

NC-OFDM 기반 통신 시스템에서 효율적인 Comb Type Pilot 배치 방식과 PAPR 저감 기법

Effective Comb Type Pilot Assignment and PAPR Reduction in NC-OFDM-Based Communication System

안동건 · 유흥균 · 이승준* · 고동국*

Dong Geon An · Heung-Gyoon Ryu · Seung-Jun Lee* · Dong-Kuk Ko*

요 약

NC-OFDM(Non-Contiguous Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기반의 무선 통신 시스템은 많은 부반송파의 수로 인해 높은 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)을 갖는다. Comb type pilot은 시변 채널 추정에 있어서 block type pilot보다 낮은 계산 복잡도를 가지며 더 효율적이다. 그러나 CAZAC(Constant Amplitude Zero Auto-Correlation) 행렬 변환이 뛰어난 PAPR 저감 효과를 보임에도 불구하고, comb type pilot이 데이터 심볼에 삽입되게 되면 PAPR이 다시 증가하는 문제가 있다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 comb type pilot 배치로 인해 증가된 PAPR을 개선하기 위해 추가적으로 새로운 방식의 SLM(Selective Mapping)을 적용하였다. 또한, 본 논문에서 사용된 새로운 방식의 SLM 기법은 일반적인 SLM 기법과 달리, SLM의 선택 정보를 전송하기 위한 추가적인 대역폭을 사용하지 않음으로써 대역 효율을 높인다. 따라서, 본 논문에서 제안된 시스템은 제한된 주파수 대역을 이용하여 고효율의 데이터 전송을 얻을 수 있다.

Abstract

Because of a large number of subcarriers, the high PAPR(Peak-to-Average Power Ratio) is the major drawback of NC-OFDM system used for wireless communication system. Comb type pilot assignment is more efficient and lower computational complexity for the channel estimation than the block type pilot. However, even if the CAZAC(Constant Amplitude Zero Autocorrelation) matrix transform is used for the PAPR reduction of the data symbols, PAPR increases when the pilot is inserted in comb type with the data symbols. Therefore, in this paper, we additionally use a new SLM technique in order to lower the PAPR again even in the comb type pilot. Also, a new SLM technique suggested in this paper does not need any additional bandwidth for sending selection information for SLM. This combined method has good PAPR reduction performance and efficient data transmission.

Key words : NC-OFDM, PAPR, SLM, Comb Type Pilot

I. 서 론

최근, 무선 통신 시스템은 무선 자원을 효율적으로 활용하기 위하여 여러 개의 조각난 스펙트럼 대

역을 이용하고자 한다. OFDM은 다중 경로 페이딩 채널에 강인한 다중 반송파 시스템으로 고속의 디지털 통신 영역에서 널리 사용되고 있다. NC-OFDM (Non-Contiguous Orthogonal Frequency Division Multi-

충북대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University)

*LIG넥스원 통신연구센터(Communication R/D Center, LIG Nex1 Co.)

· 논문 번호 : 20100420-048

· 교신저자 : 유흥균(e-mail : ecomm@cbu.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 7월 28일

plexing)은 여러 개의 나뉘어진 대역을 이용하기 위하여 OFDM 변조 방식을 이용하며, 고속의 데이터 전송률을 갖고 선택성 페이딩 채널(selective fading channel)에 강인하다. NC-OFDM 시스템은 상대적으로 0의 입력을 가지는 부반송파의 수가 많으므로 더 많은 전력을 데이터를 가지는 부반송파에 할당할 수 있다. 따라서, 이에 상응하는 SNR(Signal to Noise Ratio)을 개선할 수 있다^[1].

그러나, OFDM 변조된 신호는 높은 PAPR의 단점을 가진다. 시간 영역 OFDM 신호는 독립적으로 변조된 많은 부반송파들로 구성되므로 이들이 동위상으로 더해질 때 큰 크기의 신호가 발생하여 PAPR이 크게 나타난다. N 개의 신호가 동일한 위상으로 더해지면 최대 전력은 평균 전력의 N 배가 된다. 따라서, OFDM과 같은 다중 반송파 시스템은 단일 반송파 시스템보다 PAPR에 민감하다. 또한, 높은 PAPR은 전력 효율과 BER 성능을 나쁘게 만드는 원인이 된다^{[2],[3]}.

PAPR의 문제를 개선하기 위해 많은 방식들이 연구되었다. 이러한 방식에는 clipping, windowing, peak cancellation, coding, tone reservation(TR), tone injection (TI), DFT spreading, selected mapping(SLM), partial transmit sequence(PTS), interleaving 등이 있다^[3].

Coherent detection은 NC-OFDM의 부반송파 전체에 시간적으로 주기성을 갖는 pilot tone을 삽입하거나(block type pilot), 부반송파 사이에 주파수적으로 주기성을 갖는 pilot tone을 삽입함으로써(comb type pilot) 이루어진다. Comb type pilot 채널 추정은 한 심볼 안에서 채널이 변화할 때 채널 등화를 만족시키기 위해 제안된 방식이다. 이는 파일럿 주파수를 통해 채널을 측정하고 채널을 보간하는 알고리즘으로 구성되어 있다. 이러한 채널 추정은 매 심볼마다 채널을 특성을 얻을 수 있으므로 시변 채널 추정이 가능하다. 따라서, 고속 페이딩 채널에서는 comb type pilot 채널 추정이 block type pilot 채널 추정보다 우수한 성능을 가지고 있다^{[4],[5]}.

CAZAC(Constant Amplitude Zero Auto-Correlation) matrix transform은 DFT spreading과 거의 동일한 뛰어난 PAPR 저감 효과를 가진다. 그러나, 고속 페이딩 채널의 추정을 위해 comb type pilot을 삽입하게 되면 PAPR 성능이 악화되게 된다. 새로운 SLM 기

법은 이러한 PAPR 증가를 개선하면서도 부가적인 대역폭을 사용하지 않는다. CAZAC matrix transform과 제안된 SLM 기법의 결합 방식은 단일 PAPR 저감 기법을 사용할 때보다 더 높은 계산 복잡도를 가진다. 그러나, 광 대역 환경에서는 comb pilot 삽입으로 인한 이차적인 PAPR 증가를 줄이는 것은 시스템의 성능을 높이기 위해 반드시 필요하다.

따라서, 본 논문에서 CAZAC matrix transform과 제안된 새로운 SLM을 결합한 시스템은 고속의 데이터 전송에 적합한 낮은 PAPR을 가지며, 시스템의 SLM의 위상 회전 정보 전송을 위한 부가적인 대역폭을 사용하지 않으므로써 시스템의 대역 효율을 높인다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 SLM과 일반적인 SLM의 PAPR 성능을 비교하고, pilot 삽입에 대한 PAPR 변화와 제안 시스템의 PAPR 저감 성능을 확인하였다.

II. 시스템 구성

2-1 CAZAC Matrix Transformed NC-OFDM 시스템

시스템이 M 개의 부반송파로 구성될 때, $M \times M$ CAZAC matrix 변환된 NC-OFDM 시스템은 DFT spread와 동일한 PAPR 저감 효과를 가진다.

$M \times M$ 복소 직교 변환 matrix A 는 길이가 $L = M^2$ 이고, $p=1$ 일 때, CAZAC 시퀀스를 재배열해서 다음과 같은 직교 매트릭스로 만들어진다^[7].

$$A = \begin{bmatrix} C_0 & C_M & L & C_{M(M-1)} \\ C_1 & C_{M+1} & & C_{M(M-1)+1} \\ M & M & O & M \\ C_{M-1} & C_{2M-1} & L & C_{M^2-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

이 때, $C_k = \exp[j\pi k^2 / M_2]$, $A_{mn} = C_{m+Mn} = \exp[j\pi(m + Mn)^2 / M^2]$, $A^H A = I$ 이다.

S/P(Serial to Parallel)에 의해 병렬화된 입력 심볼 시퀀스 x 는 다음과 같다.

$$x = [x_0, x_1, L, x_{M-1}] \quad (2)$$

x 는 CAZAC 변환 A 에 의해 변환된다.

$$x' = [x'_0, x'_1, L, x'_{(M-1)}]$$

$$x'_m = \sum_{n=0}^{M-1} x_n \cdot A_{mn} = \sum_{n=0}^{M-1} x_n \cdot C_{m+Mn} \quad (3)$$

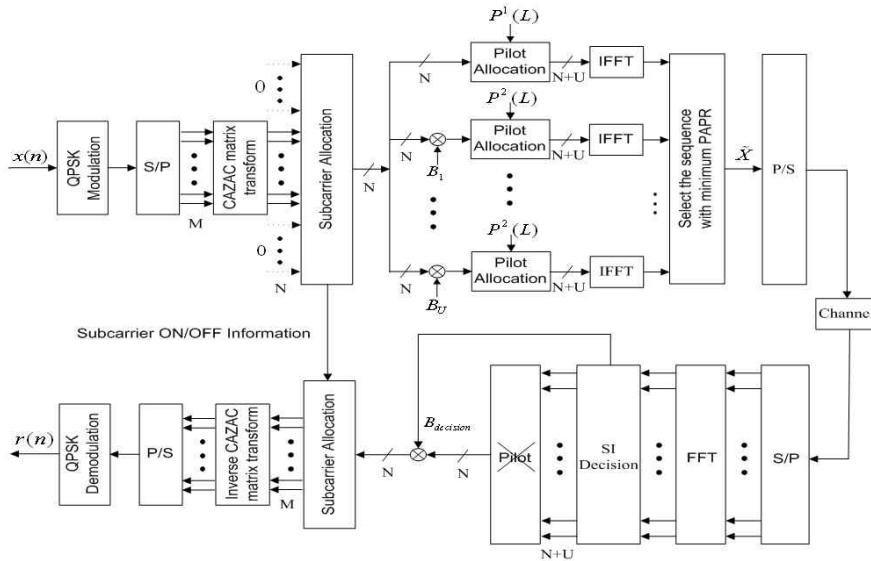


그림 1. 새로운 SLM 기법을 적용한 NC-OFDM 시스템의 블록도
 Fig. 1. Block diagram of NC-OFDM system using new SLM.

2-2 대역 효율을 높이기 위한 새로운 SLM 기법

그림 1은 본 논문에서 제안한 SLM 기법과 comb type pilot을 배치한 CAZAC matrix 변환된 NC-OFDM 시스템의 송·수신 블록도이다. SLM을 거치기 전에 주 사용자(primary user)에 의해 점유되어 비활성화된(deactivated) 부반송파는 0의 입력값으로 채워진다.

제안된 시스템은 그림 2와 같이 주파수 영역에서 부반송파의 배치를 고정하였다. 그림 2에서 활성화된(active) 부반송파는 중앙에 연속적으로 배치되고 비활성화된 부반송파가 양 옆에 위치하게 된다.

SLM은 입력 심볼 시퀀스에 서로 다른 위상 시퀀스를 곱하여 U 개의 서로 다른 데이터 시퀀스를 발생시킨다^[8]. U 개의 신호 사이에서 가장 낮은 PAPR을 갖는 심볼 시퀀스가 전송되며, 선택된 심볼 시퀀스

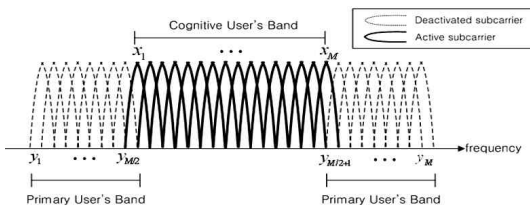


그림 2. 부반송파 배치
 Fig. 2. Subcarrier assignment.

의 위상 시퀀스 인덱스는 부가 정보(side information)로서 전송된다. 그리고 NC-OFDM 신호는 IFFT를 통해 생성된다. 그러나 부가 정보의 사용은 주파수 대역의 손실을 야기하므로 제안된 SLM은 이러한 대역 손실을 개선하기 위해 설계되었다. 추가적인 대역에서 부가 정보의 전송을 하는 대신에 선택되는 데이터 심볼에 따라 다른 comb type pilot를 삽입한다. 식 (3)의 CAZAC matrix 변환된 데이터 심볼은 부반송파 배치를 통해 식 (4)와 같이 재배치된다.

$$X = [0, L, 0, X[1], X[2], L, X[M], 0, L, 0] \quad (4)$$

양 옆의 0의 데이터는 주 사용자에 의해 점유된 비활성화된 부반송파 대역을 의미한다.

U 개의 복사된 심볼 시퀀스 X 는 첫 번째 심볼 시퀀스를 제외하고 서로 다른 위상 회전 시퀀스에 의해 위상 회전된다. 위상 회전 시퀀스 B^u 는 $u+1$ 번째 데이터 심볼에 곱해지는 위상 회전 시퀀스를 의미한다.

$$B^u = [b_1^u, b_2^u, L, b_M^u]^T \quad (5)$$

Pseudo-random 시퀀스, Walsh-Hadamard 시퀀스, Golay 시퀀스, Shapiro-Rudin 시퀀스, OVFS 시퀀스 등 많은 SLM의 위상 회전 시퀀스들이 제안되었다^{[9]~}

[12]. 본 논문에서는 일반적으로 가장 좋은 성능을 보이는 pseudo-random 시퀀스를 사용하였다. Pseudo-random 시퀀스의 각 성분은 식 (6)과 같이 정의된다.

$$b_v^u = e^{+j\varphi_v^u}, \varphi_v^u \in [0, \pi] \quad (6)$$

여기서 $1 \leq v \leq M, 1 \leq u \leq U-1$ 일 때, M 은 입력 심볼 시퀀스의 길이이다. 식 (5)에 식 (6)을 대입하고 위상 회전된 심볼 시퀀스 X_u 은 식 (4)에 식 (5)을 곱하여 생성된다. 이 때, 비활성화된 부반송파는 제외하고 활성화된 부반송파만이 위상이 회전된다.

$$X_u = X \cdot B^u = [0, L, 0, X_u[1], X_u[2], L, X_u[M], 0, L, 0]^T \quad (7)$$

본 논문에서는 활성화된 부반송파 사이에 4개의 comb type pilot을 등 간격으로 배치하였다. Pilot 시퀀스 P^u 는 표 1과 같이 복사된 신호의 수에 따라 선택된다. 위상이 다른 U 개의 pilot 시퀀스는 채널의 추정과 동시에 수신기에 부가 정보를 알려주는 역할을 한다. Pilot이 삽입된 심볼 시퀀스는 IFFT 과정을 거쳐 NC-OFDM 신호 X_{Pu} 로 표현되고, 가장 작은 PAPR을 갖는 신호를 송신한다.

$$X_{Pu} = [X_{Pu}[1], X_{Pu}[2], L, X_{Pu}[N]]^T \quad (8)$$

수신기에서, SI decision 과정은 pilot을 통해 SLM의 부가 정보를 결정한다. 수신된 NC-OFDM 신호는 FFT를 통과한 후에 다음과 같이 표현된다.

$$R_u = X' \cdot B^u = [0, L, 0, X_u'[1], X_u'[2], L, X_u'[M], 0, L, 0]^T \quad (9)$$

이 중 $M=64$ 일 때, 등 간격으로 배치된 pilot을 정리하면,

$$\bar{P}^u = [X'[11] X'[26] X'[39] X'[59]] = [\bar{P}_1^u \bar{P}_2^u \bar{P}_3^u \bar{P}_4^u] \quad (10)$$

이다. 수신된 pilot 시퀀스는 \bar{P}^u 는 경 판정(hard decision) 또는 상호 상관 관계를 통해 송신기에서 선택된 위상 회전 시퀀스의 인덱스를 알 수 있게 된다. 본 논문에서는 복잡도를 낮추기 위해 경판정을 기반으로 하였다. 본 시스템에서 사용된 SLM의 위상은 $[1, -1]$ 만을 가지므로 구해진 인덱스를 통해 수신기에서 이미 알고 있는 위상 회전 시퀀스를 다시 곱하게 되면 원래의 신호로 복조된다.

표 1. 위상 회전 시퀀스의 수(U)에 따른 파일럿 시퀀스

Table 1. Pilot sequence P^u according to the number of phase shift sequence(U).

Pilot sequence	P_1^u	P_2^u	P_3^u	P_4^u
P^1	1	1	1	1
P^2	1	1	-1	-1
P^3	-1	-1	1	1
P^4	-1	1	1	-1
P^5	-1	1	-1	1
P^6	1	-1	-1	-1
P^7	-1	-1	-1	1
P^8	1	-1	1	-1
P^9	-1	1	1	1
P^{10}	-1	-1	-1	-1
P^{11}	1	1	1	1
P^{12}	1	1	1	-1
P^{13}	1	1	-1	1
P^{14}	-1	-1	-1	-1
P^{15}	1	-1	-1	1
P^{16}	-1	-1	1	-1

$$r'(n) = (X' \cdot B^u) \cdot B^u = X' \quad (11)$$

얻어진 신호의 역 CAZAC matrix 변환을 통해 원 신호 $x(n)$ 에 대한 수신 신호 $r(n)$ 을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 pilot을 통한 채널 추정 과정 및 비선형 특성, I/Q imbalance, 위상 잡음 등으로부터 보상 과정은 고려되지 않는다. 그러나, 여전히 부반송파 할당에 대한 정보를 전송하기 위한 추가적인 대역폭의 손실은 존재한다. 수신된 부반송파 할당 정보를 통해 활성화된 부반송파를 추출한다.

III. 시뮬레이션 결과 분석

시뮬레이션을 위한 조건은 표 2와 같다.

그림 3은 comb type pilot 삽입으로 인한 PAPR 증가와 이러한 PAPR을 저감하기 위해 제안된 시스템의 PAPR 성능을 나타낸다.

CAZAC matrix 변환된 NC-OFDM 시스템은 낮은 PAPR을 갖는 것을 확인할 수 있다. 채널 추정을 위한 pilot의 삽입은 2 dB의 PAPR 증가를 가져온다. 새로운 SLM과 CAZAC matrix transform을 결합한 제안

표 2. 시뮬레이션 조건
Table 2. Simulation parameter.

Modulation	QPSK
Total subcarriers	$N=128$
Active subcarriers	64(data subcarriers=60)
Oversampling rate	4
Subcarrier distribution	Contiguously-spaced
Phase rotation sequence	Pseudo-random sequence
Number of phase sequence	$U=4, 8$
Number of pilot	4(6.25 %)

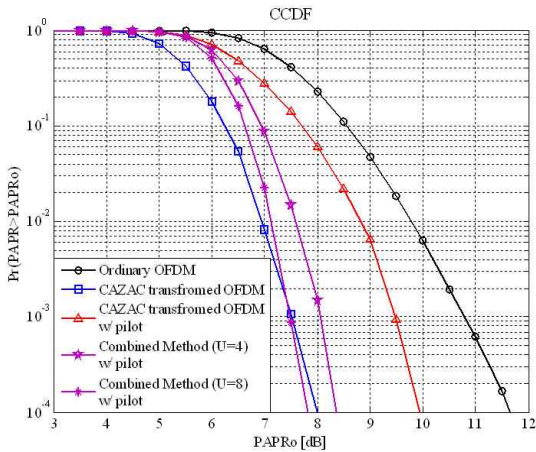


그림 3. 제안된 시스템의 PAPR 저감 효과
Fig. 3. PAPR reduction effect of the proposed method.

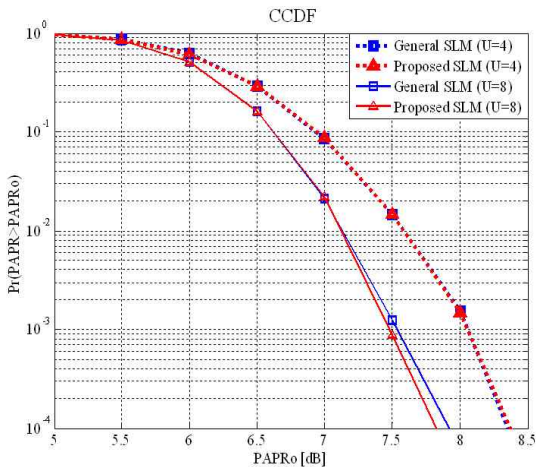


그림 4. 제안된 시스템과 일반적인 SLM의 PAPR
Fig. 4. PAPR of proposed & general SLM method.

된 시스템은 comb type pilot 삽입 전의 CAZAC matrix 변환된 NC-OFDM 시스템과 거의 동일한 PAPR 성능을 보임을 알 수 있다.

제안된 시스템의 새로운 SLM 방식은 그림 4에서처럼 일반적인 SLM과 비교하여 성능의 차이가 없음을 알 수 있다. 제안된 시스템의 환경에서 두 SLM의 PAPR 성능을 비교하였으며, 비록 두 SLM이 각각 서로 다른 pilot 시퀀스를 사용함에도 불구하고 같은 PAPR 저감 효과를 갖는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론

NC-OFDM은 고속의 데이터 전송이 가능하지만 높은 PAPR로 인한 단점을 갖는다. CAZAC matrix transform은 DFT spreading과 같이 뛰어난 PAPR의 저감 방안 중 하나이다. 하지만, 채널 추정을 위한 comb type pilot이 삽입될 경우에 적어도 약 2 dB 정도의 PAPR이 증가하게 된다. 본 논문에서는 CAZAC matrix transform과 부가 정보 전송을 위한 추가적인 대역폭을 사용하지 않는 새로운 SLM 방식을 결합하여 PAPR을 추가적으로 저감하였다. 시뮬레이션 결과에서, 제안된 방식은 효과적인 PAPR 저감 효과를 가지면서도 comb type pilot이 SLM의 위상 회전 시퀀스의 인덱스 정보를 전달함으로써 추가적인 대역폭 손실을 가져오지 않음으로써 무선 통신 시스템에서 대역 효율을 높일 수 있다.

참고 문헌

- [1] R. Rajbanshi, A. M. Wyglinski, and G. J. Minden, "An efficient implementation of NC-OFDM transceivers for cognitive radios", *Proc. Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, Mykonos Island, Greece, pp. 1-5, Jun. 2006.
- [2] J. A. C. Bingham, "Multi-carrier modulation for data transmission: an idea whose time has come", *IEEE Commun. Magazine*, vol. 28, no. 5, pp. 5-14, May 1990.
- [3] P. Ramjee, *OFDM for Wireless Multimedia Communications Systems*, Norwood, MA: Artech House, 2000.
- [4] S. Coleri, M. Ergen, A. Puri, and A. Bahai, "Cha-

nnel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems", *IEEE Trans. Broadcasting*, pp. 223-229, Sep. 2002.

[5] Ahmad R. S. Bahai, Burton R. Saltzberg, and Mustafa Ergen, *Multi-Carrier Digital Communications Theory and Applications of OFDM*, Springer, 2004.

[6] Dong Geon An, Sang Burm Ryu, and Heung-Gyoon Ryu, "Performance improvement of OFDM system using CAZAC sequence and adaptive pre-distorter", *Proc. ISCIT2009*, Incheon, Korea, pp. 1102-1105, Sep. 2009.

[7] Runhe Qiu, Zhongli Wu, and Shan Zhu, "A novel PAPR reduction method in OFDM systems by using CAZAC matrix transform", *Proc. WiCOM '08*, Dalian, China, pp. 1-4, Oct. 2008.

[8] R. Bäuml, R. Fischer, and J. Huber, "Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selected mapping", *IEEE Lett. Electron.*,

vol. 32, no. 22, pp. 2056-2057, Oct. 1996.

[9] Sang-Woo Kim, Jin-Kwan Kim, and Heung-Gyoon Ryu, "A computational complexity reduction scheme using Walsh Hadamard sequence in SLM method", *Proc. ICCAS 2009*, Milpitas, CA, vol. 2, pp. 762-766, Jun. 2006.

[10] H. Ochiai, H. Imai, "OFDM-CDMA with peak power reduction based on the spreading sequences", *Proc. IEEE ICC 98*, Atlanta, Georgia, pp. 1299-1303, Atlanta, Jun. 1998.

[11] S. Boyd, "Multitone signals with low crest factors", *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-33, no. 10, Oct. 1986.

[12] K. Okawa, F. Adachi, "Orthogonal forward link using orthogonal multi-spreading factor codes for coherent DS-SS mobile radio", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E81-B, no. 4 Apr. 1998.

안 동 건



2009년 2월: 충북대학교 전기전자 컴퓨터공학부 (공학사)
 2009년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 무선 통신 시스템, 위성 통신, B3G/4G 이동 통신 시스템, Cognitive

Radio 등

이 승 준



2003년 3월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)
 2003년~현재: LIG 넥스원 주임연구원
 [주 관심분야] 이동형 위성 추적 안테나 제어시스템, 안정화 시스템, 위성 통신

유 흥 균



1988년~현재: 충북대학교 전자공학과 교수
 2002년 3월~2004년 2월: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
 1996년~현재: IEEE, IET 논문 심사위원
 2002년: 한국전자과학회 학술상 수상

2008년: ICWMC 2008 국제학술대회 "Best Paper Award" 수상
 2009년: SPACOMM 2009 국제학술대회 "Best Paper Award" 수상

[주 관심분야] 무선 통신 시스템, 위성 통신, B3G/4G 이동 통신 시스템, 통신 회로 설계 및 통신 신호 처리 등

고 동 국



1986년 9월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1986년~2003년: 금성정밀/LG이노텍 책임연구원
 2003년~현재: LIG 넥스원 수석연구원/팀장
 [주 관심분야] 이동 통신형 위성단말, JTDLS 데이터 링크, MUAV 위성 데이터 링크