

전력증폭기의 2-톤과 CDMA 혼변조 특성을 동시에 만족시키는 방법에 관한 연구

A Study on the Method to Satisfy the 2-Tone and CDMA Intermodulation Distortion Characteristics Simultaneously

안효성 · 조속희 · 황문수 · 서태환 · 김병철

Hyo-Seong An · Suk-Hui Cho · Moon-Su Hwang · Tae-Hwan Seo · Byung-Chul Kim

요 약

본 논문에서는 전력증폭기의 2-톤 혼변조 신호와 CDMA ACPR 특성 사이의 관계를 고찰하였으며, CDMA ACPR 특성은 3차 혼변조 신호의 크기보다 5차 혼변조 신호의 크기가 더 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이에 따라 본 논문에서는 전력증폭기가 CDMA ACPR 특성이 규격을 만족하고, 2-톤 특성 중 3차 혼변조 신호가 규격을 만족시키지 못하도록 전력증폭기를 튜닝한 후 선형화기를 사용하여 3차 혼변조 신호만 개선시킴으로써 2-톤과 CDMA 두 가지 신호에서 규격을 만족시키는 방법을 제시하였다. 본 논문에서 제시된 방법을 전력증폭기에 적용한 결과 2-톤 신호의 3차 혼변조 신호는 20 dB, CDMA ACPR 특성은 전체적으로 약 2 dB 개선되어 두 신호에서 전기적 규격을 만족시키는 것을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we investigate the relationship between the intermodulation signal of 2-tone and CDMA spurious emission of HPA. And confirm that the fifth IMD signal of HPA has more important effect upon CDMA ACPR characteristics than the third IMD signal. We present the method for the power amplifier to satisfy the 2-tone and CDMA specification simultaneously, and that is to use the predistorter for improving the third IMD signal of 2-tone for the power amplifier which is tuned to satisfy the CDMA specification and not to satisfy the 2-tone specification. The result by using the method which is presented from this paper shows that the ACPR is improved about 2 dB for CDMA 1FA(frequency allocation) signal and the third IMD signal is improved about 20 dB for CW 2-tone signals and we confirmed the specification is satisfied simultaneously.

Key words : ACPR, Intermodulation Distortion, High Power Amplifier, Predistortion

I. 서 론

전력증폭기의 비선형 특성 검출 방법은 일반적으로 CW 2-톤 신호를 인가할 때 발생하는 혼변조 왜곡 신호의 크기를 측정하거나, CDMA 신호를 인가할 경우 인접채널간의 전력 비를 측정함으로써 알 수 있다. 통상적으로 두 가지 방법 중에 비선형 특성

검출은 전력증폭기의 사용 용도에 따라 한가지 방법을 주로 사용하지만, 최근 중국의 China Unicom.사에서 사용하는 CDMA Tx.에서 생기는 혼변조 신호가 China mobile.사의 GSM Rx.에 영향을 주는 경우가 종종 발생함에 따라 중국향 전력증폭기는 앞의 두 가지 입력 신호에 대한 규격을 모두 만족시켜야 한다. 예로써 중국향 5 W급 전력증폭기의 일반적인

「본 논문은 금오공과대학교 학술 연구비에 의하여 연구된 논문임.」

금오공과대학교 전자통신공학과(Department of Radio Communication Eng., Kumoh National Institute of Technology)

· 논문 번호 : 20030422-065

· 수정완료일자 : 2003년 7월 4일

표 1. 중국향 5 W급 전력증폭기의 일반적인 사양
Table 1. General Spec. of 5 W HPA for China.

항목	규격	비고
Frequency Range	875~885 MHz	
Output Power	5 Watts Avg.	CDMA 1FA 기준
Gain	40 dB ± 1 dB	
Gain Flatness	± 0.5 dB	@Frequency Range
In/Out VSWR	1.5 : 1	
Spurious Emission	±750 KHz -45 dBc ±1.98 MHz -65 dBc	@9CH-CDMA 1FA 5Watts. (30 KHz RBW)
2-Tone IMD	-17 dBm (min)	절대치

사양을 표 1에 나타내었다.

전력증폭기의 비선형 특성을 개선시키는 가장 간단한 방법은 트랜지스터를 A급으로 동작시키고, 1 dB 압축점에서 일정량 이상을 Back-off 시켜서 사용하는 것이다. 하지만 이러한 방법은 효율이 떨어지며, 큰 용량의 트랜지스터를 사용해야 하는 단점이 있다. 따라서 비선형성을 개선하기 위해 Predistortion 방식과 Feedforward 방식 등이 사용되고 있는데 그 중 Predistortion 방식이 많이 사용되고 있다. 그러나, Predistortion 방식은 3차와 5차 혼변조 신호의 크기와 위상을 동시에 맞추기가 어려우므로 두 혼변조 신호를 동시에 개선시킬 수 없는 단점을 갖고 있다^{[1]-[4]}. 본 논문에서는 3차 혼변조 신호와 5차 혼변조 신호중 CDMA 신호의 ACPR특성에 미치는 영향이 큰 혼변조 신호를 살펴보고, 영향이 큰 혼변조 신호의 특성이 좋도록 튜닝하여 CDMA ACPR특성은 규격을 만족하도록 튜닝한 후 Predistorter를 사용하여 두 가지 규격을 모두 만족하도록 하는 방법을 제시하고자한다.

II. 전력증폭기의 2-톤과 CDMA 혼변조 특성

일반적으로 능동 회로의 비선형 전달 특성을 표시하기 위해서는 입력 신호가 $v_i(t)$ 이고, 출력 신호가 $v_o(t)$ 일 때 $v_o(t)$ 는 식 (1)과 같이 Power 시리즈로 나타낼 수 있다.

$$v_o(t) = k_1 A v_i(t) + k_2 A^2 v_i^2(t) + k_3 A^3 v_i^3(t) + \dots \quad (1)$$

이 때, 전력증폭기 입력 $v_i(t)$ 를 동일 진폭의 두 가지 주파수를 가진 2-톤 신호로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$v_i(t) = A(\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 넣어 정리하면 식 (3)과 같이 기본 주파수 외에 DC, 하모닉 주파수 성분, 혼변조 신호 성분 등이 나타나게 된다.

$$\begin{aligned} v_o(t) &= k_1 A(\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) \\ &+ k_2 A^2(\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t)^2 \\ &+ k_3 A^3(\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t)^3 + \dots \\ &= k_2 A^2 + k_2 A^2 \cos(\omega_1 - \omega_2)t \\ &+ \left(k_1 A + \frac{9}{4} k_3 A^3\right) \cos \omega_1 t \\ &+ \left(k_1 A + \frac{9}{4} k_3 A^3\right) \cos \omega_2 t \\ &+ \frac{3}{4} k_3 A^3 \cos(2\omega_1 - \omega_2)t \\ &+ \frac{3}{4} k_3 A^3 \cos(2\omega_2 - \omega_1)t \\ &+ k_2 A^2 \cos(\omega_1 + \omega_2)t + \frac{1}{2} k_2 A^2 \cos 2\omega_1 t \\ &+ \frac{1}{2} k_2 A^2 \cos 2\omega_2 t + \frac{3}{4} k_3 A^3 \cos(2\omega_1 + \omega_2)t \\ &+ \frac{3}{4} k_3 A^3 \cos(2\omega_2 + \omega_1)t + \frac{1}{4} k_3 A^3 \cos 3\omega_1 t \\ &+ \frac{1}{4} k_3 A^3 \cos 3\omega_2 t + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

제작된 전력증폭기에 2-톤 신호를 입력시켰을 때 나오는 출력 신호로부터 주신호, 3차 혼변조 신호, 5차 혼변조 신호등의 크기를 알 수 있으므로, 이렇게 측정된 값들과 식 (3)을 비교하여 k값들을 구할 수 있다. 식 (3)의 혼변조 신호들이 각기 다른 크기와 위상을 가지므로 입력신호의 크기 변화에 따른 k값을 구하기 위해서는 입력의 변화에 따른 출력 신호들의 크기와 위상을 모두 측정해야 하지만 본 논문에서는 평균전력 5 W 출력을 낼 때만을 고려하였으므로 신호 성분들 간의 중첩은 무시하고 출력신호들의 크기만을 고려하여 k값들을 계산하였다.

입력이 CDMA 신호인 경우에는 근사적인 입력 스펙트럼을 이용하여 출력 스펙트럼을 예측할 수 있다. 식 (1)을 Fourier Transform하면 정의에 의해 시간 영역에서의 곱이 주파수영역에서는 convolution으로 나타나게 되므로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 따라서 출력스펙트럼은 입력스펙트럼의 convolution으로 표현이 가능하다. 본 논문에서는 실제 스펙트럼과 형태는 거의 유사하고 convolution과정이 간단한 Rectangular pulse-shaping filter 형태의 입력 스펙트럼을 사용하였다^{[2]-[6]}.

$$V_o(\omega) = k_1 A V_I(\omega) + k_2 A^2 [V_I(\omega) \otimes V_I(\omega)] + k_3 A^3 [V_I(\omega) \otimes V_I(\omega) \otimes V_I(\omega)] + \dots \quad (4)$$

여기서, \otimes :convolution

$$V_I(\omega) \otimes V_I(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} V_I(u) V_I(\omega - u) du$$

MRF 9045를 이용하여 제작된 전력증폭기의 정합 회로는 그대로 둔 채 bias tuning을 통해 각기 다른 bias point에서의 2-톤 특성으로부터 추출한 k값들을 표 2에 제시하였는데 a는 정상적인 튜닝 상태, b는 3차 혼변조신호를 5차 혼변조신호보다 작게 튜닝한 상태이고 c는 3차 혼변조신호는 크더라도 5차 혼변조신호가 작도록 튜닝한 상태이다. 표 2에 제시된 k값들을 이용하여 CDMA 신호의 ACPR 특성을 얻기 위한 시뮬레이션을 수행하였다^[9]. 3가지 데이터 중 표 2에 제시된 바와 같이 전력 증폭기의 2-톤 특성이 5차 혼변조 신호의 크기가 -20 dBm이고 3차 혼변조 신호의 크기가 각각 -18 dBm과 -22 dBm일 때 CDMA 출력 특성을 그림1에 나타내었다. 그림 1에 나타난 바와 같이 3차 혼변조 신호의 크기가 달라져도 CDMA ACPR 특성은 거의 변하지 않는 것을 알 수 있다. 그러나, 3차 혼변조 신호의 크기를 -12 dBm으로 비교적 크게 하되 5차 혼변조 신호의 크기는 -24 dBm으로 줄인 경우와 3차 혼변조 신호는 -18 dBm이고 5차 혼변조 신호는 -20 dBm으로 해 준 경우를 비교하면 ± 750 kHz 부근은 특성이 약간 나빠지지만 ± 1.98 MHz 이상인 지점에서 CDMA ACPR 특성은 더 좋은 것을 그림 2를 통해 알 수 있다.

표 2. 혼변조 신호의 크기에 따른 k값

Table 2. k value according to the amplitude of IM signal.

구분	a	b	c
3rd	-18 dBm	-22 dBm	-12 dBm
5th	-20 dBm	-20 dBm	-24 dBm
k3	0.0211	0.0084	0.0841
k5	0.016	0.016	0.0063

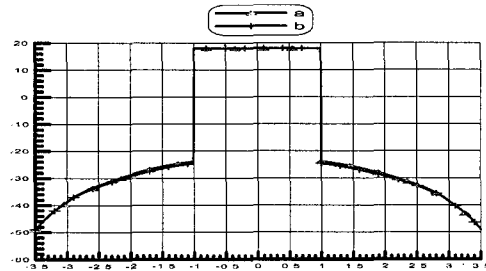


그림 1. 5차 혼변조 신호가 -20 dBm이고 3차 혼변조 신호가 -18 dBm과 -22 dBm인 경우의 CDMA ACPR 특성

Fig. 1. CDMA ACPR characteristics when the amplitude of 5th IM signal is -20 dBm and the amplitude of 3rd IM signals are -18 dBm, -22 dBm, respectively.

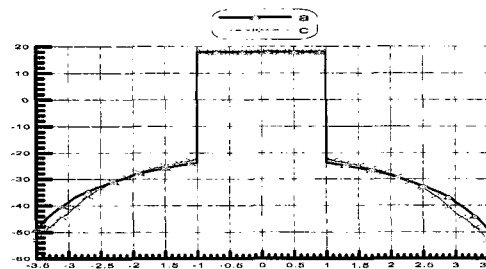


그림 2. 3차 혼변조 신호와 5차 혼변조 신호가 -18 dBm, -20 dBm인 경우와 -12 dBm, -24 dBm인 경우의 CDMA ACPR 특성

Fig. 2. CDMA ACPR characteristics when the amplitude of 3rd and 5th IM signals are -18 dBm, -20 dBm and the amplitude of 3rd and 5th IM signals are -12 dBm, -24 dBm, respectively.

이러한 CDMA ACPR 시뮬레이션 결과로부터, 전력증폭기의 2-톤 특성이 3차 혼변조 신호가 비교적 크더라도 5차 혼변조 신호를 최대한 작게 튜닝하면

실제 CDMA 1FA 입력을 인가할 때 ± 1.98 MHz 지점의 특성이 개선되므로 3차 혼변조 신호만 효과적으로 개선시켜주면 원하는 규격을 만족시킬 수 있음을 알 수 있다.

Ⅲ. 선형화기의 설계

CW 2-톤 신호를 인가할 때 생성되는 혼변조 왜곡 성분들은 각 차수별로 각기 다른 크기와 위상을 가지기 때문에 이들을 효과적으로 제거하려면 개별 차수의 조정이 필요하다. 하지만 이러한 방법은 선형화기의 구조가 복잡해지고 제작비용이 증가하게 된다. 앞 절의 결과를 통해 CDMA ACPR 특성을 예측한 결과 전력증폭기의 5차 혼변조 성분이 최대한 억제되도록 튜닝을 하면, ± 1.98 MHz 지점에서 CDMA ACPR 특성 개선이 많이 되는 것을 보았다. 이러한 경우 전력 증폭기의 3차 혼변조 성분들이 커지게 되므로 3차 성분만 효과적으로 제거해 준다면 원하는 2-톤 규격을 만족시킬 수 있다. 본 논문에서는 FET 하나만을 이용하여 혼변조 신호 발생기를 만들어 그림 3과 같은 선형화기를 제작하였다. FET는 Tri-Quint사의 CLY5를 사용하였으며 정상동작상태보다 낮은 bias 상태에서 동작시킴으로써 원하는 왜곡성분들을 얻어낼 수 있었다.

하이브리드 커플러의 손실을 보상하고, 혼변조 신호 발생기로 들어가는 입력신호를 적절한 크기로 맞추어 원하는 형태의 왜곡 성분을 얻기 위해서 커플러 앞에 증폭기를 사용하였다. 주 경로에는 혼변조 신호 경로와의 시간 지연을 맞추기 위해 약 1.2 ns의 지연선로를 삽입하였으며, 2개의 90° 하이브리드 커플러를 통해서 180°의 위상차를 갖게 하였다. 또 반사형 가변위상변환기를 사용하여 위상차에 대한 미세 조정을 하였다^{[1],[5]}.

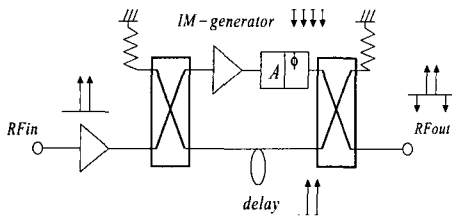


그림 3. 선형화기 블록도
Fig. 3. Block diagram of linearizer.

Ⅳ. 제시된 방법을 적용한 전력증폭기의 출력특성

전력증폭기는 최종단에 모토롤라사의 MRF9045를 사용하여 880 MHz대역에서 37 dBm의 출력을 내도록 설계하였다^{[3],[7],[8]}. 중심주파수 880 MHz인 CDMA 1FA 신호를 인가하여 37 dBm 출력에서 규격을 만족하도록 튜닝 한 결과를 그림 4에 제시하였다. CDMA 1FA 규격을 만족하도록 조정된 전력증폭기에 3FA CDMA신호를 인가한 결과는 그림 5에 제시하였다. 이때 2-톤 신호를 전력 증폭기에 인가한 결과는 그림 6에 제시하였다. 3가지 경우에 피크전력은 다르지만 동일한 평균전력을 출력할 경우에 Spec.을 만족해야 하므로 평균전력이 같은 상황에서 실험하였다.

CDMA 1FA 신호가 인가되었을 때, 중심주파수에서 ± 750 kHz 떨어진 지점에서 약 -38 dBc, ± 1.98 MHz 떨어진 지점에서 약 -52 dBc의 ACPR 특성을 나타내었다. CDMA 3FA(1,4,7 carrier) 신호가 인가되었을 때, 중심 주파수에서 ± 1.98 MHz 지점에

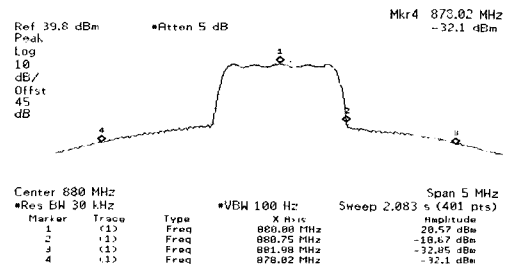


그림 4. CDMA 1FA 신호 입력시 출력 파형
Fig. 4. Output characteristics when the CDMA 1FA signal is applied.

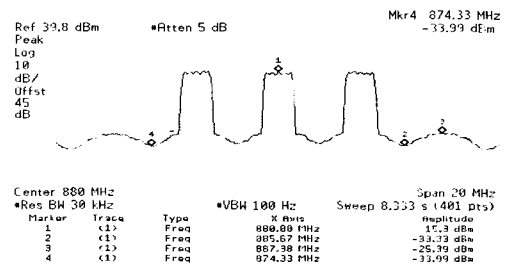


그림 5. CDMA 3FA 신호 입력시 출력 파형
Fig. 5. Output characteristics when the CDMA 3FA signal is applied.

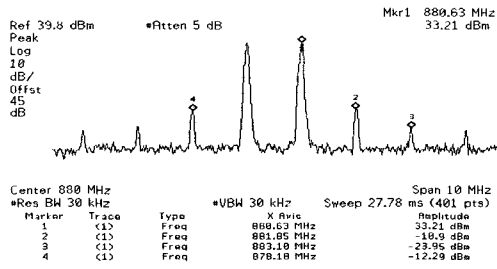


그림 6. 2-톤 신호 입력시 출력 파형
Fig. 6. Output characteristics when the 2-tone signal is applied.

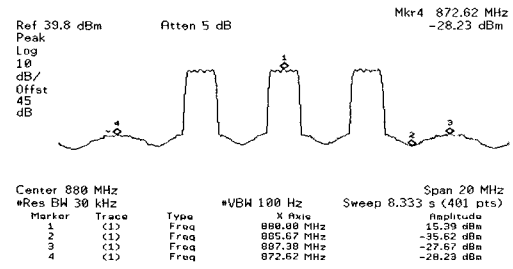


그림 9. 선형화 후 전력증폭기 특성(CDMA 3FA 신호 입력시)
Fig. 9. Characteristics of HPA after the linearization (CDMA 3FA applied).

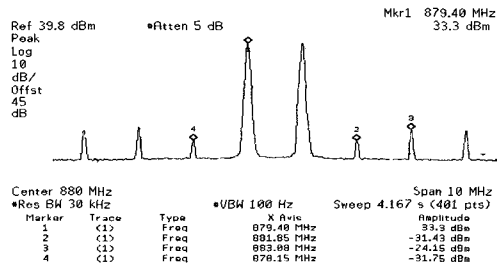


그림 7. 선형화 후 전력증폭기 특성(2-톤 입력시)
Fig. 7. Characteristics of HPA after the linearization (2-tone applied).

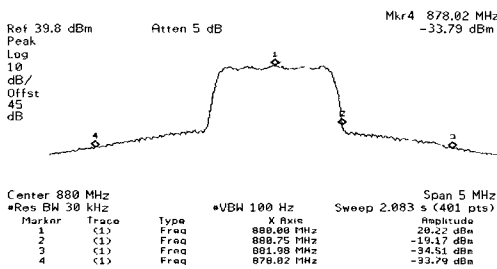


그림 8. 선형화 후 전력증폭기 특성(CDMA 1FA 신호 입력시)
Fig. 8. Characteristics of HPA after the linearization (CDMA 1FA applied).

서 약 -49 dBc로 중국형 전력증폭기의 일반적인 규격을 만족시키는 것을 알 수 있으며, 2-톤 신호를 인가할 때는 3차 혼변조 신호의 절대값이 -10 dBm ~ -12 dBm으로 규격을 만족시키지 못하는 것을 알 수 있다. 이렇게 튜닝된 전력증폭기에 선형화기를 적용한 후 2-톤 신호를 인가한 결과는 그림 7에 제시되었다. 선형화 된 전력증폭기에서 3차 혼변조 신호

는 20 dB 정도 개선되어 규격을 만족하는 것을 확인하였다. 또, CDMA 1FA 신호를 인가한 결과를 그림 8에 제시하였고, CDMA 3FA 신호를 인가한 결과를 그림 9에 제시하였는데, 두 경우 모두 중심 주파수에서 ± 1.98 MHz 떨어진 지점에서 2 dB 정도 개선되어 규격을 만족하는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 전력증폭기의 2-톤 혼변조 신호와 CDMA ACPR 특성의 관계를 고찰하였으며, 2-톤과 CDMA 혼변조 특성을 동시에 만족하도록 하는 방법을 제시하였다. 이러한 규격을 만족시키기 위해서는 전력증폭기를 CDMA 1FA 규격을 만족하도록 튜닝하고, 2-톤 신호 인가시 발생하는 3차 혼변조 신호는 Predistorter 선형화기를 적용하여 제거하는 방법을 사용하였다.

이것의 타당성을 검증하기 위해서 전력 증폭기의 비선형 특성을 나타내는 계수를 추출하여 시뮬레이션으로 CDMA ACPR의 특성을 예측하였고, 출력이 37 dBm인 전력 증폭기를 제작하여 두 가지 신호 입력시 규격을 모두 만족하는 것을 확인하였다. 이때 전력 증폭기의 3차 혼변조 신호는 20 dB 정도 개선되었다. 이것은 온도에 따라 전력증폭기의 특성이 변화해도 충분한 마진을 갖고있는 것이며, CDMA 1FA 및 3FA 특성도 2 dB 정도 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 방법으로 전력 증폭기를 제작하면 쉽게 두가지 신호에 대한 규격을 만족시킬 수 있다.

참 고 문 헌

[1] 조숙희, "DCS용 9-FA 선형전력 증폭기의 선형화를 위한 Predistorter의 설계", 금오공과대학교 석사학위논문, 2000년.
 [2] S. C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, Artech House, 1999.
 [3] N. Pothecary, *Feedforward Linear Power Amplifiers*, Artech House, 1999.
 [4] 김영, "전력 증폭기의 Behavioral 모델링에 의한 선형화기 설계에 관한 연구", 서강대학교 박사학위논문, 2002년.
 [5] Seung June Yi, Sangwook Nam, Sung Hoo Oh and

Hee Han, "Prediction of A CDMA Output Spectrum Based on Intermodulation Products of Jae Two-Tone Test", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 5, May 2001.
 [6] Younggoo Yang, Jaehyok Yi, Joongjin Nam and Bumman Kim, "Behavioral Modeling of High Power Amplifiers Based on Measured Two-tone Transfer Characteristics", *Microwave Journal*, Dec. 2001.
 [7] G. Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design*, Prentice Hall, 1997.
 [8] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Wiley, 1998.
 [9] S. Wolfram, *Mathematica A System for Doing Mathematics by Computer*, Addison-Wesley, 1996.

안 호 성



2002년 2월: 금오공과대학교 전자통신공학과 (공학사)
 2002년 3월~현재: 금오공과대학교 전파통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] RF 회로설계, liner power amplifier 설계

서 태 환



1988년 2월: 금오공과대학교 전자통신공학과 (공학사)
 1990년 2월: 금오공과대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 2000년 4월~현재: 금오공과대학교 전파통신공학과 박사과정
 2003년 4월~현재: (주)유텔 연구소

수석연구원
 [주 관심분야] RF회로설계, liner power amplifier 설계, M/W transceiver

조 숙 희



1999년 2월: 금오공과대학교 전자통신공학과 (공학사)
 2001년 2월: 금오공과대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 2001년 3월~현재: 금오공과대학교 박사과정 수료
 [주 관심분야] microwave & RF 회

로 설계

김 병 철



1980년 2월: 서강대학교 전자공학 (공학사)
 1982년 2월: 서강대학교 전자공학 (공학석사)
 1991년 2월: 서강대학교 전자공학 (공학박사)
 1982년~현재: 금오공과대학교 전

파통신공학과 교수
 [주 관심분야] microwave & RF 회로설계, liner power amplifier 설계, microwave filter 설계

황 문 수



1986년 2월: 금오공과대학교 전자공학과 (공학사)
 1995년 8월: 경북대학교 산업대학원 통신전공 (공학석사)
 1985년 12월~현재: 삼성전자(주) 네트워크사업부
 1999년 2월~현재: 금오공과대학교

전자통신공학과 박사과정

[주 관심분야] 이동통신 시스템, HPA & LPA 선형화