

논문 2006-43TC-8-10

무선 LAN용 고효율 E급 증폭기 설계

(Design of a High Efficiency Class E Amplifier for Wireless LAN)

박 찬 혁*, 구 경 현**

(Chan Hyuck Park and Kyung Heon Koo)

요 약

스위칭모드로 동작하는 증폭기는 수 MHz대역이상의 주파수에서 고효율의 특성을 가지고 있다고 알려져 있으며, 이러한 스위칭모드 증폭기 중 E급 증폭기는 이론적으로 스위칭 동작을 통해 100%의 효율을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 회로 시뮬레이터를 이용한 하모닉 밸런스 해석을 통해 E급 증폭기를 설계하였다. 설계된 증폭기는 pHEMT 및 마이크로스트립선로로 구현하였으며, 제작된 E급 증폭기는 2.4GHz에서 출력전력이 17.6dBm일 때 66%의 전력부가효율을 가진다. 이 증폭기는 -3dBm의 입력 무선랜 신호를 인가하였을 때 출력스펙트럼 측정 결과가 무선랜 스펙트럼 마스크 표준규격을 만족한다. 즉, P_{1dB} 의 출력스펙트럼은 요구 스펙트럼 마스크를 만족하지 못하며 9dB back off을 하였을 때 요구 스펙트럼을 만족하는 결과를 나타내었다.

Abstract

High efficiency switching mode circuits such as class E amplifiers have been well known in the MHz frequency range. The class E amplifier is a type of switching mode amplifier offering very high efficiency approaching 100%. In this paper, the class E amplifier has been designed by using the harmonic balance method of circuit simulator. The designed amplifier is realized by using pHEMT and microstrip line, shows 66% power added efficiency (PAE) at 2.4GHz with 17.6dBm output power. With -3dBm input power of wireless LAN, measured output spectrum can meet the required IEEE 802.11g standard spectrum mask. That means the required amplifier back off of 9dB from P_{1dB} to satisfy the required wireless LAN spectrum mask.

Keywords : class E amplifier, pHEMT, switching mode, high efficiency

I. 서 론

최근 무선통신 시스템이 다양한 서비스를 제공함에 따라 무선통신기기들은 더욱 많은 기능을 포함하며 크기는 작고 낮은 소모 전력으로 오랜 배터리 수명이 가능하도록 발전하고 있다. 낮은 소모 전력을 위하여는 저전압 동작의 소자 및 회로 개발이 필요하다. 전력증폭기는 통신시스템에서 큰 전력소모를 가지는 부분이므로 낮은 동작전압과 고효율특성을 가지도록 설계를 해야 한다.

E급 전력증폭기는 이론적으로 100%의 전력효율을 갖는 증폭기로 Sokal이 처음 원리를 제시하였고 Raab은 간단한 모델을 이용한 이상화된 기본개념으로 설계 수식을 유도하였다. E급 전력증폭기는 다른 종류의 전력증폭기에 비해 작은 전력소모를 갖으며 이에 따라 간단한 열방출, 높은 신뢰성등의 이점이 있어 최근 이동통신단말기용으로 큰 관심을 끌고 있다^{[1],[2],[3]}.

본 논문에서는 무선 랜에 응용하기 위한 고효율, 저전압 동작 특성을 갖는 E급 증폭기를 설계하고 출력스펙트럼 특성을 분석 제시하고자 하였다. 본 논문의 II장에서는 E급 전력증폭기의 기본적인 개념과 특징, III장과 IV장에서는 설계 및 시뮬레이션, 측정 결과에 대해 서술하고 마지막으로 결론을 V장에 기술하였다.

* 학생회원, ** 정회원, 인천대학교 전자공학과
(Dept. of Electronics Eng., University of Incheon)
접수일자: 2006년5월4일, 수정완료일: 2006년8월18일

II. E급 전력 증폭기의 동작원리

스위칭모드 증폭기에서는 능동 소자가 이상적인 스위치와 같이 OFF 상태에서는 매우 높은 임피던스를 갖고 ON 상태에서는 작은 임피던스를 갖도록 설계하게 된다. 전력증폭기에서 효율을 높이기 위하여서는 전력 소모를 줄여야 하는데, 전력증폭기에서는 트랜지스터의 전력소모가 크기 때문에 트랜지스터가 스위칭 동작을 하도록 하여 트랜지스터에 흐르는 전압과 전류를 on/off 시킴으로써 고효율 특성을 얻을 수 있다^[1].

그림 1 은 고효율 특성을 얻기 위한 트랜지스터 전압과 전류의 이상적인 파형이다. 트랜지스터가 “on” 상태일 때 낮은 저항 값을 갖는 것처럼 동작하여 높은 전류가 흐르는 반면 전압은 0에 가까운 값을 가지게 되고 “off” 상태일 때는 스위치가 개방되어 높은 전압이 걸리며 전류는 0인 값을 가지게 된다^[2].

그림 2 는 E급 전력증폭기의 기본 등가회로이다. 이 회로는 능동소자인 트랜지스터를 스위치와 내부 커패시턴스 값과 외부 커패시터 값을 포함한 Cp, 동작주파수에서 이상적인 직렬 필터역할을 하는 Lo와 Co, 리액턴스 Ldc, 부하저항 RL 로 구성되어있다. 트랜지스터가 이상적인 스위칭 동작을 한다고 가정한다면 스위치가 개방될 때 스위치에 흐르는 전류는 0이 되고 스위치가 단락이 될 때 전압은 0이 된다. 이러한 스위칭 동작으로 트랜지스터에서 소모되는 전력은 0이 된다^[4].

스위치가 단락상태일 때 트랜지스터의 내부 커패시턴스 값과 외부 커패시턴스 값을 포함한 Cp는 처음에

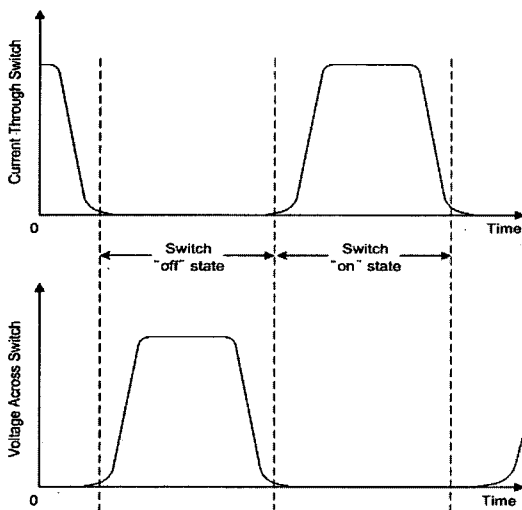


그림 1. 고효율 특성을 위한 트랜지스터의 이상적인 전압과 전류 파형^[1]
 Fig. 1. Conceptual target waveforms of transistor voltage and current for high efficiency^[1].

충전되어있었던 전력을 트랜지스터의 온 저항으로 방전시키고 스위치가 개방될 때 Cp는 $(C_p V_{dc}^2)/2$ 로 충전될 것이다.

E급 전력 증폭기를 설계하기위하여 전압 전류 파형을 이상적인 형태가 되도록 하기 위해 그 소자 값들을 다음과 같은 계산을 통하여 최적의 값을 유도할 수 있다^[1].

$$P_o = \frac{V_{dc}^2}{R_{dc}} \tag{1}$$

$$R_{dc} = 1.7337R \tag{2}$$

$$C = \frac{1}{5.4466\omega R} \tag{3}$$

$$Z = R + jX \tag{4}$$

$$X = 1.152R \tag{5}$$

$$v_{s\max} = 3.56V_{dc} \tag{6}$$

$$i_{s\max} = 2.84I_{dc} \tag{7}$$

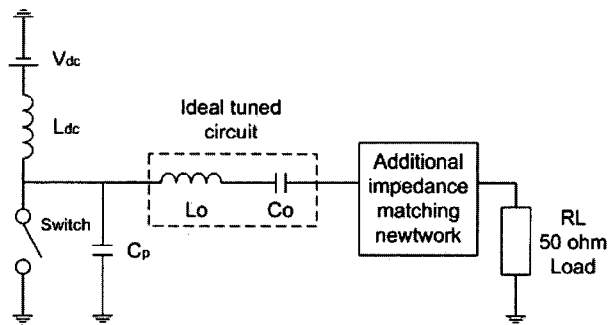


그림 2. E급 전력 증폭기의 이상적인 등가회로
 Fig. 2. The equivalent circuit diagram of class E amplifier with ideal switch.

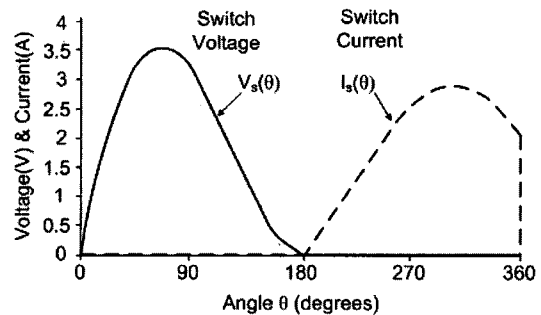


그림 3. 출력전력 1W이고 입력전압 1V일 때 스위치의 이상적인 전압과 전류 파형^[5]
 Fig. 3. Class E amplifier switch waveform.

출력전력 P_o 와 입력전압 V_{dc} 가 주어진 조건에서 출력쪽 부하 임피던스 $R+jX$ 를 식(1)(2)(4)(5)를 이용하여 계산할 수 있고 식(3)은 스위칭 동작에 필요한 커패시턴스 값을 나타낸다. 또한 스위치가 단락 되었을 때의 최대 전류 i_{smax} 와 스위치가 개방 되었을 때의 최대 전압 v_{smax} 를 식(6)(7)을 통해 구할 수 있다. 출력전력이 1W이고 입력전압이 1V일 때 스위치의 이상적인 전압과 전류 파형을 그림 3에 나타내고 있다.

III. 증폭기 설계 및 시뮬레이션

본 논문에서는 E급 전력증폭기를 무선랜 주파수인 2.4GHz 대역에서 동작하도록, Agilent 사의 pHEMT를 사용하여 하이브리드 형태로 설계하였다. 그림 4에 설계한 E급 전력증폭기의 회로도를 제시하였다.

그림 4(a)에서 출력단 정합회로는 식(4)의 출력 부하 임피던스 값 Z 를 이용하여 집중정수 소자로 설계하였고 리액턴스 $L1$ 은 출력파형의 위상천이를 함으로써 효율을 최적화 시키는 역할을 한다. 식(3)에서 트랜지스터 스위칭 동작에 필요한 커패시턴스 값 C 를 구하여 상대적으로 작은 값의 트랜지스터 내부 커패시턴스에 부가적으로 외부 커패시턴스 C_p 를 적용하였다.

본 논문에서 E급 전력증폭기를 마이크로스트립 선로로 구현하기 위해 식 (8)을 이용하여 집중정수 소자로 설계한 회로의 직렬 인덕턴스는 고 임피던스의 직렬 전송선로로 변환하고 병렬 커패시턴스는 병렬 개방전송선로로 변환하여 입력 및 출력단 회로를 설계하였고 시뮬레이션을 통해 길이를 최적화 하였다. 그리고 2.4GHz의 $\lambda/4$ 에 해당되는 마이크로스트립 선로를 바이어스 회로에 적용함으로써 2.4GHz의 고조파 억압 특성을 개선하였다^[5].

$$L = \frac{Z_0 \times EL}{f \times 360}, C = \frac{EL}{Z_0 \times f \times 360} \quad (8)$$

EL : Electrical Length (degree)

이상의 방법으로 설계된 증폭기를 회로설계 시뮬레이터에의 하모닉 밸런스 방법을 이용하여 E급 전력증폭기의 전력부가효율, 출력전력, 이득, 스위칭 파형을 시뮬레이션하여 그 특성을 분석하였다.

증폭기의 동작전압은 저전압 동작이 가능하도록 1.8V를 선정하였으며, $V_{ds}=1.8V$ 에서 입력 P_{1dB} 전력인 6dBm을 인가하였을 때, E급 전력증폭기의 드레인 전압

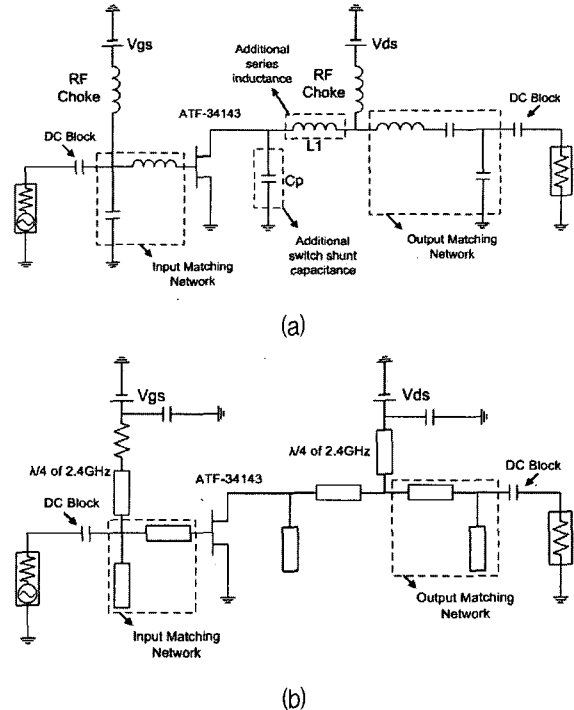


그림 4. E급 전력증폭기 회로도

(a) 집중정수소자 (b) 전송선로

Fig. 4. Schematic of the class E amplifier with (a) lumped elements (b) transmission line.

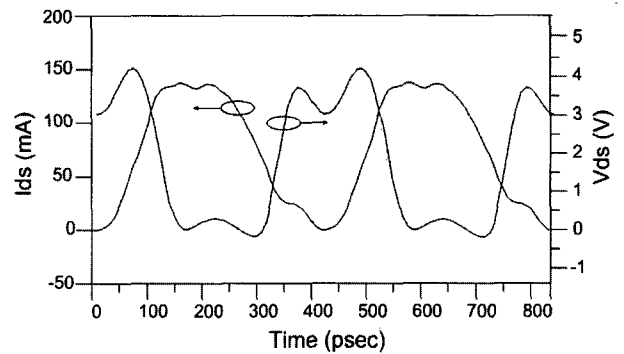


그림 5. E급 전력증폭기의 드레인 전압과 전류 파형

Fig. 5. Simulated drain voltage and current waveform of class E amplifier.

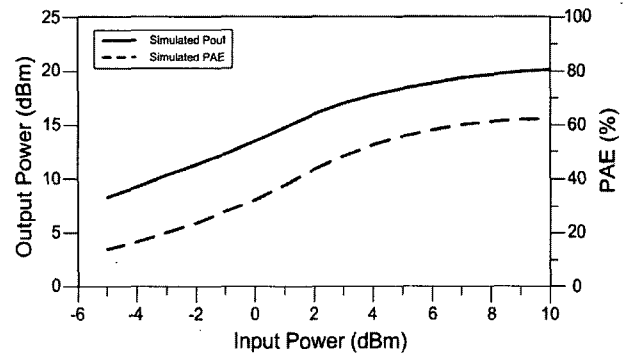


그림 6. 출력전력과 전력부가효율 시뮬레이션 결과

Fig. 6. Simulated power added efficiency and output power of the class E amplifier.

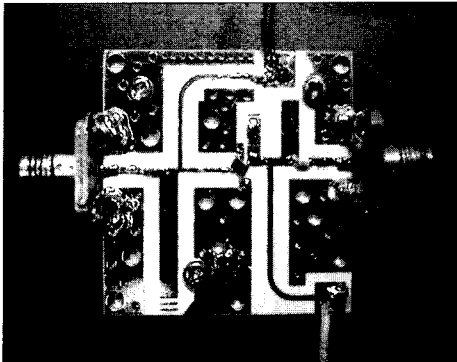


그림 7. 제작된 E급 전력증폭기의 사진
Fig. 7. Photograph of the class E amplifier.

과 전류 V_{ds} 와 I_{ds} 의 시뮬레이션된 출력 파형을 그림 5에 나타내었다. 증폭기의 전압 파형과 전류 파형을 비교하여 보면 스위치에 최대 전압이 흐를 때 전류는 0값에 가깝고 최대 전류가 흐를 때 전압이 0에 가까운 값을 가지고 있어 트랜지스터의 스위칭 동작을 확인할 수 있다. 그림 6은 $V_{ds}=1.8V$ 일 때, 전력 증폭기의 출력과 전력부가효율의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 입력 P_{1dB} 는 6dBm이고 이 때 출력전력은 18.7dBm이며 이득은 12.7dB이고 전력부가효율은 약 58%를 나타내고 있다.

IV. 증폭기의 제작 및 특성 측정

설계된 전력증폭기는 유전율 3.48, 두께 1.016mm 인 기판을 이용하여 제작하였으며, 그림 7에 제작된 E급 증폭기의 사진을 제시하였다.

제작한 전력증폭기의 출력전력과 전력부가효율을 측정한 결과를 그림 8에 나타내었다. 입력전력이 낮을 때는 선형적 출력특성을 가지며 동작하고 전력부가효율은 입력전력에 따라 증가하여 출력 P_{1dB} 지점인 17.6dBm에서는 66%의 고효율 특성을 보이는 스위칭 모드 증폭기로 동작하는 것을 확인할 수 있다.

입력 P_{1dB} 전력인 6dBm을 인가하고 2.4GHz 단일 주파수에 대한 시뮬레이션 결과 -28.8dBc의 2차 고조파와 -40.3dBc의 3차 고조파를 가졌으며 이 스펙트럼 특성을 그림 9에 나타내었다. 그림 10에는 제작된 E급 증폭기에 P_{1dB} 입력전력인 6dBm의 신호를 인가하여 얻은 스펙트럼으로 -26.7dBc의 2차 고조파와 -47.4dBc의 3차 고조파를 가진 출력 결과를 나타내었다.

그림 11은 입력전력이 6dBm일 때 주파수 변화에 따른 출력전력 및 전력부가효율을 시뮬레이션 및 측정한다

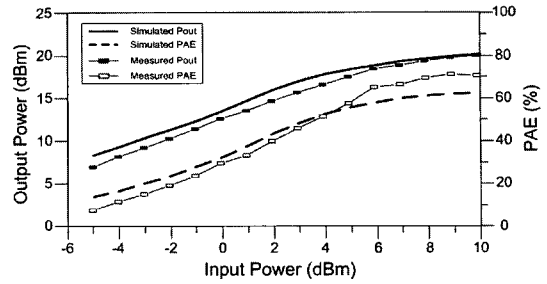


그림 8. 측정된 출력전력과 전력부가효율 특성
Fig. 8. Measured result of the power added efficiency and output power of the class E power amplifier.

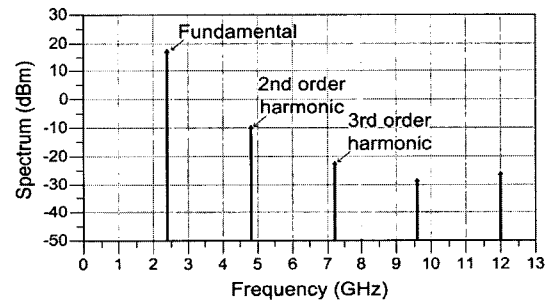


그림 9. P_{1dB} 에서의 출력 스펙트럼 시뮬레이션 결과
Fig. 9. Simulated result of output spectrum at P_{1dB} (input power=6dBm).

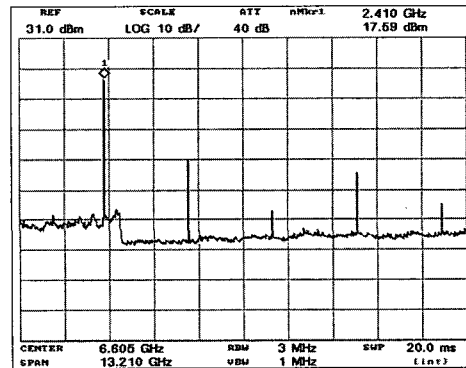


그림 10. 측정된 P_{1dB} 에서의 출력 스펙트럼 특성
Fig. 10. Measured result of output spectrum at P_{1dB} (input power=6dBm).

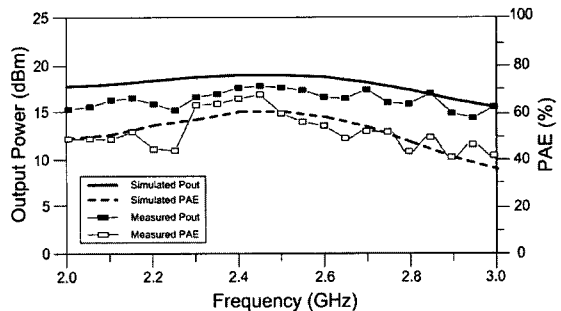


그림 11. P_{1dB} 에서의 주파수에 따른 출력전력과 전력부가효율 시뮬레이션 및 측정 결과
Fig. 11. Simulated and Measured result of the power added efficiency and output power at P_{1dB} (input power=6dBm).

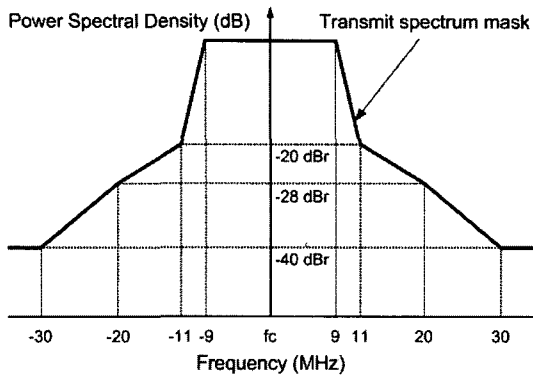


그림 12. IEEE 802.11g 출력 요구 스펙트럼 마스크
Fig. 12. Required spectrum mask of IEEE 802.11g.

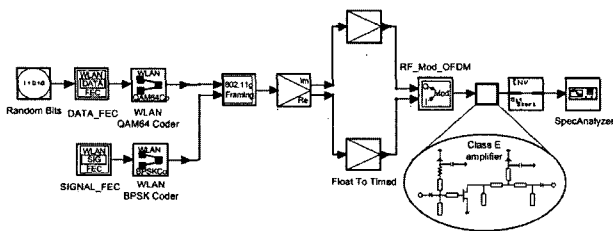


그림 13. 시뮬레이션을 위하여 구현한 송신부의 베이스밴드, 변조부, RF 블록 모델링
Fig. 13. Baseband, modulator and RF block modeling of transmitter with simulation tool.

결과로서 2.3GHz에서부터 2.6GHz까지 전력부가효율이 50% 이상의 특성을 보이고 2.4GHz에서 최대 66%의 전력부가효율을 나타내고 있음을 알 수 있다.

2.4GHz 무선 LAN 시스템에서 요구하는 출력스펙트럼 특성을 만족하는 증폭기 사양을 제시하기 위해, 시스템 시뮬레이터를 이용하여 OFDM 변조부와 송신부를 구성하였다. 2.4GHz 대역의 OFDM 무선 LAN 시스템에 대한 출력스펙트럼은 IEEE 802.11g 표준에서 규정하고 있다. 시뮬레이션에서는 2.4GHz OFDM 신호원을 표준안에 근거하여 구성하였으며, 그림 12에 무선 LAN 시스템의 요구 스펙트럼 마스크 규격을 나타내고 있다^[7].

본 논문에서는 IEEE 802.11g 표준안에 근거한 54Mbps의 데이터 전송속도를 갖는 2.4GHz OFDM 무선 LAN 시스템을 모델링하였다. 최초 생성된 신호는 64-QAM 변조방식으로 mapping되며 IFFT 처리후 guard interval과 wave shaping 단계를 거쳐 I/Q modulator에 인가되어 RF 송신부로 보내어진다. 이러한 베이스밴드 처리부와 변조부 및 RF 블록을 ADS로 구현한 모델링 회로도를 그림 13에 나타내었다.

IEEE 802.11g의 입력신호 레벨을 변화시키며 설계된 증폭기에 인가했을 때 요구되는 스펙트럼 마스크를 만

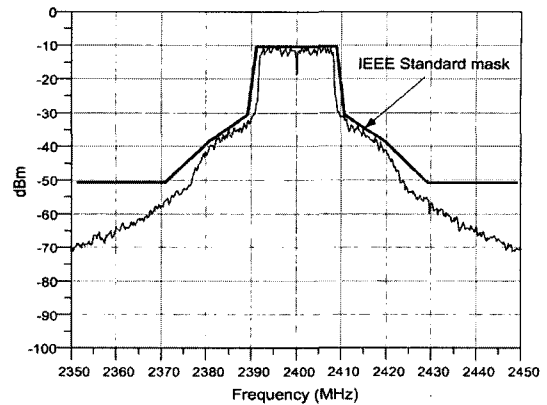


그림 14. E급 증폭기 출력스펙트럼 시뮬레이션 결과
Fig. 14. Simulated result of Class E amplifier output spectrum at 2.4GHz.

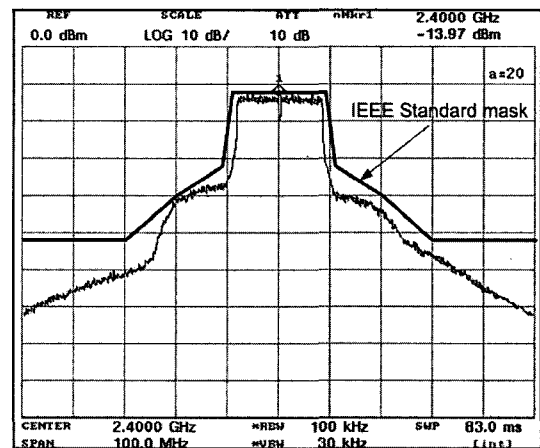


그림 15. E급 증폭기 출력스펙트럼 측정 결과
Fig. 15. Measured result of Class E amplifier output spectrum at 2.4GHz.

족하는 입력레벨은 -2dBm이었으며, 이 경우의 출력 스펙트럼 시뮬레이션 결과를 그림 14에 나타내었다. 실제 측정 결과, -3dBm의 입력신호를 인가했을 때 요구 스펙트럼 마스크 특성을 만족하였으며 이를 그림 15에 출력 스펙트럼 측정 결과로 제시하였다. 이상의 결과에서 설계된 E급 증폭기는 P_{1dB} 의 출력에서는 표준에서 요구하는 스펙트럼 마스크를 만족하지 못하며 상당한 크기의 백오프(back off)를 하여야만 스펙트럼 규격을 만족하는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 스위칭 증폭기인 E급 증폭기에서 선형성 개선을 위한 추가적인 연구가 필요함을 알 수 있다.

측정된 E급 증폭기의 출력스펙트럼인 그림 15에서 스펙트럼의 하측파대(Lower Side Band)와 상측파대(Upper Side Band)의 비대칭성을 확인할 수 있다. 출력 스펙트럼 특성의 비대칭성은 3차 상호변조항의 비대칭 특성으로 설명되며 주파수 대역폭에 대해 영향을 받

며, 비선형성에 의해 나타나는 성분뿐만 아니라 주 신호와 f_2-f_1 상호작용을 하여 나타난 성분이 더해져 비대칭성을 이루게 된다^{[8][9]}. 그림 15에서 나타난 상측 파대와 하측파대간의 3dB의 비대칭성을 개선할 수 있다면 스펙트럼 마스크 규격을 만족하는 입력신호의 레벨을 높이는 결과를 가져오며, 증폭기의 요구 백오프 특성을 개선할 수 있을 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 무선랜용 E급 전력증폭기를 pHEMT 및 마이크로스트립 선로를 사용하고 하모닉 밸런스 시뮬레이션을 이용하여 설계하였다. 제작된 E급 전력증폭기는 2.4GHz 중심주파수에서 출력전력이 17.6dBm일 때 66%의 전력부하효율 및 11.6dB의 이득을 나타내었다. 전력증폭기의 출력 스펙트럼을 시뮬레이션 및 측정을 분석한 결과 P_{1dB} 에서 최대 9dB 백오프한 -3dBm 입력신호에서 IEEE 802.11g의 스펙트럼 마스크 규격을 만족시키는 것을 알 수 있었다. 또한 이 때의 출력스펙트럼은 상하측대파에서 최대 3dB의 좌우 비대칭성을 나타내었다. 향후 IMD3의 비대칭성을 개선하고 출력 스펙트럼 특성을 개선하기 위한 선형성 개선에 관한 추가적인 연구를 진행할 계획이다.

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.

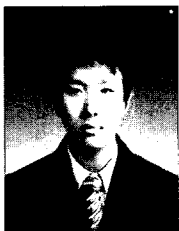
[6] T. Mader and Z. Popovic, "The transmission-line high-efficiency class E amplifier," *IEEE Microwave Guided Wave Lett*, vol. 5, pp. 290-292, Sept. 1995.

[7] F. Wang, A. Ojo, D. Kimball, P. Asbeck, and L. Larson, "Envelope tracking power amplifier with pre-distortion linearization for WLAN 802.11g," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 3, pp. 1543-1546, Jun. 2004.

[8] N. Borges de Carvalho and J.C. Pedro, "Two-tone IMD asymmetry in microwave power amplifiers," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Boston, MA, pp. 445-448, 2000.

[9] J. Vuolevi, T. Rahkonen, and J. Manninen, "Measurement technique for characterizing memory effects in RF power amplifiers," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 49, no. 8, pp. 1383-1389, Aug. 2001.

저 자 소 개



박 찬 혁(정회원)
 2005년 인천대학교 전자공학과 학사
 2006년 현재 인천대학교 대학원 전자공학과 석사과정
 <주관심분야 : 마이크로파 회로 및 모듈 설계, 전력증폭기 설계 및 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 부회장,
 1987년~현재 인천대학교 전자공학과 교수
 <주관심분야 : 마이크로파 회로 및 모듈 설계, 전력증폭기 선형화, 무선랜 시스템>