널, 비트 오류율

Key word

MC-DS-CDMA, time variant channel, bit error rate

I. 서론

MC-DS-CDMA(Multi Carrier Direct Sequence Code Division Multiple Access) 접속 방식은 여러 개의 부반송파들을 이용하여 데이터를 전송한다[1,2]. MC-DS-DMA 방식에서는 전송될 데이터를 우선 N 개씩 블록화 한 후에 병렬화 시킨다. 그러므로 MC-DS-CDMA 방식에서는 심볼의 길이가 길어지므로 단말기가 이동할 때 발생하는 도플러(Doppler) 페이딩에 의한 시변(time variant) 채널에 취약하다[3]. 도플러 페이딩은 부반송파 신호들 간에 인접 부반송파 간섭(ICI: inter carrier interference)을 발생시킨다. 또한 MC-DS-CDMA 방식은 여러 개의 부반송파를 사용하므로 송·수신단 간의 반송파 주파수 편차에 역시 민감한 단점이 있다[4]. 이러한 시스템의 성능 열화에 대하여 데이터의 비트 오류율(BER: bit error rate) 성능을 향상시키기 위하여 안테나 다이버시티 기법이 사용되고 있다[5].

송신 심볼이 주파수 선택적 다중경로 채널을 통하여 전송될 때 그 크기 및 위상이 변화되어 정상도상에 변화가 생긴다. 이러한 정상도를 원래의 정확한 모습으로 복원하기 위한 채널 추정방식으로 파일럿 심볼을 이용한 방식(PSAM: pilot symbol assisted modulation)이 고안되어 현재 시스템에 사용되고 있다[6]. 그러나 시변 채널 환경 하의 시스템에서는 ICI로 인하여 데이터의 BER이 증가되는 문제가 있다. 본 논문에서는 PSAM MC-DS-CDMA 신호가 시변 채널을 통하여 전송될 때의 BER 성능을 분석한다. 이때 안테나 다이버시티, 채널 추정 에러 및 반송 주파수 편차의 영향을 모두 고려하여 시스템의 BER 특성을 분석한다.

II. MC-DS-CDMA 전송 시스템

그림 1의 MC-DS-CDMA 시스템 구성도에서와 같이 데이터는 QAM 심볼 $X(k)$ 로 매핑되어 주기 T_s 인 소스 심볼로 변환된 후, 직·병렬 변환기(S/P)를 거쳐 N 개의 부반송파로 각각 변조된다. 소스 심볼들은 N 개씩 블록화 된 후 병렬화 되므로 블록의 길이는 $T = NT_s$ 로 원

래 데이터의 주기보다 N 배 길어진다.

이 병렬화 된 심볼들은 다시 한 블록 당 비트 수가 I_s 인 시간적 직교 코드 $\{c_{i,l}, i=0, \dots, I_s-1\}$ 로 곱해지므로 다시 $1/I_s$ 배로 심볼 시간 길이가 작아진다. 이때 각 사용자에게 할당되는 직교 코드로 Walsh Hadamard 코드가 사용될 수 있다. 그러면 이 최종 심볼은 아래 식 (1)과 같이 표현된다.

$$B_i(k) = \frac{X(k)c_{i,l}}{\sqrt{I_s}}, i=0, \dots, I_s-1; k=0, \dots, N-1 \quad (1)$$

이 심볼들은 다중 반송파 변조되며, 변조된 신호의 복소 포락선이 $t = NT_s$ 때마다 샘플링 된 신호 $x_d(n)$ 은 다음 식 (2)와 같다.

$$x_d(n) = (1/\sqrt{N}) \sum_{k=0}^{N-1} B_i(k) \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right) \quad (2)$$

그러므로 MC-DS-CDMA 변조를 그림 1의 송신기에 서와 같이 소스 심볼을 IFFT하여 실현할 수 있다[2].

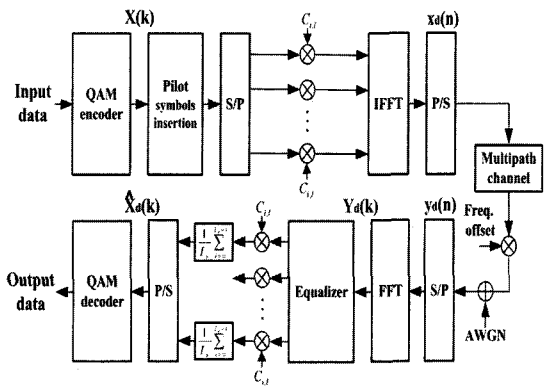


그림 1. MC-DS-CDMA 기저대역 전송 시스템 구성도

Fig. 1 Block diagram of MC-DS-CDMA system

송신기 출력 신호는 전송 도중에 다중 경로에 의해 주파수 선택적 페이딩이 발생된다. 또한 도플러 영향 등으로 인하여 수신 시 주파수 동기 편차 f_0 가 발생된다. 이 주파수 편차 f_0 을 부반송파간의 주파수 간격에 대한 상

대 주파수 편차 $\epsilon = f_0/\Delta f$ 로 표시한다. J 개의 다중 경로로 인한 수신 신호의 이산 복소 포락선 $y_m(n)$ 은 다음과 같다.

$$y_m(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h(n, l) x_e(n-l) \quad (3)$$

위 식에서 $h(n, l)$ 는 이산 시간 n 에서의 l 번째 경로의 채널 임펄스응답이다. 수신 신호의 복소 포락선 $y_q(t)$ 가 $t = nT_s$ 때마다 샘플링 된 이산 복소 포락선 $y_q(n)$ 은 다음과 같다.

$$y_q(n) = y_m(n) + w(n) \quad (4)$$

이 때 $w(n)$ 은 대역 통과된 AWGN 잡음에 의한 복소 변수이다. 그러면 N 개의 $y_q(n)$ 을 FFT하여 k 번째 부반송파의 주파수 성분 $Y_q(k)$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Y_q(k) &= \sum_{n=0}^{N-1} y_q(n) \exp(-j2\pi kn/N) \\ &= \alpha(k) + \beta(k) + W(k) \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서 $\alpha(k)$ 와 $\beta(k)$ 는 다음과 같다[3].

$$\alpha(k) = \sum_{l=0}^{L-1} H_0^l \exp(-j2\pi lk/N) \quad (6)$$

$$\beta(k) = \sum_{m \neq k}^{N-1} \sum_{l=0}^{L-1} X(m) H_{(k-m)}^l \exp(-j2\pi lm/N) \quad (7)$$

위 식에서 $H_{(k-m)}^l$ 은 아래 식과 같이 시변 다중경로 채널 $h(n, l)$ 의 $(m-k)$ 번째 부반송파 주파수 응답(전달 함수)을 표시한다.

$$H_{(k-m)}^l = 1/N \sum_{n=0}^{N-1} h(n, l) \exp(-j2\pi n(k-m)/N) \quad (8)$$

식 (6)에서 H_0^l 은 아래 식과 같이 한 블록 시간 T 동안

의 l 번째 경로 시간 응답 $h(l, n)$ 의 평균 주파수 응답이 된다.

$$H_0^l = 1/N \sum_{n=0}^{N-1} h(n, l) = \overline{h(n, l)} \quad (9)$$

그러므로 식 (5)에서 $\alpha(k)$ 는 k 번째 부반송파에 대한 시간 T 동안의 평균 채널 전달 함수이고 $\beta(k)$ 는 시변 채널에 의한 ICI 성분이며 $W(k)$ 는 $w(n)$ 의 FFT이다. 그러므로 $Y_q(k)$ 는 각 부반송파의 전달 함수 $H(k)$ 로 추정된 채널 전달 함수 $\hat{H}(k)$ 의 역과 곱해져서 등화된다.

$$\hat{X}_q(k) = Y_q(k)/\hat{H}(k) \quad (10)$$

최종적으로 $\hat{X}_q(k)$ 가 소스 심볼 $X_q(k)$ 와 같은 정상도 내에 속하는가의 여부에 따라 데이터 BER이 결정된다. 이 때 송신단에서 크기와 위상이 알려진 파일럿 심볼 $P(k)$ 를 추가로 삽입하여 전송하며, 채널을 통하여 전송되어 온 이 혼련 신호가 FFT되어 재생된 $\hat{P}(k)$ 로부터 채널의 전달 함수를 아래 식 (11)과 같이 추정한다(LS: Least Square 채널 추정 방식).

$$\hat{H}_{LS}(k) = \hat{P}(k)/P(k) \quad (11)$$

또한 MMSE(Minimum Mean-Squared Error) 추정 방식을 이용하면 LS 방식으로 추정된 값으로 부터 AWGN 잡음에 더욱 강건한 채널 추정을 할 수 있다. 이러한 원인들로 열화 되는 BER 성능을 향상시키기 위하여 여러 개의 안테나를 사용하는 STBC(Space Time Block Coding) 안테나 다이버시티 방법이 사용되고 있다[5, 6]. 송신 안테나 수가 2 개인 STBC 방식에서는 두 개의 신호가 두개의 안테나로 동시에 전송되며, 이 신호들은 각각 두개의 독립적인 채널을 거쳐 한 개의 수신 안테나에 도착한다. 먼저 두개의 신호인 $X_{Tx_1}(k)$ 와 $X_{Tx_2}(k)$ 가 k 번째 부반송파를 이용하여 두개의 안테나로 동시에 전송 된다. 첫 번째 시간 t 에서 $X_0(k)$ 와 $X_1(k)$ 가 동시에 각각 IFFT된 후 두 개의 안테나로 각

각 동시에 전송되고, 두 번째 시간 $t + T$ 에는 $-X_1^*(k)$ 와 $X_0^*(k)$ 가 두 개의 안테나로 각각 동시에 전송 된다. 여기서 T 는 한 심볼의 길이를 나타낸다. 첫 번째 안테나로 전송되는 $-X_1^*(k)$ 와 두 번째 안테나로 전송되는 $X_0^*(k)$ 는 첫 번째 시간에서 전송되는 심볼들의 복소 공액 값이다. 그러면 수신 안테나에 도착된 k 번째 부반송파의 주파수 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Y_1(k) &= Y(t) = H_1(k)X_{Tx}(k) + H_2(k)X_{Tx}(k) + W_1(k) \\
 &= H_1(k)X_0(k) + H_2(k)X_1(k) + W_1(k) \\
 Y_2(k) &= Y(t+T) = H_1(k)X_{Tx}(k) + H_2(k)X_{Tx}(k) + W_2(k) \\
 &= -H_1(k)X_1^*(k) + H_2(k)X_0^*(k) + W_2(k)
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

이때 $Y_1(k)$ 와 $Y_2(k)$ 은 각각 첫 번째 시간 t 때와 두 번째 시간 $t + T$ 때 도착된 신호의 주파수 성분이다. STBC 복호기는 아래 식(13, 14)와 같이 수신된 $Y_1(k)$ 과 $Y_2(k)$ 를 두 채널 추정치 $\hat{H}_1(k)$ 및 $\hat{H}_2(k)$ 와 각각 곱한 후 더하여, 원 심볼 $X_0(k)$ 와 $X_1(k)$ 의 추정치 $\hat{X}_0(k)$ 와 $\hat{X}_1(k)$ 를 출력한다.

$$\hat{X}_0 = \hat{H}_1^* Y_1 + \hat{H}_2 Y_2 \tag{13}$$

$$\hat{X}_1 = \hat{H}_2^* Y_1 - \hat{H}_1 Y_2 \tag{14}$$

그러면 $\hat{X}_0(k)$ 와 $\hat{X}_1(k)$ 는 식 (12) - (14)에서와 같이 각 채널 전달 함수 크기의 자승을 더한 크기의 신호 이득을 얻는다. 이때 수신기에서 두 전송 채널에 대한 정확한 추정치가 요구된다.

III. MC-DS-CDMA 시스템의 성능 분석

TTA 휴대 인터넷 표준에서는 FFT의 크기는 $N = 1024$ 이고 채널의 대역폭은 $10MHz$ 로 선정한다. 따라서 부반송파 간격 $\Delta f = 9.766kHz$ 이며 샘플링 주파수는 $10MHz$ 이다[6]. 먼저 한 블록 시간 동안에는 모

든 부반송파들에게 해당 채널에 1, -1, 모양의 파일럿 심볼들을 전송하여 전송 채널을 추정하고, 데이터 심볼이 보내지는 그 다음 블록 동안에는 수신단에서 추정된 채널 전달 함수를 이용하여 FFT된 데이터 심볼들을 등화 시킨다. 이 때 데이터 심볼 블록 시간동안의 채널 특성 및 그 전 파일럿 심볼 시간 때의 채널 특성이 계속 변화되는 시변 채널의 경우를 가정한다. 그림 1에서의 전송 시스템 구성도에서와 같이 입력 데이터는 Gray 코드를 이용하여 16 QAM 심볼로 매핑 된다. 이 심볼들은 병렬화 된 후, MC-DS-CDMA 변조되어 다중 경로 채널을 통하여 전송된다. TTA 휴대 인터넷 표준에서 매크로 셀(macro cell) 크기를 반경 1km로 비교적 작게 규정하고 있다[6]. 그러므로 본 논문에서는 최대 지연 시간이 $2\mu s$ 이고 rms 지연 시간이 $0.4\mu s$ 인 5탭(tap) 전력 지연 프로파일(power delay profile)을 가지는 채널 모델을 선택한다.

한 셀 안에서 접속 가능한 최대 사용자 수를 32명으로 하기 위해 확산 코드의 길이 $L_s = 32$ 로 정한다. 그림 1의 시스템 구성도를 따라 각 입출력 신호를 나타낸 식 (1) - (14)들을 이용하여 컴퓨터 모의실험으로 BER 성능을 구한다.

TTA 휴대 인터넷 표준에 의하면 반송파 주파수가 $2.3GHz$ 이다. 단말기의 최대 이동 속도를 $60km/h$ 로 고려하면, 도플러 페이딩 시변 채널의 최대 도플러 주파수 f_m 은 $128Hz$ 이다. MC-DS-CDMA의 하향 링크의 성능을 개선하기 위하여 두 개의 송신 안테나와 하나의 수신 안테나로 구성된 STBC를 적용한다. STBC 부호화는 그림 1의 MC-DS-CDMA 시스템 구성도에서 S/P된 심볼을 시간 도메인 상으로 확산시킨 후 적용된다.

먼저 도플러 페이딩이 없는 시 불변 채널에서 사용자 수가 8명 및 32명일 때, $\bar{\gamma}_b$ 및 반송파 주파수 편차 ϵ 의 크기에 따른 BER 성능이 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 방법으로 그림 2에 구해졌다. $\bar{\gamma}_b = \Omega E_b / N_0$ 인데, E_b 는 한 데이터 비트 당 신호의 평균 에너지이고 N_0 는 AWGN의 전력 스펙트럼 밀도이며 Ω 는 전송 채널의 평균 페이딩 전력이다. 이 때 perfect는 정확 채널 추정 경우이다. 컴퓨터 시뮬레이션에서 정확한 채널 값은 생성되는 채널의 임펄스 응답 $h(j)$ 를 Fourier 변환하여 얻을 수 있다. 또한 ideal BER 곡선은 주파수 편차 $\epsilon = 0.0$ 및 정확 채널 추정 경우인 이상적 시스템의 BER 성능 곡선이다.

그림 2(a)와 (b)에서 사용자 수 8 및 32명으로 증가함에 따라, 각 사용자에게 할당되는 송신 전력이 대략 $10\log 8 = 9\text{dB}$, $10\log 32 = 15\text{dB}$ 감소되므로 같은 크기의 BER 성능을 얻기 위하여 $\bar{\gamma}_b$ 가 그만큼 더 소요된다. 또한 MMSE 방식 보다 채널 추정 에러가 더 큰 LS 채널 추정 방식을 이용 시, 여러 사용자 간의 간섭으로 인한 채널 추정 에러의 증가로, 사용자 수의 증가에 따라 더욱 큰 BER 성능 열화가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 사용자 수가 증가하는 경우에도 반송 주파수 편차 ϵ 의 크기가 0.02 이하일 때 주파수 편차에 따른 BER 성능 열화가 거의 없는 것을 알 수 있다.

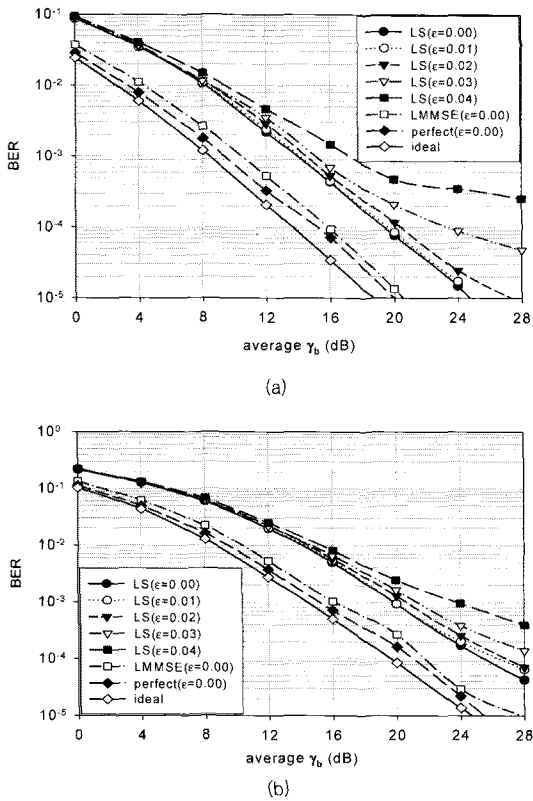


그림 2. 시 불변 채널 하의 STBC PSAM MC-DS-CDMA 시스템의 BER 성능 ((a)사용자수=8 (b)사용자 수=32).

Fig. 2 BER performance by STBC PSAM MC-DS-CDMA systems over time invariant channels

그림 3은 도플러 페이딩이 있는 시변 채널에서 사용자가 8명인 경우의 BER 성능을 도시하였다. 그림 3(a)는 최대 도플러 주파수가 40Hz, (b)는 130Hz인 경우이다. 시변 채널에 의하여 부반송파 간에 ICI가 발생된다. 그러므로 단말기의 이동 속도가 증가하면 할수록 시 불변 채널의 경우인 그림 2(a) 보다 더욱 BER 성능이 열화 된다. 최대 도플러 주파수가 130Hz 경우에는 40Hz인 경우 보다 더욱 BER 성능이 열화 되며, $\bar{\gamma}_b$ 가 16dB 보다 큰 경우에 BER이 10^{-3} 인 error floor가 발생된다.

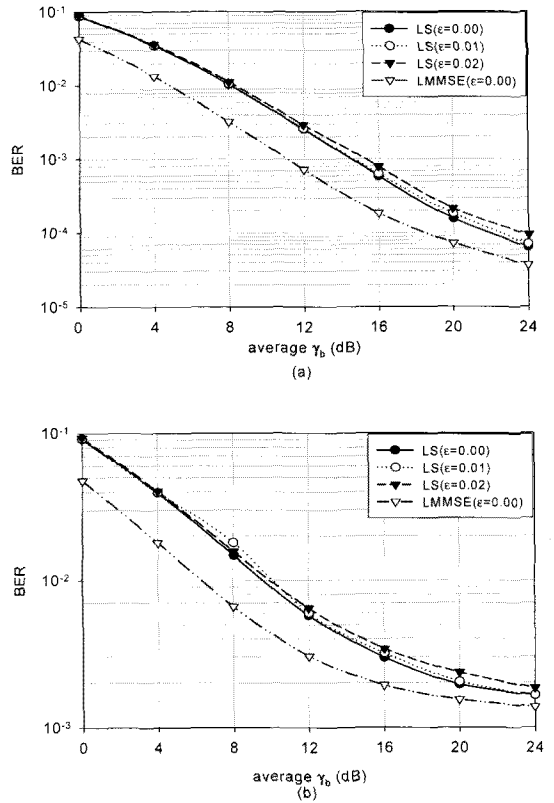


그림 3 사용자수=8 STBC PSAM MC-DS-CDMA 시스템의 BER 성능((a) $f_m=40\text{Hz}$, (b) $f_m=130\text{Hz}$)

Fig. 3 BER performance by STBC PSAM MC-DS-CDMA systems

IV. 결 론

도플러 페이딩 시변 채널 하에서의 STBC PSAM MC-DS-CDMA 시스템의 BER 성능을 분석하였다. 이 때 채널 추정 에러, 반송파 주파수 편차, 사용자수의 영향을 모두 고려하여 그 특성을 분석하였다. 이러한 방식의 성능을 평가하기 위해서 우선 데이터가 MC-DS-CDMA 변조, 주파수 선택적 Rayleigh 시변 페이딩 채널, 주파수 편차가 존재하는 클럭으로 복조, 채널 추정, 등화, STBC 복호되는 모든 과정에 대하여 각 시스템 블록마다 그 입-출력 신호 변환 과정을 수식으로 표현 하였다. 이 수식들과 MATLAB을 이용하여 컴퓨터 모의실험에 의하여 시스템의 BER 성능을 분석하였다.

분석 결과, 단말기의 이동 속도가 증가하면 할수록 BER 성능이 더 열화되며, 반송 주파수 편차 ϵ 의 크기가 0.02 이하일 때 주파수 편차에 따른 BER 성능 열화가 거의 없는 것을 알 수 있었다. 최대 도플러 주파수가 130Hz 인 시변 채널의 경우에는 더욱 큰 성능열화가 발생되며, $\bar{\gamma}_b$ 가 16dB 보다 큰 경우에 BER이 10⁻³인 error floor가 발생되는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] T. Eng and L.B. Milstein, "Coherent DS-SS Performance in Nakagami Multipath fading", IEEE Trans. Commun., vol. 43, no. 2/3/4, pp. 1134-1143, 1995.

[2] H. Steendam and M. Moeneclaey, "The Effect of Carrier Frequency Offset on Downlink and Uplink MC-DS-SS", IEEE Select Areas Commun., vol. 19, no. 12, pp. 2528-2536, Dec. 2001.

[3] M. Russell and G.L. Stueber, "Interchannel Interference Analysis of OFDM in a Mobile Environment," Proc. IEEE VTC'95, Chicago, IL, pp.820-824, July 1995.

[4] P. H. Moose, "A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction", IEEE Trans. Commun., vol. 42, no.10, pp. 2908-2914, Oct. 1994.

[5] T. H. Liew and L. Hanzo, "Space-Time Codes and Concatenated Channel Codes for Wireless Communications", Proc. IEEE., vol. 90, no. 2, pp.187-219, Feb. 2002.

[6] 홍대형, 강충구, 조용수, "휴대인터넷 표준화 현황", 한국통신학회지, pp. 23-37. Feb. 2004.

저자소개



최승국(Seung-Kuk Choi)

1988년 : 독일 Braunschweig 대학교
전자공학과 공학박사
1978년~1981년 : 한국전자통신
연구소 연구원

1989년~현재 : 인천대학교 정보통신공학과 교수
※ 관심분야 : 이동 통신 시스템, 동기