

오버랩 기반 DM-BPSK CSS 시스템에서 오버랩 횟수에 따른 심볼 간 간섭 분석

준회원 김 준 환*, 정회원 이 영 포*, 종신회원 송 익 호**, 윤 석 호*

Analysis of Intersymbol Interference due to Overlap in Overlap-Based DM-BPSK CSS Systems

Junhwan Kim* Associate Member, Youngpo Lee* Regular Member,
Iickho Song**, Seokho Yoon*° Lifelong Members

요 약

처프 확산 대역 (chirp spread spectrum: CSS) 기술은 데이터 신호를 처프 신호를 통하여 최소 필요 대역보다 더 넓은 주파수 대역으로 확산시켜 전송하는 기술로서 오버랩 기법을 사용하여 데이터 전송률을 늘릴 수 있다. 그러나 데이터의 신뢰성 있는 전송을 위해서는 오버랩으로 인해 발생하는 심볼 간 간섭에 (intersymbol interference: ISI) 대한 분석이 필수적이다. 본 논문에서는 오버랩 기반 direct modulation binary phase shift keying CSS 시스템에서 오버랩 횟수와 ISI의 상관관계를 수학적으로 분석하였다. 구체적으로는 몇몇 특정 오버랩 횟수에 대해서는 오버랩으로 인한 ISI가 나타나지 않으며, 오버랩 횟수의 변화에 따라 오버랩으로 인한 ISI가 진동하거나 단조 증가함을 보였고, 모의실험 결과와 분석한 내용이 일치하는 것을 확인하였다.

Key Words : Chirp Spread Spectrum, Overlap, Intersymbol Interference, Bit Error Rate

ABSTRACT

The chirp spread spectrum (CSS) technique spreads the data signal over a frequency bandwidth wider than minimum required bandwidth. By using time overlapping, the bit rate in CSS can be increased. However, for reliable transmission of data signal, the intersymbol interference (ISI) due to overlap should be analyzed. In this paper, the relation between the degree of overlap and ISI is analyzed in direct modulation binary phase shift keying CSS systems. In some cases, the overlap does not incur ISI at all and the ISI fluctuates or monotonically increases as the number of overlaps changes. It is also shown that the simulation results closely agree with the analytic results.

I. 서 론

처프 확산 대역 (chirp spread spectrum: CSS) 기술은 데이터 신호를 처프 신호를 통해 최소 필요 대역보다 더 넓은 주파수 대역으로 확산시켜 전송하는 기술

로써 본래에는 군용 레이더 시스템이 지닌 측정 가능 영역과 정확도의 한계를 극복하기 위해 개발되어 사용되었다. 하지만 최근 들어서 CSS 시스템이 지닌 높은 처리 이득과 시간 분해능, 저전력 소모, 간섭 및 다중경로에 대한 강인성 등의 다양한 장점으로 인해 무

* 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2010-0014610, No. 2010-0015786)와 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업(NIPA-2010-C1090-1011-0005)의 연구 결과로 수행되었음.

* 성균관대학교 정보통신공학부 (syoon@skku.edu), (° : 교신저자)

** 한국과학기술원 전기및전자공학과

논문번호 : KICS2010-11-524, 접수일자 : 2010년 11월 2일, 최종논문접수일자 : 2010년 12월 21일

선 통신 분야에서 크게 주목 받고 있다^[1]. 실제로 CSS 시스템은 지난 2007년 3월 저속 무선 사설망용 (low-rate wireless personal area networks: WPAN) 위한 표준인 IEEE 802.15.4a의 물리계층 표준 기술 중 하나로 채택되었다^[2].

CSS 기술은 변조 과정에서 처프 신호를 어떻게 이용하는가에 따라 binary orthogonal keying (BOK) 방식과 direct modulation (DM) 방식의 두 가지로 분류할 수 있다^[3]. BOK 방식은 처프 신호를 사용하여 데이터를 표현하는 방식으로 비트 “0”과 “1”을 전송하기 위하여, 각각 양과 음의 순간주파수 변화율을 가지는 처프 신호를 전송하는 방식이다. 반면에 DM 방식은 처프 신호를 확산 기능을 담당하는 부호로만 사용하고, 처프 신호에 phase shift keying (PSK), quadrature amplitude modulation (QAM) 등 데이터 변조된 신호를 곱하여 전송한다.

CSS 시스템에서는 데이터 전송률을 증가시키기 위한 방법 중 하나로 오버랩 기법을 사용한다. 오버랩 기법이란 한 처프 신호의 심볼 구간보다 짧은 시간 내에 다수의 처프 신호를 중첩하여 전송하는 기술이다. 같은 구간 내의 오버랩 횟수가 증가함에 따라 데이터 전송률은 증가하지만, 오버랩으로 인한 심볼 간 간섭을 (intersymbol interference: ISI) 유발하여 결과적으로 비트 오류율 (bit error rate: BER) 성능 저하를 초래하게 된다^[4]. 따라서, 실제 CSS 시스템에서 높은 전송률과 높은 전송 신뢰성을 동시에 보장하는 적합한 오버랩 기법 적용을 위해서는, 오버랩 횟수의 변화와 오버랩으로 인해 발생하는 ISI의 상관관계에 대한 분석이 필수적이다.

이를 위한 그동안의 연구로써 오버랩에 따른 ISI는 관심 심볼의 양 옆에 인접한 두 심볼에 의해서만 발생한다는 가정 하에, binary PSK를 (BPSK) 이용한 DM-BPSK CSS 시스템에서 오버랩으로 인한 ISI의 경향을 분석한 논문이 발표되었다^[5]. 그러나 이 연구에서는 오버랩 횟수와 ISI의 변화량에 대한 명확한 상관관계를 제시하지 않은 채, 단순히 더 많은 오버랩 횟수가 항상 더 많은 ISI를 유발하는 것은 아니라는 사실만 언급하였다. 그 후 발표된 연구에서는 오버랩 기반 DM-BPSK CSS 시스템에서의 닫힌꼴 BER 성능을 근사화하여 유도하였으나 오버랩 횟수와 ISI의 관계를 명확한 수학적 식으로 나타내지는 못하였다^[6].

따라서 본 논문에서는 오버랩 기반 DM-BPSK CSS 시스템에서 오버랩으로 인한 ISI의 명확한 수학적 식을 유도하고, 오버랩 횟수와 오버랩에 의해 발생하는 ISI와의 상관관계를 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 기본적인 오버랩 기반 DM-BPSK CSS 시스템 모델을 설명하고, 오버랩으로 인해 발생하는 ISI를 수학적으로 유도하였다. III장에서는 유도된 ISI 수학적 식을 분석하여 오버랩 기반 DM-BPSK CSS 시스템에서의 오버랩 횟수와 ISI의 상관관계를 분석하였고, IV장에서는 본 논문을 마무리 하였다.

II. 시스템 모델 및 오버랩으로 인한 ISI

처프 신호 파형의 복소 기저 등가 형태 $c(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$c(t) = \sqrt{\frac{1}{T_c}} \exp(j\pi\mu t^2), \quad |t| < \frac{T_c}{2}, \quad (1)$$

여기서 T_c 는 처프 신호 구간을 나타낸다. μ 는 처프율로서 처프 신호의 순간 주파수 변화량을 의미한다. μ 가 양의 값을 가질 경우, 처프 신호의 순간 주파수가 증가하며 이를 업 처프 신호라 한다. 반대로 μ 가 음의 값을 가질 경우, 처프 신호의 순간 주파수가 감소하며 이를 다운 처프 신호라 한다.

그림 1은 오버랩 기반 DM-BPSK CSS 시스템의 복소 기저 등가 모델을 보여준다. 입력 데이터는 먼저 극성 영점 비회귀 신호 레벨 인코더를 거쳐 클럭 $1/\tau$ Hz로 업 처프 생성기와 곱하여 $c(t-k\tau)$ 를 생성한다. 이 신호는 송신기에서 $\sqrt{E_s}h_s$ 로 곱하여 전송 신호 $s(t)$ 가 된다. 수신기에서는 수신 신호 $r(t)$ 를 상관계수 생성기와 곱하여 $c^*(t-i\tau)$ 를 생성한다. 이 신호는 클럭 $1/\tau$ Hz로 다운 처프 생성기와 곱하여 g_i 를 생성한다. 이 신호는 Re[·] 블록을 거쳐 h_s 로 곱하여 결정기에서 문턱값 = 0을 기준으로 출력 데이터를 생성한다.

$L=1$ 인 경우는 오버랩 기법이 적용되지 않은 DM-BPSK CSS 신호를 의미한다. 그림 2는 $L=1, 2, 3$ 인 경우의 오버랩 된 DM-BPSK CSS 신호의 예를 보여준다.

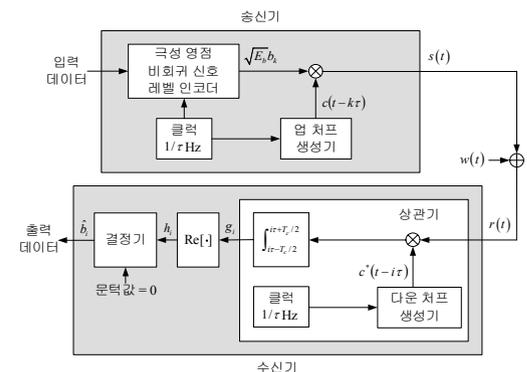


그림 1. 오버랩 기반 DM-BPSK CSS 시스템의 복소 기저 등가 모델

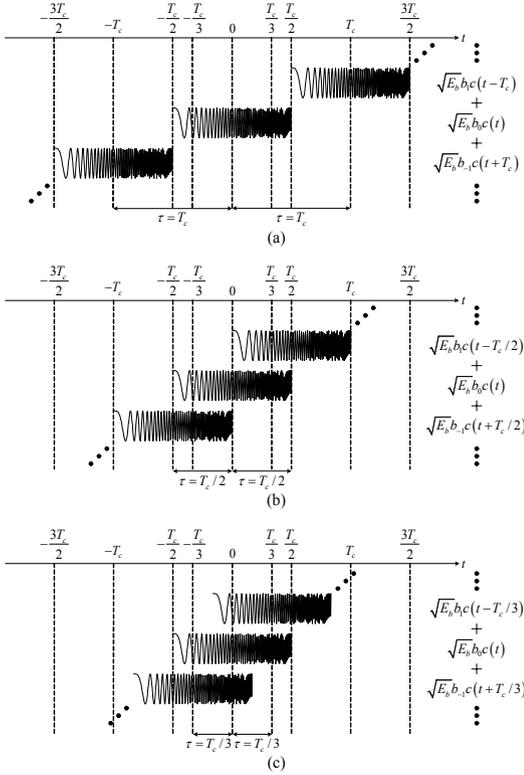


그림 2. 오버랩 된 DM-BPSK CSS 신호의 예 (a) $L=1$, (b) $L=2$, (c) $L=3$

다음으로, 인코딩된 데이터는 업 처프 신호 $c(t-k\tau)$ 와 곱해진다. 업 처프 신호가 곱해진 후의 DM-BPSK CSS 심볼 $s(t)$ 는 다음과 같다.

$$s(t) = \sqrt{E_b} \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k c(t-k\tau), \quad (2)$$

여기서 E_b 는 비트 에너지를 의미하며, b_k 는 같은 확률로 1 또는 -1의 값을 갖는 k 번째 전송된 데이터를 나타낸다. DM-BPSK CSS 심볼은 채널을 거치면서 평균이 0이고, 전력 스펙트럼 밀도가 (power spectral density: PSD) $N_0/2$ 인 덧셈잡음 (additive white Gaussian noise: AWGN) $w(t)$ 의 영향을 받는다.

채널을 통과한 DM-BPSK CSS 심볼은 수신기에서 상관기를 거쳐 다운 처프 신호 $c^*(t-i\tau)$ 와 상관되고, i 번째 상관기 출력 g_i 를 생성한다. 여기서 *는 공액 복소수를 (complex conjugate) 나타낸다. 상관기 출력 g_i 는 다음과 같다.

$$g_i = \int_{i\tau-T_c/2}^{i\tau+T_c/2} [s(t)+w(t)]c^*(t-i\tau) dt. \quad (3)$$

상관기 출력 g_i 의 실수부 값 h_i 을 취하여 결정 통계량으로 이용한다[7]. 상관기 출력 g_i 의 실수부 값 h_i 는 다음과 같이 표현된다.

$$h_i = \text{Re}[g_i] = \sqrt{E_b}b_i + \sqrt{E_b}z_i + n_i, \quad (4)$$

여기서 잡음성분 g_i 는 평균이 0이고, 분산이 $N_0/2$ 인 가우시안 확률 변수로서 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 잡음성분

$$n_i = \int_{i\tau-T_c/2}^{i\tau+T_c/2} \text{Re}[w(t)c^*(t-i\tau)] dt \quad (5)$$

z_i 는 오버랩으로 인해 발생하는 정규화된 ISI를 의미하며, 다음과 같이 표현된다.

$$z_i = \sum_{\substack{k=i-L+1 \\ k \neq i}}^{i+L-1} b_k p_{i,k}, \quad (6)$$

여기서 $p_{i,k}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p_{i,k} &= \int_{i\tau-T_c/2}^{i\tau+T_c/2} \text{Re}[c(t-k\tau)c^*(t-i\tau)] dt \\ &= \int_{\max(-\frac{T_c}{2}, -\frac{T_c}{2}+(k-i)\tau)}^{\min(\frac{T_c}{2}, \frac{T_c}{2}+(k-i)\tau)} T_c^{-1} \\ &\quad \times \text{Re}\{\exp(j\pi\mu[\{y-(k-i)\tau\}^2-y^2])\} dy \\ &= \frac{\sin\left\{(k-i)\pi S\left(1-\frac{|k-i|}{L}\right)\right\}}{(k-i)\pi S}. \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 $S=BT_c/L=B\tau$ 는 CSS 대역 $B=|f_c|T_c$ 에서 각 오버랩에 따른 처리이득을 의미한다. 마지막으로 결정 변수 h_i 의 값을 문턱값 0과 비교하여 i 번째 출력 데이터 \hat{b}_i 를 결정한다.

III. 오버랩 횟수와 ISI의 상관관계 분석

식 (7)에서 L^2 이 BT_c 의 인수인 경우, 0이 아닌 정수 $k-i \in \{-L+1, -L+2, \dots, L-1\}$ 에 대해서

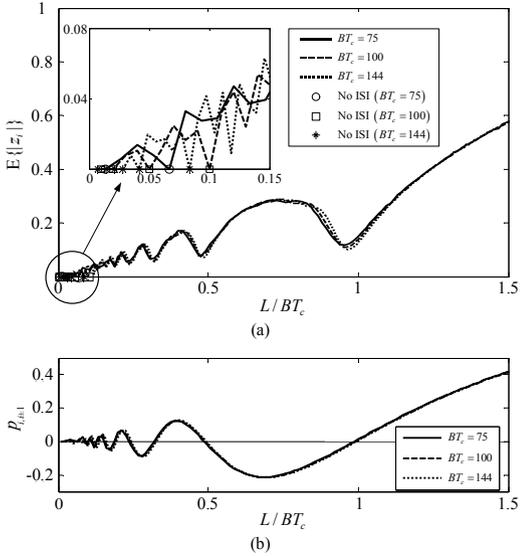


그림 3. (a) 정규화 된 ISI의 기대값 (b) L/BT_c 에 따른 파라미터 $p_{i,i\pm 1} = \frac{1}{\pi S} \sin(\pi S(1-1/L))$ 의 함수 ($BT_c = 75, 100, 144$)

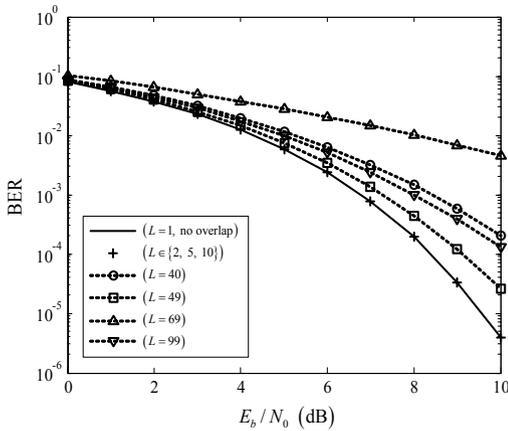


그림 4. 여러 L 값에 대한 DM-BPSK CSS의 BER ($BT_c = 100$)

$S\left(1 - \frac{|k-i|}{L}\right) = (L - |k-i|) \frac{BT_c}{L^2}$ 역시 정수 값을 가지므로 $p_{i,k} = 0$ 이 성립함을 알 수 있다. 모든 $k \neq i$ 에 대해서 $p_{i,k} = 0$ 이 될 경우 식 (6)의 정규화된 ISI z_i 역시 0이 되고 이것은 오버랩이 어떠한 ISI도 유발하지 않음을 의미한다. 예를 들어, $BT_c = 75, 100, 144$ 일 때, 각각 L 이 $L \in \{1, 5\}$, $\{1, 2, 5, 10\}$, $\{1, 2, 3, 4, 6, 12\}$ 의 값을 가지면 오버랩으로 인한 ISI가 발생하지 않는다. 그림 3(a)는 각

각 $BT_c = 75, 100, 144$ 일 때, ISI의 평균 진폭 $E\{|z_i|\}$ 을 보여준다. 또한, 그림 3(a)에서 BT_c 가 고정 되었을 때, 오버랩으로 인한 ISI는 $L < BT_c$ 인 경우 진동하면서 증가하고, $L \geq BT_c$ 인 경우 단조 증가하는 모습을 볼 수 있다. 이러한 현상은 다음과 같이 설명될 수 있다. 먼저, $\{p_{i,k}\}$ 의 semi-sinc 함수 집합 중, 성분 $p_{i,i\pm 1}$ 이 ISI 진폭 변화에 가장 큰 영향을 미친다. 그림 3(b)에서 볼 수 있듯이 $L < BT_c$ 인 경우, $p_{i,i\pm 1}$ 는 L 이 증가함에 따라 진동한다. $BT_c \gg 1$ 일 때, 최초 몇 개의 자연수 q 에 대해서 $p_{i,i\pm 1}$ 값이 0을 지나는 지점은 근사적으로 다음과 같이 표현된다.

$$L = \left\lfloor \frac{BT_c}{q} - 1 \right\rfloor, \quad (8)$$

여기서 $\lfloor \cdot \rfloor$ 은 $l \leq x < l+1$ 일 때 $\lfloor x \rfloor = l$ 인 연산을 나타낸다. 그림 3(a)에서 z_i 의 최소 극점들의 위치가 그림 3(b)에서 $p_{i,i\pm 1}$ 가 0을 지나는 지점의 위치와 거의 동일함을 알 수 있다. 예를 들어 그림 3(a)에서 $\frac{L}{BT_c} = 1$ 의 지점과 가장 가까운 4개의 최소 극점들의 위치는 각각 근사적으로 $\frac{L}{BT_c} = 0.99, 0.49, 0.32, 0.24$ 이다. 반대로 $L \geq BT_c$ 인 경우 $p_{i,i\pm 1}$ 는 오버랩 횟수 L 이 증가함에 따라 단조 증가하고, 결과적으로 z_i 진폭이 단조 증가하는 모습을 보인다.

요약하자면, $L \geq BT_c$ 인 경우, L 이 증가함에 따라 ISI는 모든 구간에서 단조 증가하는 모습을 보이지만, $L < BT_c$ 인 경우에, L 이 증가함에 따라 ISI가 감소하는 구간이 존재한다.

그림 4는 $BT_c = 100$ 인 경우 여러 오버랩 횟수 L 값에 대해 DM-BPSK CSS 신호의 BER 변화를 나타낸다. 처프 신호 구간 (T_c), 처프율 (μ), 처프 신호 대역폭은 (B) 각각 $0.5 \mu s$, $400 \text{ MHz}/\mu s$, 200 MHz 이다. $L=1$ 인 경우 오버랩이 없이 이상적인 BER 성능을 가진다는 것을 상기할 때, 앞에서 논의되었던 바와 같이 오버랩 횟수 L 이 $L \in \{2, 5, 10\}$ 을 만족할 경우, 오버랩으로 인한 ISI가 발생하지 않아 그에 따른 BER 성능의 저하가 일어나지 않는 것을 볼 수 있다. 뿐만 아니라, 오버랩 횟수 L 이 증가 할수록 항상 BER 성능의 저하

가 발생하는 것은 아님을 관측할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 오버랩 기반 DM-BPSK CSS 시스템에서 오버랩 횟수에 따른 ISI의 변화를 수학적으로 유도하였다. 유도된 수학적식을 분석하여, 오버랩 횟수 L 이 BT_c 보다 커질 경우, L 값의 증가에 따른 ISI의 평균 진폭이 진동하며 증가하는 형태에서 단조 증가 형태로 바뀌는 것을 발견하였다. 또한 L 과 BT_c 이 특정 조건을 만족할 경우 오버랩으로 인한 어떠한 ISI도 발생하지 않는다는 것을 수식적 전개 및 모의실험을 통해 분석하였다. 본 논문에서 도출된 결과들은 실제 오버랩 기반 DM-BPSK CSS 시스템의 구현에 있어서 매우 유용할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] H. Shen and A. Papandreou-Suppappola, "Diversity and channel estimation using time-varying signals and time-frequency techniques," *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol. 54, No. 9, pp. 3400-3413, Sep. 2006.
- [2] IEEE Std. 802.15.4a-2007, *Wireless MAC and PHY Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, IEEE, 2007.
- [3] J. Pinkney, "Low complexity indoor wireless data links using chirp spread spectrum," Ph. D. Dissertation, Dept. Elect. Comput. Engineer., University of Calgary, Calgary, Canada, 2003.
- [4] A. Springer, W. Gugler, M. Huemer, R. Koller, and R. Weigel, "A wireless spread-spectrum communication system using SAW chirped delay lines," *IEEE Trans. Microwave Theory, Tech.*, Vol. 49, No. 4, pp. 754-760, Apr. 2001.
- [5] T. Yoon, S. Ahn, S. Y. Kim, and S. Yoon, "Performance analysis of an overlap-based CSS system," *Proc. 10th IEEE Int. Confer. Advanced Commun. Technol. (ICACT)*, pp. 424-426, Pyeongchang, Korea, Feb. 2008.
- [6] T. Yoon, D. Chong, S. Ahn, and S. Yoon, "Bit-error-rate performance analysis of an overlap-based CSS System," *Int. J. Electron., Commun., Comput. Engineer.*, Vol. 1, No. 1, pp. 41-45, Jan. 2009.

- [7] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K., 2005.

김 준 환 (Junhwan Kim)

정회원



2010년 2월 성균관대학교 정보통신공학부 공학사
 2010년 3월~현재 성균관대학교 휴대전화학과 석사과정
 <관심분야> 인지 무선 통신, 통계학적 신호처리, 추정 및 검파

이 영 포 (Youngpo Lee)

정회원

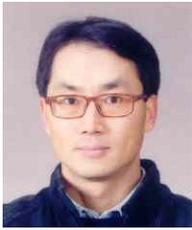


2008년 2월: 성균관대학교 정보통신공학부 공학사
 2010년 2월 성균관대학교 휴대전화학과 공학석사
 2010년 3월~현재 성균관대학교 휴대전화학과 박사 과정
 2008년 11월 한국통신학회 하계 종합학술발표회 우수논문상 수상

2009년 12월 IEEE Seoul Section Student Paper Contest 대상 수상
 2010년 1월 성균관대학교 정보통신공학부 우수논문상 수상
 2010년 12월 아이디스 전자신문 대학(원)생 과학기술 & IT 논문공모 대제전 최우수상, 장려상 수상
 <관심분야> 통신 이론, 이동통신, 통계학적 신호처리

송 익 호 (Iickho Song)

중신회원



1982년 2월 서울대학교 전자공학과 공학사 (준최우등)
1984년 2월 서울대학교 전자공학과 공학석사
1985년 8월 펜실베니아대학교 전기공학과 공학석사
1987년 5월 펜실베니아대학교 공학박사

1987년 3월~1988년 2월 벨 통신연구소 연구원
1988년 3월~현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 조교수, 부교수, 교수
1995년 1월~현재 한국과학기술원 논문지 편집위원, 편집 부위원장, 대한전자공학회, 한국음향학회, 한국통신학회 중신회원, IET 석학회원, IEEE 석학회원
<관심분야> 통계학적 신호처리, 통신이론, 신호검파와 추정, 이동통신

윤 석 호 (Seokho Yoon)

중신회원



1997년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 공학사(최우등)
1999년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 공학석사
2002년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 공학박사
2002년 3월~2002년 6월 MIT 박사후 연구원

2002년 7월~2003년 2월 하버드대학교 박사후 연구원
2003년 3월~현재 성균관대학교 정보통신공학부 전임 강사, 조교수, 부교수
2000년 2월 삼성 휴먼테크 논문대상 동상 수상
2007년 Marquis Who's Who in Asia에 등재
2007년 IEEE 준석학회원
2008년 Marquis Who's Who in World에 등재
2009년 한국통신학회 LG 학술상 수상
<관심분야> 통신이론, 이동통신, 통계학적 신호처리