

Doherty 전력증폭기의 선형성 개선과 효율 보상 방안에 관한 연구

A Study on Improvement of Linearity and Efficiency Compensation in a Doherty Power Amplifier

장 정 석* 도 지 훈** 윤 호 석** 김 대 희**
(Jeong-Seok Jang) (Ji-Hoon Do) (Ho-Seok Yun) (Dae-Hee Kim)

김 대 응** 홍 의 석***
(Dae-Woong Kim) (Ui-Seok Hong)

요 약

본 논문에서는 Doherty 전력 증폭기의 선형성을 증가시키는 mechanism을 이용하여 선형성을 증가시키고, 선형성 개선으로 인한 효율 감소를 보상할 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 이를 검증하기 위하여 제안된 방법으로 20W급 전력 증폭기를 설계 및 제작하였다. 제작된 class-F를 이용한 3-way 증폭기는 2-way 증폭기보다 선형성이 약 10dBc 개선되었으며, 효율은 1.5% 가량 개선되었다. 또한 3-way 증폭기와 비교하였을 때, 선형 특성은 비슷하였으나, 효율 특성은 약 3.5% 개선되었다.

본 논문에서 제안한 F급 바이어스를 이용한 3-way Doherty 전력 증폭기는 선형성 및 효율 향상에 적합함을 확인할 수 있으며, 향후 다양한 무선 통신 시스템의 전력 증폭기에 적용되리라 기대한다.

Abstract

This paper proposes a method which increases the linearity using an improvement mechanism of Doherty power amplifier and compensates the decrement of efficiency due to improvement of linearity. To verify the method, a 20W power amplifier is designed and implemented. Compared with 2-way Doherty power amplifier, the implemented 3-way Doherty power amplifier with class F shows improved linearity about 10dBc and efficiency about 1.5%. Also, efficiency characteristic has been improved about 3.5% compared with the 2-way Doherty power amplifier while maintaining linearity. This results show that the proposed 3-way Doherty power amplifier with class F is shown to be adequate for improvement of efficiency and linearity. It is expected that the proposed amplifier can be used for various wireless communication system amplifiers.

Key words: IMD, linearization, efficiency, power amplifier

† 본 연구는 2007년도 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

* 주저자 : 광운대학교 전자 공학과 박사과정

** 공저자 : 광운대학교 전자 공학과 박사과정

*** 공저자 : 광운대학교 전자 공학과 정교수

† 논문접수일 : 2009년 2월 17일

† 논문심사일 : 2009년 3월 14일

† 게재확정일 : 2009년 3월 15일

I. 서론

최근 우리나라는 서울 및 부산을 주축으로 한 기존의 14개 주요 도시와 파주 등의 8개 신도시를 포함해 22개의 지역에서 u-city 사업이 추진되고 있다. 이 u-city 사업을 통하여 제공되는 여러 서비스를 실현시키기 위해서는 USN(Ubiquitous Sensor Network) 기술이 필수적이다. 이 사업에 적용 가능한 기술 중 WiBeem은 우리나라가 원천 기술을 보유한 절전형 센서·무선통신 융합기술이다. 이 WiBeem은 비면허 및 무료로 사용가능한 ISM 대역을 사용하며, 기존의 무선 통신이 유선 통신 기술을 백본망으로 사용하여 통신하던 것에서 진보해 통신 범위 내에 있는 모든 USN 기기는 물론 주파수 범위 밖에 존재하는 기기들도 중간에 기기가 존재하면 직접적인 통신이 가능한 큰 장점을 보유하고 있다. 이러한 큰 장점을 이용하여 지능형 교통시스템(ITS)와의 연계를 구축하려는 시도를 보이고 있다 [1-3].

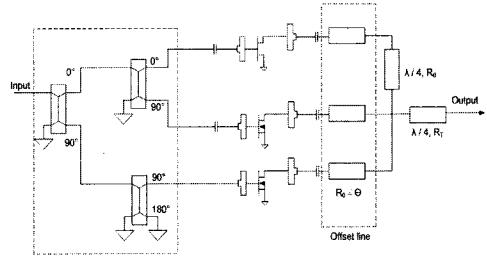
기존의 통신 장비들은 선형성을 가장 중요한 항목으로 취급해 왔으나, 최근 유비쿼터스 실현을 위해 구현되고 있는 통신 기술에서는 그 장비들의 높은 선형성 외에 효율, 안정성을 요구하고 있다.

본 논문에서는 통신 장비 특성에 가장 영향을 많이 미치는 전력 증폭기의 선형성과 효율 개선 방법에 대하여 제안 및 검증하였다. 본 논문에서는 Doherty 구조의 증폭기를 이용하여 선형성을 개선하는 mechanism과 그에 따른 효율 저하에 대한 보상 방법에 대하여 제시하였다.

II. 본론

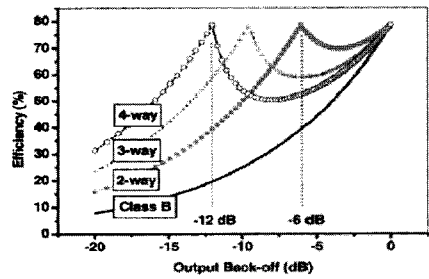
1. 3-way 전력 증폭기

<그림 1>은 일반적인 3-way Doherty 전력 증폭기의 구성도를 나타내며, <그림 2>는 N way Doherty 증폭기의 효율 특성을 나타낸다. <그림 2>와 같이 N의 값이 증가되면서 굴곡이 발생하게 된다. 이러한 원인은 피킹 증폭기의 동작으로 인해 임피던스의 변화가 발생하기 때문인데 효율적인 측면에서는



<그림 1> 일반적인 3-way Doherty 전력 증폭기의 구성도

<Fig. 1> Schematic of the 3-way Doherty power amplifier



<그림 2> N way Doherty 전력 증폭기의 이상적인 효율 특성

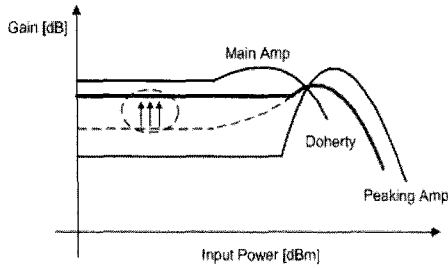
<Fig. 2> Ideal efficiency characteristics of N-way Doherty power amplifier

2-way에 비하여 3-way가 더 우수하다 [4,5].

본 논문에서는 3-way Doherty 전력 증폭기의 선형성을 증가시키는 mechanism을 이용하여 선형성을 증가시키고, 선형성 개선으로 인한 효율 감소를 보완할 수 있는 방법을 제안하였다.

2. 선형성 개선 mechanism

Doherty 전력 증폭기는 일반적으로 주 증폭기와 피킹 증폭기의 바이어스 포인트가 다르다. 피킹 증폭기의 바이어스 포인트는 전력 레벨에 따른 On-off 특성을 얻기 위하여 주 증폭기의 바이어스 포인트보다 낮게 잡는다. 이 때 피킹 증폭기의 바이어스 포인트를 class-B나 class-C라 가정하고, 주 증폭기의 바이어스 포인트를 class-AB라고 가정하면, 다음 <그림 3>과 같은 AM-AM 왜곡 특성을 얻을 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 낮은 전력 레벨에서는 주 증폭기의 부



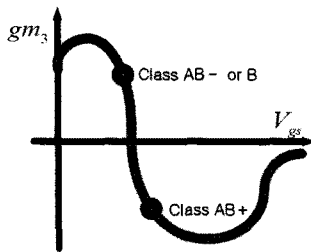
〈그림 3〉 Doherty 전력 증폭기의 AM-AM 특성
 <Fig. 3> AM-AM characteristics of Doherty power amplifier

가 변조되므로, 이득(gain)이 증가한다. 또한 높은 전력 레벨에서는 피킹 증폭기가 커짐으로써 주 증폭기는 포화(saturation)되는 특성을 보상시켜 줌으로써, 증폭기의 AM-AM 왜곡 특성을 개선하게 된다. 이는 이 증폭기의 선형성이 개선됨을 의미한다.

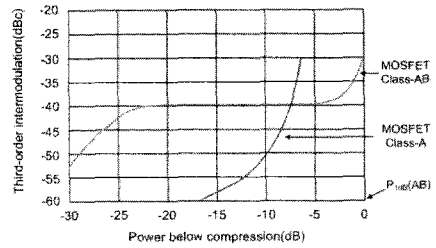
선형성 개선 mechanism을 다른 관점에서 해석할 수 있다. 일반적으로 비선형 능동소자의 특성은 Taylor series를 이용하여 다음 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 이 때 IMD3 전류는 식 (1)의 $gm_3 \cdot v_i^3$ 항에서 만들어진다.

$$I_{out} = gm_1 \cdot v_i + gm_2 \cdot v_i^2 + gm_3 \cdot v_i^3 + \dots \quad (1)$$

IMD3 전류 성분들은 주 증폭기와 피킹 증폭기의 바이어스 포인트를 적절하게 조절함으로써 상쇄시킬 수 있다. <그림 4>는 일반적인 FET의 경우에 gate 바이어스에 따른 transconductance gm_3 의 특성 곡선을 보여준다.



〈그림 4〉 Gate 바이어스에 따른 대신호 gm_3 특성곡선
 <Fig. 4> Large signal gm_3 characteristic by gate bias



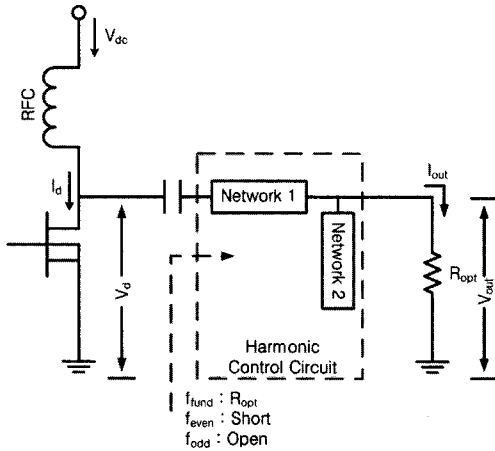
〈그림 5〉 MOSFET의 전력 레벨에 따른 IMD3
 <Fig. 5> MD3 characteristic curve by power level of MOSFET

3-way Doherty 전력 증폭기의 경우에는 주 증폭기의 바이어스 포인트를 class-AB나 class-A 모드로 고정시키고 피킹 증폭기의 바이어스 포인트를 IMD3 전류 성분이 완전히 상쇄가 되도록 바이어스 포인트를 낮추어 준다. 3-way Doherty 전력 증폭기의 경우에는 피킹 증폭기가 2개 있으므로 2-way Doherty 전력 증폭기에 비해 피킹 증폭기의 바이어스 포인트를 높게 가져 갈 수 있다. 그러므로 고차 IMD 항들을 만들어 내지 않고 좀 더 선형적으로 동작시킬 수 있다.

보통 기지국 전력 증폭기의 경우에는 높은 선형성이 요구되고 이러한 선형성 조건을 만족시키기 위해 바이어스 포인트를 class-AB로 놓고 back-off를 하게 된다. 그러나 이 경우 <그림 5>에서 보는 것처럼 IMD3를 -45dBc 이상 얻기 위해서는 P1dB(1dB compression point)에서 25dB 이상을 back-off 해야 한다. 그러나 3-way Doherty 전력 증폭기의 경우에는 이러한 선형성 개선 mechanism을 이용하여 back-off 양을 줄이면서 높은 선형성을 얻을 수 있는 장점이 있다.

3. Class-F 전력 증폭기

Class F 증폭기는 일반적으로 Class B 증폭기의 출력파형을 shaping 함으로써, 전압, 전류 파형의 Overlap을 없앤다. Overlap이 줄어들수록 소자의 Conduction Loss가 감소하게 되어 높은 효율을 달성할 수 있게 된다. 스위치 모드 증폭기는 기본적으로 입력 신호 주기 동안 출력 전압 파형과 출력 전류 파형의 overlap을 없앴으로써 DC 전력 소모를 최소화 하는 방식이다. 이러한 고효율 증폭기는 냉각 시



<그림 6> Class-F 증폭기의 harmonic 제어회로

<Fig. 6> Output equivalent circuit of Class-F power amplifier

시스템의 비용을 절감할 뿐만 아니라 시스템의 부피와 무게를 줄일 수 있다는 장점이 있다.

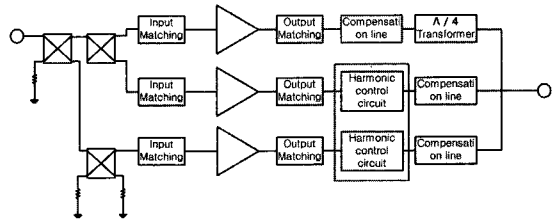
Class-F는 출력 파형의 overlap을 없애기 위해 증폭기가 saturation 되었을 때 harmonic을 제어하는 방식을 채택한다. 이 때 제어되는 harmonic의 수가 많아질수록 효율은 증가하지만 회로가 복잡해지기 때문에 둘 사이의 타협이 필요하게 된다.

<그림 6>은 class-F 증폭기의 harmonic을 제어하기 위한 회로이다. 위 회로에서 network1과 network2는 even harmonics에 대해서는 short가 되고 odd harmonics에 대해서 open으로 동작하게 된다. 한편 기본파에 대해서는 network1이 short가 되고 network2에서는 open이 되기 때문에 결국 R_{opt} 의 부하 임피던스를 보게 된다. 따라서 이를 이용하여 불필요한 harmonics 성분들을 제거할 수 있게 된다.

4. 설계 및 모의실험

일반 3 way Doherty 전력 증폭기와 F급 바이어스를 이용한 Doherty 전력 증폭기를 서로 비교하기 위하여 <그림 7>과 같이 두 가지 경우로 구성을 하였다.

설계된 두 증폭기 모두 동일하게 주 증폭기는 single-ended 구조의 LDMOS를, 피킹 증폭기는 push-pull 형태의 LDMOS를 이용하여 3-way 구조의 고풍출력



<그림 7> 제안된 도허티 전력 증폭기 설계 구성도
<Fig. 7> Design schematic of proposed Doherty power amplifier

<표 1> 설계 사양

<Table 1> Design specification of power amplifier

| 구분 | 사 양 |
|---------------|---------|
| Frequency | 2500MHz |
| Average Power | 20W |
| Gain | >10dB |
| ACLR | >35dBc |
| Efficiency | >30% |

Doherty 증폭기를 설계하였다.

본 논문에서의 설계 사양은 <표 1>과 같다.

3-way Doherty 전력 증폭기와 비교해보기 위해 동일한 소자를 이용하여 단일 구조의 Doherty 증폭기 설계하였다.

다음 <표 2>는 설계된 2-way, 3-way Doherty 전력 증폭기와 3-way class-F Doherty 전력 증폭기의 모의 실험 결과를 정리한 표이다.

<표 2>에서도 알 수 있듯이 3-way Doherty 구조를 사용함으로써, 2-way Doherty보다 선형성이 좋아짐을 알 수 있다. 또한, 제안된 방법으로 class-F를 적용하더라도 일반 3-way Doherty 증폭기와 비슷한 선형성

<표 2> 모의실험 결과 비교

<Table 2> Simulation results

| 구 분 | 효율(%) | 선형성(dBc) |
|-----------------|--------|----------|
| 2-way | 35.21 | -33.527 |
| 3-way | 33.907 | -55.696 |
| 3-way + class-F | 36.596 | -54.019 |

을 유지하면서, 효율은 약 2.5%정도 개선이 됨을 알려준다.

5. 제작 및 측정

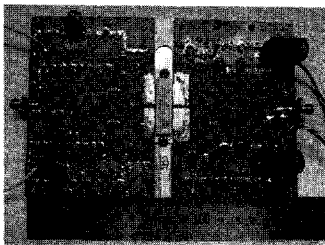
본 장에서는 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 위 설계된 전력 증폭기를 직접 제작하여 그 특성을 비교하였다.

<그림 8>은 제작된 전력 증폭기의 실물도이다.

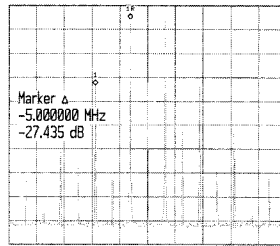
실제 제작을 위하여 비유전율이 3.5, 기판두께 0.030" 인 유전체 기판을 사용하였다.

다음은 제작된 전력 증폭기의 측정 결과에 대한 부분이다. 20W의 출력에서 각각의 2-tone 특성을 살펴보았다. <그림 9>는 각각의 2-tone 신호를 인가하여 출력 전력이 20W에서 나타난 출력 파형이다. 각 tone 신호의 주파수는 2497.5MHz, 2502.5MHz이며 두 tone 차는 5MHz이다.

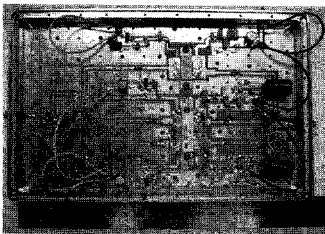
측정된 출력 스펙트럼을 살펴보면, class-F를 이용한



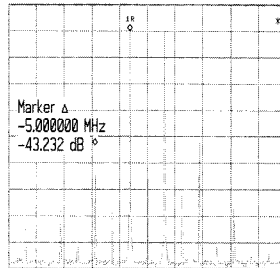
(a) 2-way Doherty 전력 증폭기
(a) 2-way Doherty power amplifier



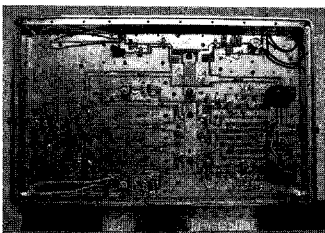
(a) 2-way Doherty 증폭기
(a) 2-way Doherty power amplifier



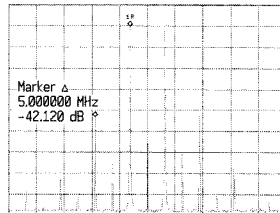
(b) 3-way Doherty 전력 증폭기
(b) 3-way Doherty power amplifier



(b) 3-way Doherty 증폭기
(b) 3-way Doherty power amplifier



(c) Class-F를 이용한 3-way Doherty 전력 증폭기
(c) 3-way Doherty power amplifier with Class-F



(c) Class-F를 이용한 3-way Doherty 전력 증폭기
(c) 3-way Doherty power amplifier with Class-F

<그림 8> 제작된 전력 증폭기 실물도

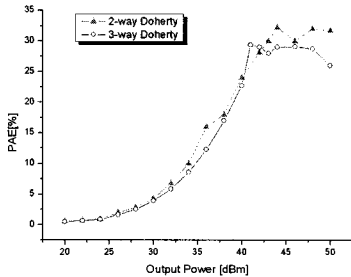
<Fig. 8> Real photograph of implemented power amplifiers

<그림 9> 각 증폭기의 2-tone 출력 스펙트럼

<Fig. 9> PA spectra of implemented power amplifiers

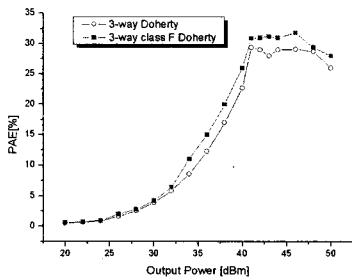
Doherty 전력 증폭기는 3-way Doherty 전력 증폭기와 거의 유사한 IMD3 특성을 보인다. 또한 2-way Doherty 전력 증폭기와 비교했을 때 약 15dBc 가량 개선됨을 확인할 수 있었다.

<그림 10> (a)와 (b)는 각각의 효율 특성을 비교한 것이다. <그림 10(a)>에서는 2-way Doherty 증폭기가 3-way Doherty 증폭기보다 약 1.5% 정도 높은 효율 특성을 가짐을 알 수 있다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 선형성 개선 mechanism을 이용한 선형성 개선에 중점을 두었기 때문으로 분석된다. 또한 <그림 10(b)>에서는 class F를 이용한 Doherty 증폭기는 3-way Doherty 증폭기보다 약 3.2%의 높은 효율 특성을



(a) 2-way Doherty 증폭기와 3-way Doherty 증폭기의 출력에 따른 효율 비교

(a) Comparison of efficiency for output power of 2-way and 3-way Doherty power amplifier



(b) 3-way Doherty 증폭기와 3-way class-F Doherty 증폭기 출력에 따른 효율 비교

(b) Comparison of efficiency for the output power of 3-way and 3-way class F Doherty power amplifier

<그림 10> 출력전력에 따른 효율 비교

<Fig. 10> Comparison of Efficiency for the output power of implemented power amplifiers

<표 3> 측정결과
<Table 3> Measurement results

| 구분 | 2-way | 3-way | 3-way+class F |
|-----------|---------|---------|---------------|
| 이득 [dB] | 15.6 | 14.4 | 13.8 |
| 선형성 [dBc] | -27.435 | -43.232 | -42.120 |
| 효율 [%] | 30 | 28 | 31.5 |

을 가짐을 볼 수 있다. 실험 결과 3-way Doherty 증폭기는 피킹 증폭기의 바이어스와 정합 회로의 조절을 통하여 transconductance gm_3 을 변화시킴으로서 선형성을 개선할 수 있었다. 또한 선형성과 trade-off 관계에 있는 효율 특성의 저하를 class-F를 적용함으로써 저하된 효율을 개선시킬 수 있었다.

다음 <표 3>은 위 측정결과를 정리한 것이다. 측정된 결과는 모의실험 결과와는 약간의 차이를 보인다. 이는 모의실험에서는 3차 하모닉 성분까지만 고려한 점과 출력 결합 시에 생기는 오차에 의해서 나타나는 차이라고 분석된다. 또한 제작 상의 오차도 무시할 수 없을 것이라 생각된다.

Ⅲ. 결 론

본 논문에서는 Doherty 전력 증폭기의 선형성 mechanism에 대한 분석과 그에 trade-off 관계에 있는 효율의 보상방법을 제시하였다. 또한 이를 검증하기 위해서 20W급 전력 증폭기를 설계 및 제작하였다.

그 결과 본 논문에서 제안된 F급 바이어스를 이용한 3-way Doherty 전력 증폭기는 선형성 및 효율 향상에 적합함을 확인할 수 있으며, 향후 다양한 무선 통신 시스템의 전력 증폭기로 적용되리라 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] 한현배, "KT의 부산 u-City 및 인천 IFEZ u-City 구축 사례분석," 한국통신학회지, 제22권, 제7호, pp. 49-66, 2005. 7.
- [2] 정부만, "IT839 정책과 u-City 구현 전략," 한국통신학회지, 제22권, 제7호, pp. 15-25, 2005. 7.
- [3] 지식경제부 성장동력실 정보통신산업정책관 정

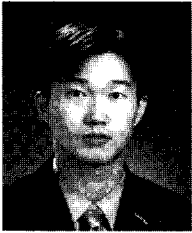
- 보통신표준과, *센서/통신 융합기술(USN)분야 제 1호 국제표준 우리기술로!*, KDI 경제정보센터, 2008. 3.
- [4] S. C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, Artech House, 1999.
- [5] Y. Yang, J. Yi, Y. Y. Woo, and B. Kim, "Optimum design for linearity and efficiency of microwave Doherty amplifier using a new load matching technique," *Microwave Journal*, vol. 44, no. 12, pp. 20-36, Dec. 2001.

저자소개



장 정 석 (Jang, Jeong-Seok)

2008년 : 광운대학교 박사과정 (전파공학과)
2006년 3월 ~ 2008년 2월 : 광운대학교 전파공학과 공학 석사



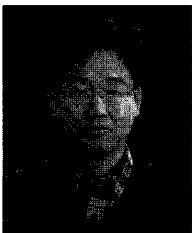
도 지 훈 (Do, Ji-Hoon)

2008년 2월 : 광운대학교 박사과정 수료 (전파공학과)
2004년 3월 ~ 2006년 2월 : 광운대학교 전파공학과 공학 석사



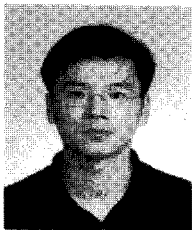
윤 호 석 (Yun, Ho-Seok)

2004년 2월 : 광운대학교 무선통신공학과 대학원 (공학석사)
2004년 2월 ~ 현재 : 광운대학교 전자공학과 대학원 박사과정
1983년 1월 ~ 1998년 10월 : 삼성전자
1998년 10월 ~ 현재 : 삼성SDS 상무



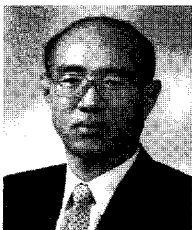
김 대 희 (Kim, Dae-Hee)

2004년 8월 ~ 현재 : 광운대학교 석·박사통합 과정 (전파공학과)
1996년 3월 ~ 현재 : 전자부품연구원 사업기획개발센터실 수석연구원
1994년 3월 ~ 1996년 2월 : (주) 아남전자 TV 개발부 선임 연구원
1993년 8월 ~ 1994년 2월 : (주) 인켈정보기기 사업부 개발팀



김 대 웅 (Kim, Dae-Woong)

2007년 8월 : 광운대학교 박사과정 수료 (전파공학과)
1990년 3월 ~ 1992년 2월 : 광운대학교 전파공학과 공학 석사
2006년 3월 ~ 현재 : (주) 에이스안테나 책임연구원
1999년 2월 ~ 2006년 2월 : (주) 에이스테크놀로지 책임연구원



홍 의 석 (Hong, Ui-Seok)

1982년 11월 독일 Aachen 공대 전자 공학과 공학박사
1973년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자공학부 교수
2002년 5월 ~ 2003년 12월 : 한국ITS학회 초대회장
2001년 1월 ~ 2001년 12월 : 한국통신학회 회장