

IEEE 802.15.4a IR-UWB 시스템의 SFD 검출 성능 개선 방안

준회원 이지연*, 강동훈*, 박효배*, 종신회원 오왕록*

Improving the SFD Detection Performance of IEEE802.15.4a IR-UWB System

Jiyeon Lee*, Donghoon Kang*, Hyobae Park* *Associate Members*,
Wangrok Oh* *Lifelong Member*

요 약

IEEE 802.15.4a에 제안된 IR-UWB (Impulse Radio Ultra Wideband) 시스템의 경우 패킷 방식으로 동작하며 하나의 패킷은 SYNC 심볼 (symbol)과 SFD (Start of Frame Delimiter) 심볼로 이루어진 프리앰블, 헤더 및 데이터부로 구성된다. 성공적인 패킷 수신을 위해서는 프리앰블을 이용한 초기 동기 획득과 SFD 검출이 필수적이다. IEEE 802.15.4a IR-UWB 시스템의 경우 SFD 패턴은 8개의 심볼로 구성되어 있으며 SYNC 패턴의 길이에 비하여 매우 짧아 정상적으로 초기 동기를 획득한 경우에도 SFD 패턴 검출에 실패하여 해당 패킷에 대한 복조를 수행하지 못하는 경우가 발생한다. 본 논문에서는 초기 동기 획득 이후 잉여 SYNC 심볼들 중 일부를 활용하여 IEEE 802.15.4a에 제안된 IR-UWB 시스템의 SFD 검출 성능을 개선하는 방안을 제안한다.

Key Words : IEEE802.15.4a, IR-UWB, SFD, Missing Probability, False-alarm Probability

ABSTRACT

In IEEE 802.15.4a IR-UWB (Impulse Radio Ultra Wideband) systems, it is crucial to acquire initial carrier/timing synchronization and estimate channel response by exploiting the SYNC symbols embedded in each packet. On the other hand, it is also crucial to detect the SFD pattern followed by the header and data symbols to reliably extract the information contained in the packet. In this paper, we propose a reliable SFD detection scheme utilizing some surplus SYNC symbols in addition to SFD symbols to improve the SFD detection performance.

I. 서 론

IR-UWB (Impulse Radio Ultra Wideband) 통신 시스템은 데이터 전송을 위하여 폭이 1 nsec 이하인 펄스를 사용함으로써 송신 신호는 수 GHz의 넓은 대역폭을 점유하며 매우 낮은 송신 출력 밀도를 보인다. 또한 데이터 전송을 위하여 사용하는 펄스의 폭이 매우 좁아 다중 경로 신호들을 정밀하게 분리할 수 있

며 이를 통하여 정밀한 무선 측위가 가능하다. 반면, 정보 전송을 위하여 사용하는 펄스의 폭이 짧아 안정적인 데이터 송수신을 위해서는 송수신기 간 정확한 시간 동기가 필요하며 광대역 주파수 특성이 우수한 안테나가 필요한 단점이 있다.^[1-4]

IEEE 802.15.4a에 제안된 IR-UWB 시스템의 경우 패킷 방식으로 동작하며 하나의 패킷은 동기를 위한 SYNC부와 데이터 프레임의 시작을 알리는 SFD

* 충남대학교 전기정보통신공학부 통신시스템 연구실 (kingrock@cnu.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-09-415, 접수일자 : 2009년 9월 16일, 최종논문접수일자 : 2010년 4월 1일

(Start of Frame Delimeter)부로 구성된 프리앰블, 데이터부에 대한 정보를 담고 있는 헤더 (header) 그리고 데이터로 구성된다. 안정적인 데이터 수신을 위하여 수신기에서는 SYNC 심볼들을 이용하여 시간 및 주파수 동기를 획득하여야 하며 다중 경로 채널에 대한 채널 추정 수행이 필수적이다. 또한 SYNC 심볼들을 이용한 초기 동기를 성공적으로 획득한 경우 SFD 심볼을 이용하여 패킷 내에 포함되어 있는 헤더부의 시작점을 검출하고 이를 통하여 데이터를 복조하여야 한다.

IEEE 802.15.4a에 제안된 IR-UWB 시스템의 경우 mandatory 모드에서 SYNC 부는 64개의 심볼을 사용하는 반면 SFD 패턴은 비교적 작은 개수인 8개의 심볼로 이루어져 있어 SYNC 심볼들을 이용하여 초기 동기를 성공적으로 획득한 경우에도 SFD를 정상적으로 검출하지 못하여 데이터 복조를 수행하지 못하는 경우가 발생한다. 본 논문에서는 이와 같이 짧은 SFD 패턴으로 인한 낮은 SFD 검출 성능을 개선하기 위하여 초기 동기 획득 후 잉여 SYNC 심볼들 중 일부를 SFD 검출에 활용하여 SFD 검출 성능을 개선하는 기법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 IR-UWB 시스템 모델 및 프리앰블 구조에 대하여 살펴보고, III장에서는 일반적인 SFD 검출 성능을 고찰하고 SFD 검출 성능을 개선할 수 있는 새로운 SFD 검출 알고리즘을 제안한다. IV장에서는 모의실험을 통하여 제안된 검출 기법의 성능을 비교하고 V장에서 결론을 맺는다.

II. IR-UWB 시스템 모델

IEEE 802.15.4a에 제안된 IR-UWB 시스템의 프레임 구조는 그림 1과 같다.

IR-UWB 프레임은 SHR 프리앰블과 PHY 헤더 (PHR) 그리고 PSDU로 구성된다. SHR 프리앰블은 SYNC 및 SFD 심볼들로 구성되어 수신기에서 초기 동기 및 채널 추정 그리고 PHR의 시작점을 검출하는데 사용되며 그 구조는 그림 2와 같다.

SYNC 필드는 심볼 S_i 를 N_{sync} 번 반복하여 만들며 심볼 S_i 는 길이가 31인 ternary code $C_i, i = 1, 2, \dots, 8$

SHR Preamble 16, 64, 1024 or 4096 symbols	PHY Header(PHR) 19 symbols @850 or 110 kb/s	Data field 0-1209 symbols @ variable rate
--	--	--

그림 1. IEEE 802.15.4a IR-UWB 프레임 구조
Fig. 1. IEEE 802.15.4a IR-UWB frame structure

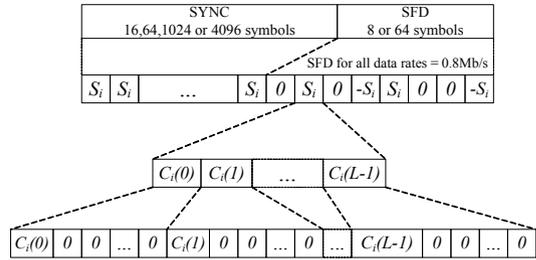


그림 2. SHR 프리앰블 구조
Fig. 2. SHR preamble structure

와 확산 함수 δ_L 을 이용하여 식 (1)과 같이 생성되며 여기에서 ' \otimes '는 convolution 연산이다.

$$S_i = C_i \otimes \delta_L(n)$$

$$\delta_L(n) = \begin{cases} 1 & n = 0 \\ 0 & n = 1, 2, \dots, L-1 \end{cases} \quad (1)$$

SFD는 해당 프레임에서 PHR 헤더의 시작점을 알리기 위하여 SYNC 필드 뒤에 추가되며 $[0, S_i, 0, -S_i, S_i, 0, 0, -S_i]$ 의 패턴을 갖는다.

IEEE 802.15.4a IR-UWB 송수신 시스템은 앞에서 기술한 프레임 구조를 기반으로 동작하며 그 구조는 그림 3과 같다.

PHR 비트들과 Payload 비트들은 각각 SECDED (single error correction double error detection) 및 RS 부호로 각각 부호화 된 다음 부호율 1/2인 길쌈부호화기로 입력된다. 길쌈부호화된 정보 비트들은 BPPM-BPSK (binary pulse position modulation binary phase shift keying) 심볼로 매핑된 후 프리앰블 심볼들과 연결되고 그 결과는 펄스 성형 (pulse shaping) 여파기를 거친 후 RF (radio frequency)부를 통하여 안테나를 통하여 전송된다. 채널을 거쳐 수신

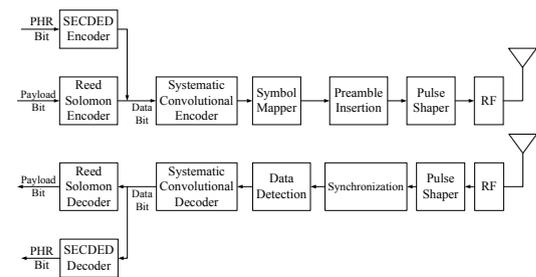


그림 3. IR-UWB 송수신 시스템 모델
Fig. 3. IR-UWB transceiver system model

1) Mandatory 모드의 경우 $N_{sync}=64$ 이며 $L=16$ 이다.

된 신호는 RF단과 정합 여파기 (matched filter)를 거치게 된다. 수신기에서는 프리앰블 심볼들에 대한 정합 여파기 출력 신호를 바탕으로 초기 동기와 채널 추정 및 보상을 수행한 후 SFD 검출과 PHR 복원을 수행하고 PSDU에 실려있는 데이터들에 대한 복조 및 복호를 수행한다.

III. IR-UWB 수신 알고리즘

3.1 IR-UWB 수신기 구조

IEEE 802.15.4a IR-UWB 수신기 구조는 그림 4와 같다. 수신기에서는 SYNC 심볼들을 이용하여 신호 검출 및 초기 타이밍 동기를 획득하고 AGC (automatic gain control), AFC (automatic frequency compensation) 등과 같은 초기 동기 획득 과정을 수행한다. 또한 SYNC 심볼들을 이용하여 채널 추정을 수행하고 이를 바탕으로 채널 보상을 한 후 심볼 단위로 표본화된 수신 신호를 바탕으로 SFD 검출을 수행한다. 일반적인 SFD 검출기 구조를 도식화하면 그림 5와 같다.

SFD 검출을 위하여 사용할 수 있는 SFD 패턴은 $SFD = [F_0, F_1, \dots, F_7] = [0 \ S_i \ 0 \ -S_i \ S_i \ 0 \ 0 \ -S_i]$ 이며 총 8개의 심볼로 이루어져 있다. 초기 동기 과정과 채널 추정 및 보상 후 최적 시간에서 표본화된 수신 신호를 $r_k, k = 0, 1, 2, \dots$ 라 하면 SFD 상관기 (correlator) 출력값 C_k 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C_k = \sum_{n=0}^7 r_{k+n} \times F_n \quad (2)$$

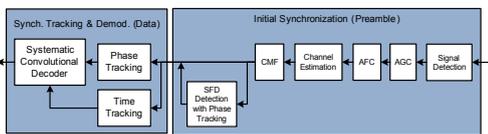


그림 4. 수신기 블록 다이어그램
Fig. 4. Receiver block diagram

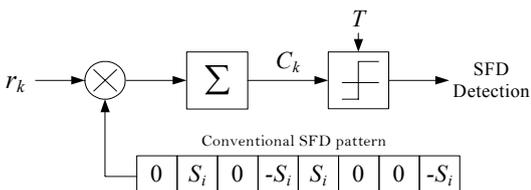


그림 5. 일반적인 SFD 검출 알고리즘
Fig. 5. Conventional SFD Detection Algorithm

식 (2)의 상관기 출력값 C_k 를 검출 임계값 T 와 비교하여 SFD 검출 여부를 결정하며 그 과정은 식 (3)과 같다.

$$C_k \begin{matrix} H_0 \\ \geq \\ H_1 \end{matrix} T \quad (3)$$

H_0 : detected
 H_1 : undetected

SFD 패턴의 심볼 중 '0'을 제외한 유효 심볼은 4개로 작은 편이어서 SYNC 심볼들을 이용하여 정상적인 동기 획득이 가능한 신호대잡음비 영역에서도 SFD를 검출하지 못하고 이로 인하여 Payload에 포함되어 있는 정보 비트들을 복원해내지 못하는 경우가 발생할 수 있으며 이에 따라 SFD 검출 성능 개선이 요구된다.

3.2 제안하는 알고리즘

본 논문에서는 짧은 SFD 패턴으로 인한 낮은 SFD 검출 성능을 개선하기 위하여 잉여 SYNC 심볼들 중 일부를 SFD 검출에 활용하는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 SFD 검출기 구조를 도식화하면 그림 6과 같다. 제안하는 검출 알고리즘에서는 수신기에서 사용하는 검출 패턴을 일반적인 SFD 패턴에 잉여 SYNC 심볼 M 개를 연결하여 식 (4)와 같이 구성하여 사용한다.

$$SFD^p = [F_0^p, F_1^p, \dots, F_{M+7}^p] = \underbrace{[S_i \dots S_i \ 0 \ 0 \ S_i \ 0 \ 0 \ -S_i \ S_i \ 0 \ 0 \ -S_i]}_M \quad (4)$$

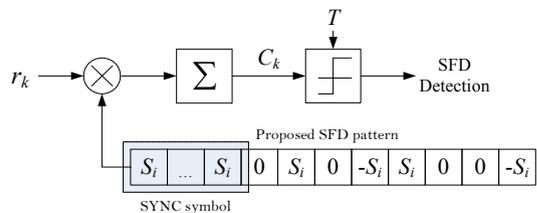


그림 6. 제안하는 SFD 검출 알고리즘
Fig. 6. Proposed SFD Detection Algorithm

2) SYNC 심볼들을 누적하여 초기동기를 획득할 경우 초기 동기 성능은 개선할 수 있으나 구현 복잡도가 크게 증가한다. 따라서 일반적인 경우 초기 동기 및 채널 추정 등에 총 64개의 SYNC 심볼들 중 10개 미만의 심볼이 사용되므로 초기 동기 및 채널 추정이 완료되어 SFD 검출을 수행하기 전에 다수의 잉여 SYNC 심볼들이 존재한다^[6].

식 (4)에서 볼 수 있는 바와 같이 새로운 SFD 패턴을 사용함으로써 유효 SFD 심볼의 개수가 증가하고 이에 따라 SFD 검출 성능의 개선을 기대할 수 있다. 또한 새로운 SFD 패턴에 추가되는 SYNC 심볼의 개수 M 을 조절하여 SFD 검출 성능과 하드웨어 구현 복잡도 간의 최적점을 찾을 수 있는 장점이 있다. 제안하는 SFD 검출기의 상관기 출력 신호는 식 (5)와 같다.

$$C_k^{proposed} = \sum_{n=0}^{7+M} r_{k+n} \times F_n^p \quad (5)$$

IV. 모의 실험

일반적인 SFD 검출 기법과 본 논문에서 제안하는 새로운 SFD 검출 기법의 분실 확률 (missing probability)과 오경보 확률 (false alarm probability) 성능을 전산 실험을 통하여 확인하였으며 그 결과는 그림 7과 같다. 전산 실험은 IEEE 802.15.4a에서 제안된 채널 모델 1^[5]을 사용하였으며 신호대잡음비 E_b/N_0 는 -6dB를 가정하였다³⁾. 여기에서 E_c 는 펄스 당 에너지이며 $N_0/2$ 는 가산성 백색 가우시안 잡음 (additive white Gaussian noise)의 양측 전력밀도이다. 또한 채널 추정을 통하여 다중 경로 성분들을 모두 보상한 경우를 가정하였다.

그림 7에서 살펴볼 수 있는 바와 같이 일반적인 SFD 검출 알고리즘을 적용하였을 경우 오경보 확률이 10^{-3} 이 되는 임계값 0.18에서 분실 확률이 2×10^{-3} 이다. 반면 $M=2$ 인 제안하는 검출기의 경우

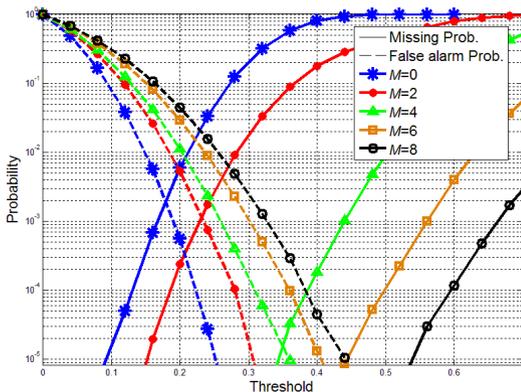


그림 7. SFD 검출 임계값에 따른 검출 확률
Fig. 7. SFD detection probability

3) 전산실험에서 고려한 신호대잡음비 $E_b/N_0 = -6$ dB는 $E_b/N_0 = 6$ dB에 해당하며 여기에서 E_b 는 전송 정보 비트 당 에너지이다.

오경보 확률이 10^{-3} 이 되는 임계값 0.24에서 분실 확률이 오경보 확률과 같은 10^{-3} 이 되어 일반적인 SFD 검출 기법에 비하여 성능이 개선됨을 확인할 수 있다. 제안하는 기법에서 M 을 증가시키에 따라 SFD 검출 성능이 점차 개선되며 $M=6$ 인 경우 10^{-5} 이하의 오경보 및 분실 확률을 달성할 수 있음을 확인할 수 있다. 이와 같이 M 값의 증가에 따라 동일 신호대잡음비에서 SFD 검출 성능은 향상되나 필요한 하드웨어 복잡도가 증가하므로 SFD 검출 성능과 구현 복잡도 간의 최적점을 도출할 필요가 있으며 전산 실험 결과 6개의 SYNC 심볼을 추가하여 SFD 검출을 수행하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

전산 실험에서 사용한 채널 모델^[5]의 경우 다중 경로의 개수는 1,000개이며 실제 수신기 구현 시 모든 다중 경로를 추정하여 보상하는 것은 불가능하다. 따라서 실제적인 구현 환경에서 제안하는 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 수신 신호에서 보상되는 다중 경로의 개수를 한정하고 제안하는 검출 기법의 성능을 검증하였다. 다중 채널 경로들 중 최대 전력값을 갖는 경로부터 큰 순서대로 일정 경로만을 선택하여 보상할 경우 얻을 수 있는 전체 수신 신호의 전력 대비 채널 보상 후 얻을 수 있는 수신 신호의 전력 비는 그림 8과 같다.

그림 8에서 살펴볼 수 있는 바와 같이 최대 전력을 갖는 경로부터 큰 순서대로 8개의 경로를 선택하여 채널 보상을 수행할 경우 전체 수신 신호 전력의 80%를 획득할 수 있으며 15개의 경로를 선택하였을 때 90%, 48개의 경로를 선택하였을 때 99%의 전력을 획득할 수 있다. 실제 수신기에서 8개 및 15개의 최대 전력값을 갖는 경로를 선택하여 채널 보상을 하였을 경우 일반적인 SFD 검출 알고리즘의 검출 성능은 그

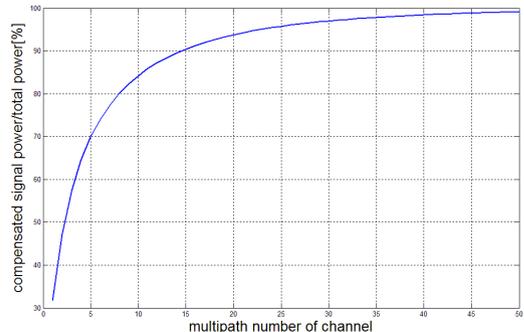


그림 8. 채널 보상에 사용하는 다중 경로 신호 개수에 따른 채널 보상 후 전력과 전체 수신 전력간 비
Fig. 8. Ratio between channel compensated received signal power and total received signal power

림 9과 같으며 제안하는 기법을 사용하였을 경우 달성할 수 있는 SFD 검출 성능은 그림 10와 같다.

그림 9와 10에서 확인할 수 있는 바와 같이 실제 수신기에서 전체 다중 경로 신호들 중 8개 혹은 15개만을 골라 보상하였을 경우를 가정한 경우에도 일반적인 SFD 검출 기법에 비하여 제안하는 기법의 검출 성능이 개선됨을 확인할 수 있다.

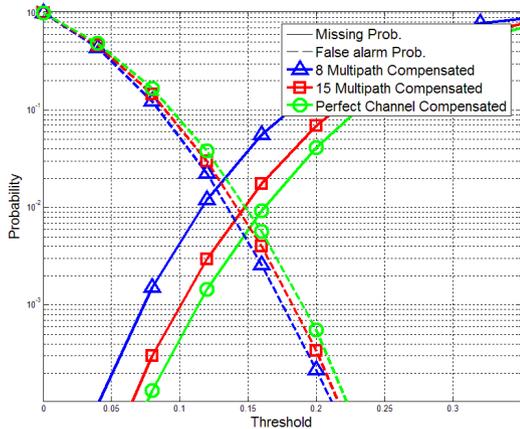


그림 9. 일반적인 SFD 알고리즘의 보상 채널 경로 개수에 따른 오경보 확률 및 분실 확률
Fig. 9. False alarm and missing probability of the conventional SFD detection scheme for various channel compensation schemes

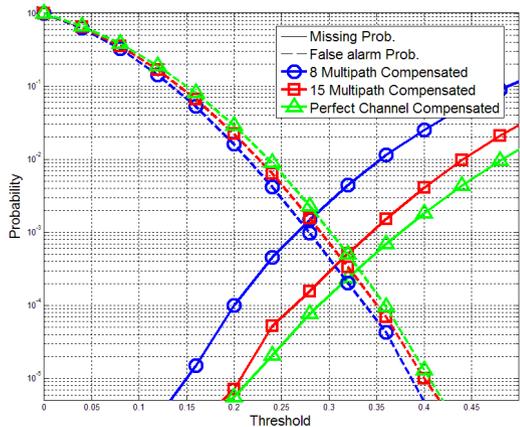


그림 10. $M=6$ 일 경우 SFD 알고리즘의 보상 채널 경로 개수에 따른 오경보 확률 및 분실 확률
Fig. 10. False alarm and missing probability of the proposed SFD detection scheme for various channel compensation schemes.

V. 결론

본 논문에서는 초기 동기과 채널 추정 및 보상 후 잉여 SYNC 심볼들 중 일부를 활용하여 SFD의 검출 성능을 개선하는 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘의 경우 일반적인 검출 기법에 비하여 검출 성능을 개선할 수 있으며 추가하는 SYNC 심볼의 개수에 따라 검출 성능을 조절할 수 있어 하드웨어 복잡도와 SFD 검출 성능 면에서 가장 적절한 SFD 검출 기법을 도출할 수 있다.

참고 문헌

- [1] IEEE, *Approved Draft Amendment to IEEE Standard for Information technology Telecommunications and information exchange between system-PART 15.4: Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANs): Amendment to add alternate PHY(Amendment of IEEE Std 802.15.4)*, IEEE Std. P802.15.4a/D7, Jan. 2007.
- [2] H. Nie, Z. Chen, "Transceiver Technologies for Impulse Radio Ultra Wideband (IR UWB) Wireless Systems", *Communication Networks and Services Research Conference*, 2008, 6th Annual, pp.3-8, May 2008
- [3] M. Ghavami, L. B. Michael, and R. Kohno, "Ultra Wideband signals and systems in communication engineering," John Wiley & Sons, Ltd, pp.1-24, 2004
- [4] M. Z. Win, R. A. Scholtz, "Impulse radio: How it works.", *IEEE Communications Letters*, Vol.2, No.2, pp.36-38, Feb. 1998.
- [5] A. F. Molisch, K. Balakrishnan, D. Cassioli, et al., "IEEE 802.15.4a channel model—final report," *IEEE 802.15-04-0662-00-004a*, Nov. 2004.
- [6] I. Guvenc, Z. Sahinoglu, and P. V. Orlik, "TOA Estimation for IR-UWB Systems with Different Transceiver Types," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.54, pp.1876-1886, Jun. 2006.

이 지 연 (Jiyeon Lee)

준회원



2008년 충남대학교 전자전파정보통신공학부 학사
2010년 충남대학교 전자전파정보통신공학과 석사
<관심분야> UWB 시스템, Broadcast 시스템

박 효 배 (Hyobae Park)

준회원



2009년 충남대학교 전자전파정보통신공학과 학사
2009년~현재 충남대학교 전자전파정보통신공학과 석사과정
<관심분야> 이동통신 시스템, UWB 시스템, 협력통신

강 동 훈 (Donghoon Kang)

준회원



2009년 충남대학교 전자전파정보통신공학과 학사
2009년~현재 충남대학교 전자전파정보통신공학과 석사과정
<관심분야> 채널 코딩, STBC, 이동통신 시스템

오 왕 록 (Wangrok Oh)

종신회원



1994년 포항공과대학교 학사
1997년 포항공과대학교 석사
2003년 포항공과대학교 박사
1994년~1995년 스탠더드 텔레콤 연구원
2003년~2006년 포항공과대학교 정보통신연구소 전임연구원
2006년~2010년 충남대학교 정보통신공학과 조교수
2010년~현재 충남대학교 정보통신공학과 부교수
<관심분야> 터보 코드, MIMO 시스템, 유무선 디지털 통신