

논문 2007-44TC-3-12

# 디지털 사전왜곡을 이용한 마이크로파 E급 증폭기의 선형성 개선

( Linearity Improvement of Class E Amplifier Using Digital Predistortion )

박 찬 혁\*, 구 경 현\*\*

( Chan Hyuck Park and Kyung Heon Koo )

## 요 약

스위칭 모우드 증폭기를 마이크로파 대역에서 이용하고자 하는 많은 연구가 있으며, 이러한 증폭기 중 E급 증폭기는 이론적으로 스위칭 동작을 통해 100%의 효율을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 2.4GHz 대역 마이크로파 E급 증폭기로 출력 전력이 17.6dBm, 66%의 전력부가효율을 갖는 설계된 증폭기를 무선 랜 송신부에서 사용하기 위해 증폭기의 비선형 왜곡을 보상하고자 테이블 참조기법(Look Up Table)을 이용한 기저대역 사전왜곡 기법을 적용하였다. 설계된 증폭기는 -3dBm의 입력 무선랜 신호를 인가하였을 때 출력스펙트럼 측정 결과가 IEEE 무선랜 스펙트럼 마스크 표준규격을 만족하며, 기저대역 사전왜곡을 적용하였을 때 중심주파수에서 20MHz offset인 주파수에서 최대 5dB의 ACPR 특성이 향상되었다.

## Abstract

Switching mode amplifiers have been studied widely for use at microwave frequency range, and the class E amplifier which is a type of switching mode amplifier offers very high efficiency approaching 100%. In this paper, 2.4GHz microwave class E amplifier with 66% power added efficiency (PAE) and 17.6dBm output has been linearized for use at wireless LAN transmitter, and digital predistortion technique with look up table is applied. With -3dBm input power of wireless LAN, measured output spectrum can meet the required IEEE 802.11g standard spectrum mask, and the digital predistortion output spectrum has been improved by 5dB of ACPR at 20MHz offset from center frequency.

**Keywords :** Predistortion, class E amplifier, switching mode, high efficiency

## I. 서 론

무선통신 시스템이 더욱 다양한 서비스를 제공함에 따라 통신기기들은 소형 경량으로 더 많은 기능을 포함하고 전력소모가 작아 일회 배터리 충전으로 더 오랜 시간 사용이 가능하도록 발전하고 있다. 작은 전력을 이용하여 동작하기 위하여 저전압, 저전력 동작의 소자, 회로 및 시스템 개발이 필요하다. 전력증폭기는 무선통

신시스템에서 큰 전력소모를 갖는 부분이므로 작은 동작전력과 고효율 특성을 갖도록 많은 연구가 이루어지고 있다. E급 전력증폭기는 이론적으로 100%의 전력효율을 갖는 증폭기로 처음 동작 원리가 제시된 이래 Raab등이 간단한 모델을 이용한 이상화된 개념으로 설계에 필요한 수식을 제시하였다. E급 전력증폭기는 작은 전력소모 특성을 가지므로 이에 따라 간단한 열방출회로 및 기구, 높은 신뢰성 확보 등의 이점이 있어 근래 이동통신단말기용으로 큰 관심을 끌고 있다<sup>[1],[2],[3]</sup>.

고효율 특성을 갖는 비선형 전력증폭기를 높은 선형성을 요구하는 시스템에 적용하기 위해서는 큰 back off 를 필요로 한다. 피드포워드, 피드백, 사전왜곡기법

\* 학생회원, \*\* 정회원, 인천대학교 전자공학과  
(Dept. of Electronics Eng., University of Incheon)  
※ 이 논문은 인천대학교 2006년도 자체 연구비 지원  
에 의하여 연구되었음.  
접수일자: 2006년12월12일, 수정완료일: 2007년3월14일

등의 증폭기 선형화 방법으로 선형성을 개선시키면 큰 값의 back off를 감소할 수 있다. 선형화 방법 중 기저 대역 사전 애곡 기법은 RF 대역에서 이루어지는 다른 선형화 기법에 비해 디지털 영역에서 이루어지므로 다양한 응용 및 변화가 가능하며 정확하고 적은 전력소모를 가지는 선형화 방법으로서<sup>[7][8]</sup>, 본 논문에서는 자체 설계 제작된 고효율, 저전압 동작 특성을 갖는 E급 증폭기에 적용하여 선형화 특성 개선을 분석 제시하였다.

본 논문의 II장에서는 E급 전력증폭기의 기본적인 동작 원리 및 특징, III장에서는 전력증폭기의 설계 및 시뮬레이션, 측정 결과에 대해 서술하고 IV장에서는 디지털 사전애곡을 적용한 E급 증폭기의 측정 결과 및 특성 개선에 대해 서술하고, 마지막으로 결론을 V장에 기술하였다.

## II. E급 전력 증폭기의 동작 원리

스위칭모드 증폭기에서는 이상적인 스위치와 같이 능동 소자가 OFF 상태에서는 매우 큰 임피던스를 갖고 ON 상태에서는 작은 임피던스를 갖는다. 전력증폭기 설계시 전력소모를 줄이기 위하여 트랜지스터의 전력 손실을 감소하여야 하며 이를 위하여 트랜지스터가 스위칭 동작을 하여 트랜지스터에 인가되는 전압과 전류를 on/off 시킴으로써 고효율 특성을 얻을 수 있다<sup>[1]</sup>.

그림 1에 고효율 특성을 얻기 위한 트랜지스터의 전압과 전류의 이상적인 과정을 제시하였다. 트랜지스터가 “on” 상태일 때 낮은 저항 값으로 동작하여 높은 전류가 흐르는 반면 전압은 0에 가까운 값을 가지게 되고 “off” 상태일 때는 스위치가 개방되어 큰 전압이 인가되고 전류는 0이 되어 전력소모가 작아지게 된다<sup>[2]</sup>.

그림 2에 E급 전력증폭기의 이상적인 등가회로를 제시하였다. 이 회로는 능동소자인 트랜지스터를 스위치

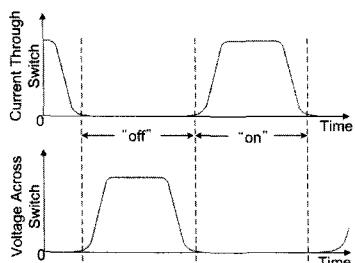


그림 1. 고효율 특성을 위한 트랜지스터의 이상적인 전압과 전류 파형<sup>[1]</sup>

Fig. 1. Conceptual target waveforms of transistor voltage and current for high efficiency<sup>[1]</sup>.

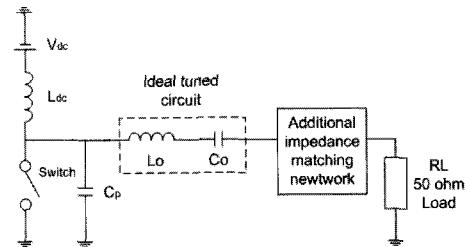


그림 2. E급 전력 증폭기의 이상적인 등가회로<sup>[9]</sup>

Fig. 2. The equivalent circuit diagram of class E amplifier with ideal switch<sup>[9]</sup>.

와 내부 커패시턴스 Cp와 외부 커패시터 Cp을 포함한 Cp와의 병렬 연결로 모델링하였으며, 동작주파수에서 직렬 필터 역할을 하는 L0와 C0, 바이어스 공급을 위한 인더티너 Ldc, 부하저항 RL로 구성되어 있다. 트랜지스터가 이상적인 스위칭 동작을 한다고 가정한다면 스위치가 개방될 때 스위치에 흐르는 전류는 0이 되고 스위치가 단락이 될 때 전압은 0이 된다. 이러한 스위칭 동작으로 트랜지스터의 소모 전력은 0이 된다<sup>[4]</sup>.

스위치가 단락상태일 때 트랜지스터의 내부 커패시턴스 Cp와 외부 커패시턴스 Cp는 처음에 충전되어 있었던 전력을 트랜지스터의 온 저항으로 방전시키며, 스위치가 개방될 때는 에너지는 Cp에 ( $CpVdc^2$ )/2의 크기로 충전되게 된다.

E급 전력 증폭기를 설계하기 위하여 전압 및 전류 패형을 이상적인 형태로 만들고자 할 때, 그 소자 값들은 Sokal 등이 제시하였으며 다음과 같은 계산을 통하여 최적의 값을 유도할 수 있다<sup>[1,9]</sup>.

$$P_o = \frac{V_{dc}^2}{R_{dc}} \quad (1)$$

$$R_{dc} = 1.7337R \quad (2)$$

$$C = \frac{1}{5.4466wR} \quad (3)$$

$$Z = R + jX \quad (4)$$

$$X = 1.152R \quad (5)$$

$$v_{s\max} = 3.56 V_{dc} \quad (6)$$

$$i_{s\max} = 2.84 I_{dc} \quad (7)$$

출력전력  $P_o$ 와 입력전압  $V_{dc}$ 가 주어진 조건에서 출력 쪽 부하 임피던스  $R+jX$ 를 이 식들을 이용하여 계산할 수 있고 마찬가지로 스위칭 동작에 필요한 커패시턴스 Cp값도 나타내고 있다. 또한 스위치가 단락 되었을 때의

최대 전류와 스위치가 개방 되었을 때의 최대 전압도 이들 식에서 구할 수 있다<sup>[9]</sup>.

### III. 증폭기 설계 및 특성 측정

본 논문에서 사용된 무선랜 주파수인 2.4GHz 대역의 E급 전력증폭기는 pHEMT를 사용하여 하이브리드 형태로 제작되었으며, 그림 3 및 4에 설계 및 제작된 E급 전력증폭기의 스키마 및 사진을 제시하였다<sup>[9]</sup>.

설계된 출력단 정합회로는 식(4)의 출력 부하 임피던스 값  $Z$ 를 이용하여 집중정수 소자로 설계하였고 리액-

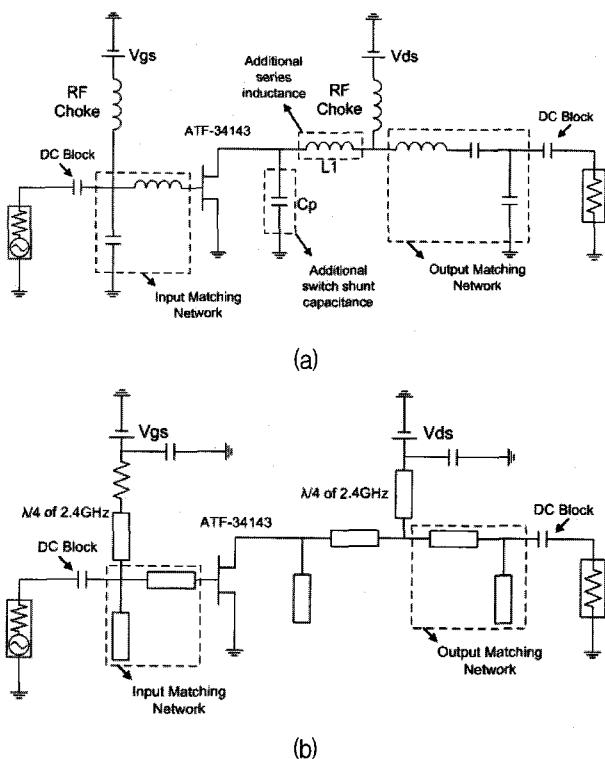


그림 3. E급 전력증폭기 회로도<sup>[9]</sup>.  
 (a) 집중정수소자 (b) 전송선로이용 구현  
 Fig. 3. Schematic of the class E amplifier with  
 (a) lumped element (b) transmission line<sup>[9]</sup>.

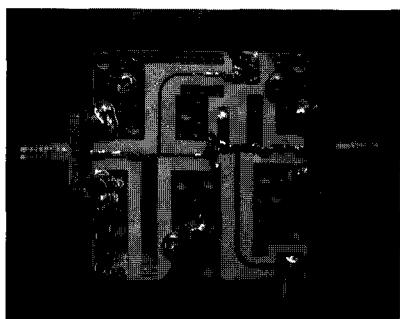


그림 4. 선형화에 사용된 E급 전력증폭기의 사진<sup>[9]</sup>.  
 Fig. 4. Class E amplifier for linearization<sup>[9]</sup>.

턴스 L1은 출력파형의 위상천이를 함으로써 효율을 최적화 시키는 역할을 한다. 트랜지스터 스위칭 동작에 필요한 커패시턴스 값 C를 구하여 상대적으로 작은 값의 트랜지스터 내부 커패시턴스에 부가적으로 외부 커패시턴스 Cp를 추가하였다.

설계된 증폭기의 집중정수소자를 마이크로스트립 선로로 구현하기 위해 직렬 인덕턴스는 높은 임피던스의 직렬 전송선으로로, 병렬 커패시턴스는 적절한 임피던스를 갖는 병렬 개방전송선으로 변환하여 입력 및 출력 단 회로를 설계하였다. 회로 설계는 시뮬레이션을 통해 길이를 최적화하는 과정을 포함하였다. 또한 2.4GHz에서 1/4 파장에 해당되는 마이크로스트립 선로를 바이어스 회로에 적용함으로써 2.4GHz의 고조파 억압 특성을 개선하였다<sup>[5]</sup>.

제작한 전력증폭기의 측정한 출력전력과 전력부가효율 결과를 그림 5에 나타내었다. 입력전력이 작을 때는 선형적인 출력 증가 특성으로 동작하며, 전력부가효율은 입력전력이 증가함에 따라 증가하여 출력  $P_{1dB}$  지점인 17.6dBm에서는 66%의 고효율 특성을 보이는 스위칭 모우드 증폭기로 동작하였다.

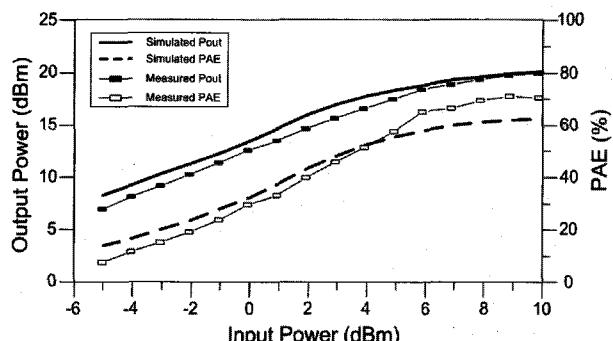


그림 5. 측정 증폭기의 출력과 전력부가효율 특성<sup>[9]</sup>.  
 Fig. 5. PAE and output of the class E power amplifier<sup>[9]</sup>.

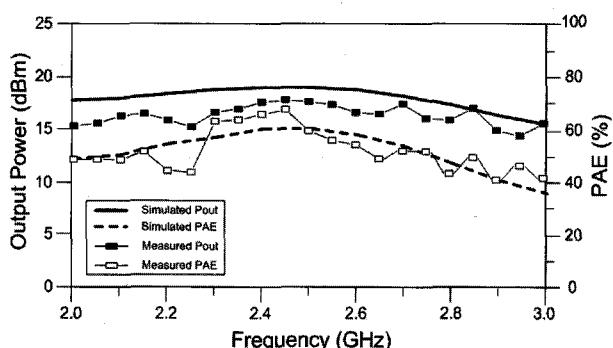


그림 6. 출력, 전력부가효율 시뮬레이션 및 측정<sup>[9]</sup>.  
 Fig. 6. Simulated and Measured PAE and output<sup>[9]</sup>.

그림 6은 출력  $P_{1dB}$  인 경우, 즉 입력 전력이 6dBm일 때 주파수 변화에 따른 출력 전력 및 전력 부가효율을 시뮬레이션하고 실제 측정한 결과로서 2.3GHz에서부터 2.6GHz까지 전력부가효율이 50% 이상의 특성을 보이고 2.4GHz에서 최대 66%의 전력부가효율을 나타내고 있음을 알 수 있다.

#### IV. 디지털 사전왜곡을 이용한 증폭기 특성 개선

2.4GHz 무선 LAN 시스템에서 동작하는 증폭기 특성을 개선하기 위해 시스템 시뮬레이터를 이용하여 OFDM 변조부와 송신부를 구성하였다. 2.4GHz 대역의 OFDM 무선 LAN 시스템에 대한 요구 출력 스펙트럼 특성은 IEEE 802.11g 표준에서 규정하고 있다. 시뮬레이션에서는 2.4GHz OFDM 신호원을 표준안에 근거하여 구성하였으며, 최초 생성된 신호는 64 QAM 변조방식으로 매핑되며 IFFT 처리후 보호구간 (guard interval) 과 파형정형(wave shaping) 단계를 거쳐 I/Q 변조기에 인가되어 RF 송신부로 보내어진다. 이러한 베이스밴드 처리부와 변조부 및 RF 블록을 시스템 시뮬레이터인 ADS로 구현한 모델링 회로도를 그림 7에 나타내었다.

3장에서 언급한 전력증폭기 특성의 선형화를 위하여 디지털 사전 왜곡신호를 만들고 이를 제작된 증폭기에 인가하여 그림 8의 측정시스템을 이용하여 출력 스펙트럼을 측정하는 과정을 진행하였다. 시스템 시뮬레이터에서 구현된 사전 왜곡된 베이스밴드 신호는 GPIB를 통해 벡터 신호 발생기로 인가되어 무선랜 신호를 구현하고 이 신호는 증폭기에 인가된다.

본 논문에서는 그림 9의 구성도에 제안한 바와 같은 테이블 참조방식(LUT, Look Up Table)을 이용한 사전 왜곡 신호를 발생하여 선형화하고자 하였다. 사전 왜곡기는 입력신호의 위상과 진폭을 조정하는 복소 이득 조정기 (complex gain adjuster)를 포함하고 있으며, 측정된 증폭기의 AM-AM 및 AM-PM 비선형 데이터를 이용하여 구성하는 참조테이블은 왜곡 보상값으로 사용된다. 이 때 입력신호의 진폭값을 계산하여 참조테이블의 주소로 사용한다<sup>[7]</sup>.

기저대역 사전왜곡기의 성능은 비선형 특성과 정확하게 역이 되는 신호를 모델링하여 인가하는 데에 있다. E급 전력증폭기의 비선형 왜곡특성인 AM-AM, AM-PM 왜곡특성을 추출하여 원하는 사전 왜곡신호를 생성하기 위해서는 단일 주파수 인가에 의한 측정 방법

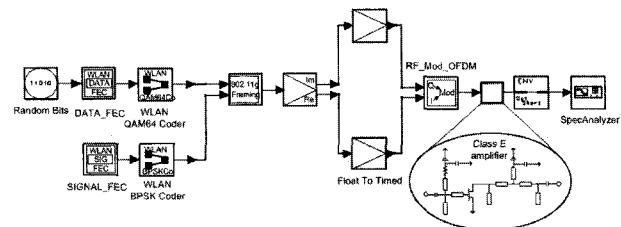


그림 7. 시뮬레이션을 위하여 구현한 송신부의 베이스 밴드, 변조부, RF 블록 모델링

Fig. 7. Baseband, modulator and RF block modeling of transmitter for simulation.

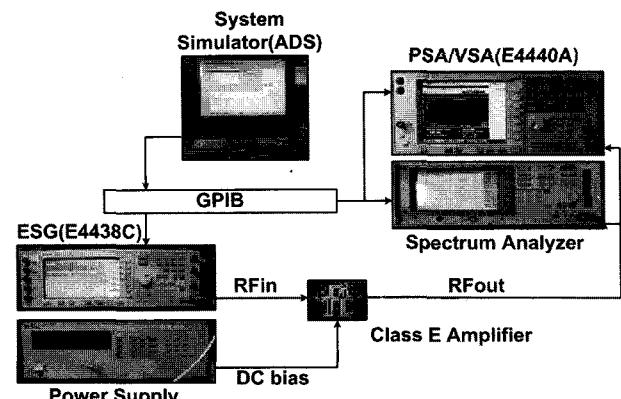


그림 8. 측정을 위한 시스템 구성도

Fig. 8. Block diagram of the measurement system.

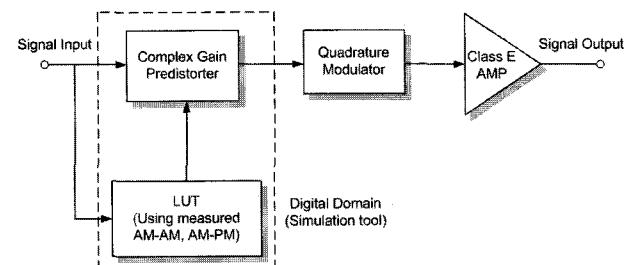


그림 9. 기저대역 사전왜곡을 위한 구성도

Fig. 9. Block diagram of digital baseband predistortion.

보다는 무선 랜(802.11g) 신호원을 E급 전력증폭기에 인가하여 AM-AM, AM-PM 왜곡특성을 추출하는 것이 바람직하다. 그림 10에 제안한 측정 시스템 구성을 이용하여, 무선 랜 신호를 본 논문에서 제작한 E급 전력증폭기에 인가하여 측정한 AM-AM 및 AM-PM 측정 특성을 제시하였다.

그림 11에 54Mbps 전송속도를 가지는 64-QAM 변조방식의 경우에 사전왜곡 처리를 한 경우와 그렇지 않은 경우의 I/Q 성상도와 EVM 측정 결과를 제시하였다. 이 값들은  $P_{1dB}$  전력의 경우에 측정한 결과로, 기저대역 사전왜곡 신호를 인가한 경우의 EVM은 5.70%로 사전왜곡 신호를 인가하기 전의 7.96%보다 2.26% 개선된 특성을 보이고 있다. 이상의 결과에서 설계된 E급 전력

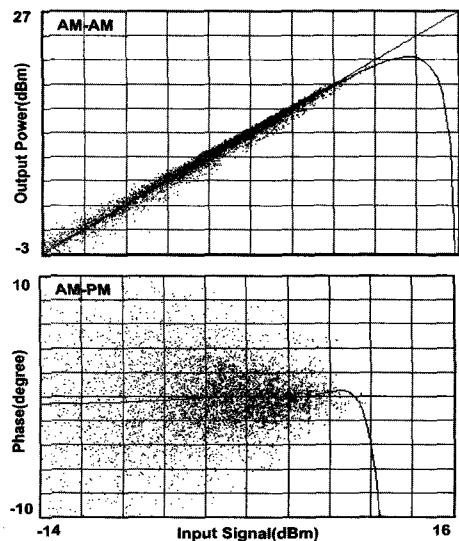


그림 10. 증폭기의 AM-AM 및 AM-PM 측정결과  
Fig. 10. Measured AM-AM and AM-PM of the amplifier.

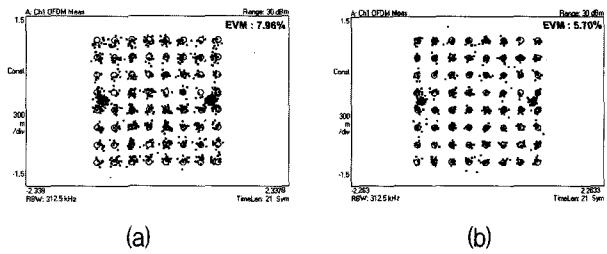


그림 11. E급 전력증폭기의 EVM 및 I/Q성상도 측정결과  
(a) 기저대역 사전왜곡 신호 인가 전  
(b) 인가 후.  
Fig. 11. Measured EVM and I/Q constellation of class E amplifier.  
(a) Without predistortion (b) With predistortion

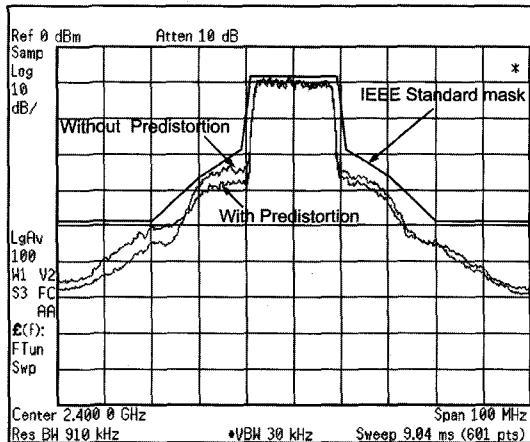


그림 12. 기저대역 사전왜곡 신호 인가 전과 후의 E급 전력증폭기의 출력스펙트럼 측정결과.  
Fig. 12. Measured output spectrum of class E amplifier with/without predistortion.

증폭기는 P1dB의 출력에서는 표준이 요구하는 스펙트럼 마스크를 만족하지 못하며 상당한 크기의 백오프

(back off)를 하여야만 스펙트럼 규격을 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

증폭기에 인가하는 무선 랜 신호의 크기를 변화시키며 설계된 전력증폭기에 인가했을 때 요구 스펙트럼 마스크를 만족하는 입력 신호는 -3dBm이었으며, 이 경우 제작한 E급 전력증폭기에 기저대역 사전왜곡 신호를 인가한 전과 후의 출력스펙트럼을 그림 12에 제시하였다. 기저대역 사전왜곡을 적용하였을 때 중심 주파수에서 20MHz offset인 주파수에서 최대 5dB의 ACPR 특성이 개선됨을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 pHEMT 및 마이크로스트립 선로로 설계하고 구현된 무선랜용 E급 전력증폭기를 사전왜곡 기법을 이용하여 선형화하였다. 이용된 E급 증폭기는 2.4GHz 중심주파수에서 출력 전력인 17.6dBm에서 66%의 전력부가효율 및 11.6dB의 이득을 나타내었으며, 출력스펙트럼의 특성을 분석한 결과 P1dB에서 최대 9dB 백오프한 -3dBm 입력신호에서 IEEE 802.11g의 스펙트럼 마스크 규격을 만족하는 것을 알 수 있다. 이때 시뮬레이터에서 구현한 사전왜곡 신호를 인가한 경우 중심 주파수에서 -20MHz offset인 주파수에서 5dB의 ACPR 특성이 개선되었고 EVM 측정결과는 2.26% 개선되었다. 향후 IMD3의 비대칭성 및 추가적인 특성 개선을 위해 적응형 사전왜곡 기법을 이용한 선형화 관련 연구가 필요하다고 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] F. H. Raab, "Idealized operation of the class E tuned power amplifier," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-25, pp. 725-735, Dec. 1977.
- [2] N. O. Sokal and A. D. Sokal, "Class E-a new class of high-efficiency tuned single ended switching power amplifiers," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. SC-10, pp. 168-176, Jun. 1975.
- [3] W. F. H. Raab, "Effects of circuit variations on the class E tuned power amplifier," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. SC-13, pp. 239-247, Apr. 1978.
- [4] Y. Qin, S. Gao and A. Sambell, "Design of low cost broadband class-E power amplifier using low voltage supply," *High Frequency Postgraduate Student Colloquium*, pp. 101-106, Sept. 2004.

- [5] A. J. Wilkinson and J. K. A. Everard, "Transmission line load-network topology for class-E power amplifiers," *IEEE Trans. MTT*, vol. 49, pp. 1202–1212, Jun. 2001.
- [6] F. Wang, A. Ojo, D. Kimball, P. Asbeck, and L. Larson, "Envelope tracking power amplifier with predistortion linearization for WLAN 802.11g," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 3, pp. 1543–1546, Jun. 2004.
- [7] N. Ceylan, J. E. Mueller, T. Pittorino, R. Weigel, "Mobile phone power amplifier linearity and efficiency enhancement using digital predistortion," *European Microwave Conference*, vol. 1, pp. 269–272, Oct. 2003.
- [8] W. J. Kim, S. P. Stapleton, J. H. Kim, C. Edelman, "Digital predistortion linearizes wireless power amplifiers," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 6, pp. 54–61, Sept. 2005.
- [9] 박찬혁, 구경현 "무선 LAN용 고효율 E급 증폭기 설계," *대한전자공학회 논문지 TC*, vol. 43, pp. 91–96, August. 2006.

---

### 저 자 소 개

---



박 찬 혁(정회원)  
2005년 인천대학교 전자공학과  
학사  
2007년 인천대학교 전자공학과  
석사  
<주관심분야 : 마이크로파 회로  
및 모듈 설계, 전력증폭기 선형화>



구 경 현(정회원)  
1981년 서울대학교 전자공학과  
학사  
1983년 서울대학교 전자공학과  
석사  
1991년 서울대학교 전자공학과  
박사  
1999년~2000년 UC San Diego 방문학자  
2001년~2002년 대한전자공학회 마이크로파 및  
전파연구회 위원장  
2003년~현재 대한전자공학회 이사  
통신소사이어티 이사, 부회장, 회장  
1987년~현재 인천대학교 전자공학과 교수  
<주관심분야 : 마이크로파 회로 및 모듈 설계, 전  
력증폭기 선형화, 무선랜 시스템>