

GaN HEMT를 이용한 고효율 스위칭 모드 도허티 전력증폭기 설계

Design of High Efficiency Switching-Mode Doherty Power Amplifier Using GaN HEMT

최길웅*
(Gil-Wong Choi)

김형종**
(Hyoung-Jong Kim)

최진주***
(Jin-Joo Choi)

김선주****
(Seon-Joo Kim)

요약

본 논문은 GaN HEMT (Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor)를 이용하여 Class-E 스위칭 모드를 적용한 S-대역 레이더용 고효율 스위칭 도허티 전력증폭기를 설계 및 제작하였다. 제안된 도허티 전력증폭기는 캐리어 증폭기와 피킹 증폭기가 고효율 특성을 갖는 Class-E 스위칭 모드로 구성되었다. 측정을 위한 입력 RF 신호는 100 μ s의 펄스폭과 1 kHz의 PRF (Pulse Repetition Frequency)인 duty 10%인 펄스 신호를 사용하였다. 2.85 GHz의 주파수 대역에서 스위칭 도허티 전력증폭기 측정결과 포화전력에서 6 dB 떨어진 지점의 전력부가 효율 (power-added efficiency, PAE) 및 드레인 효율 (drain efficiency)은 각각 64%와 80.6%로 측정되었다.

Abstract

In this paper, we describe the design and implementation of a high efficiency Doherty power amplifier using gallium nitride (GaN) high-electron mobility transistor (HEMT). The carrier and peaking amplifiers of the proposed Doherty power amplifier consist of the switching-mode Class-E power amplifiers. The test conditions are a duty of 10% and a pulse width of 100 μ s and pulse repetition frequency (PRF) of 1 kHz for a S-band radar application. A RF performance peak PAE of 64% with drain efficiency of 80.6%, at 6 dB output back-off point from saturated output power of 45.5 dBm, was obtained at 2.85 GHz.

Key words : GaN HEMT, High-Efficiency, switching-mode, class-E power amplifier and doherty amplifier

† 본 논문은 국방과학연구소의 연구비 지원을 받아 수행된 연구임.

* 주저자 : 광운대학교 전자공학과 박사과정

** 공저자 : 광운대학교 전자공학과 박사과정

*** 공저자 및 교신저자 : 광운대학교 전자융합공학과 교수

**** 공저자 : 국방과학연구소 책임연구원

† 논문접수일 : 2010년 8월 4일

† 논문심사일 : 2010년 9월 29일

† 게재확정일 : 2010년 10월 1일

I. 서 론

최근 무선 통신 시스템에서 송신기의 전력증폭기의 효율 개선이 요구되고 있다. 이는 전력증폭기가 가장 많은 전력을 소모하기 때문에 전력증폭기의 효율특성은 시스템 운용비용의 감소와 추가적인 방열 장비의 불필요에 따른 장비의 크기 절감 등 중요한 요인이 된다[1]. 현재 레이더 송신기의 전력소모를 줄이기 위한 연구와 다기능 레이더 (Multi-function radar, MFR)에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. 특히 추적, 감시, 무기 제어 등의 기능을 갖는 다기능 레이더는 반도체 소자 및 능동형 위상배열 레이더 기술을 기반으로 한다. 이런 기능을 수행하기 위해서는 필수적으로 송신기의 출력전력을 제어할 수 있어야 한다[2]. 그러나 높은 효율특성을 유지하면서 출력전력을 제어하기는 어렵다. 따라서 높은 입력전력뿐만 아니라 낮은 입력전력에서도 고효율 동작특성을 갖는 전력증폭기가 연구되어야 한다.

높은 효율특성을 갖는 전력증폭기 기술 살펴보면 드레인에 인가되는 전압과 전류 파형이 중복될 때 발생하는 전력 손실을 줄여 높은 효율을 갖는 원리를 적용한 Class-D, E, F 등과 같은 스위칭 모드 전력증폭기가 있다. 이와 같은 스위칭 모드 전력증폭기는 트랜지스터가 스위치 동작을 전제로 하기 때문에 주로 낮은 주파수 대역의 오디오 증폭기나 전력 컨버터로 사용되었으며, 포화전력구간에서 높은 효율 특성을 갖는다. 그러나 최근 RF (Radio Frequency) 대역에서 전력증폭기의 고효율 특성이 중요시 되면서 많은 연구가 진행되었으며 이중 Class-E를 이용한 레이더 송신기 전력증폭기가 연구 되었다[3]. 그리고 선형성을 고려하여 back-off 상태에서도 높은 효율 특성을 갖는 EER (Envelope elimination and restoration) 기술과 envelope tracking, LINC (Linear amplifier amplification using Nonlinear Components), Doherty 구조와 같은 효율 개선 기술들이 제안되었다. 이와 같은 기술 중에서도 도허티 기술은 평형 전력증폭기의 구조보다 복잡하지만 다른 효율개선을 위한 구조에 비해 회로가

간단하며 일정한 입력전력 구간에서 높은 효율 특성을 유지할 수 있는 장점을 갖는다[4-5].

스위칭 모드 전력증폭기의 효율에 영향을 미치는 요소로는 트랜지스터의 드레인-소스 커패시턴스 (C_{ds})와 스위칭 저항 (R_{on}), 트랜지스터 knee voltage가 있다[6]. 이러한 관점에서 다른 GaAs 트랜지스터나 Si LDMOS (laterally diffused metal oxide semiconductor) 에 비해 넓은 energy band-gap, 높은 항복 전계, 높은 전자 포화 속도, 좋은 열 전도성 등의 특성을 갖는 GaN (Gallium nitride) HEMT (High electron mobility transistor)는 스위칭 모드 전력증폭기에 가장 적합한 트랜지스터로 볼 수 있다. 넓은 energy band-gap은 높은 항복전계를 가능하게 되며 단위면적당 전력밀도가 높기 때문에 소형화가 가능해 진다. 또한 높은 포화 전자 이동속도는 더 높은 주파수 대역에서 동작이 가능하게 되며, 좋은 열전도성은 방열 시스템을 줄여서 시스템의 크기를 줄일 수 있게 된다.

본 논문에서는 고효율 특성을 갖는 GaN HEMT를 사용하여 설계한 Class-E 스위칭 모드 전력증폭기를 설계하고 도허티 구조에 적용하여 S-대역 레이더용 스위칭 모드 도허티 전력증폭기를 설계하였다. 스위칭 모드 도허티 전력증폭기는 캐리어 증폭기와 피킹 증폭기의 피크 전력비를 6 dB 에서 최대 효율 특성을 가지도록 결정 하였다.

II. Class-E 스위칭 모드 전력증폭기

1. Class-E 스위칭 모드 전력증폭기

<그림 1>은 이상적인 Class-E 전력증폭기의 기본 회로도 및 등가회로를 나타내고 있다. 그림에서도 알 수 있듯이 능동소자인 트랜지스터 (스위치), DC 전압을 인가하기 위한 $RF\ choke$, 드레인-소스 커패시턴스 (C_{ds})와 기생 커패시턴스를 포함한 커패시턴스 C_p , 정합회로 (동작주파수 대역에서 필터 역할을 하는 $L-C$ 직렬 공진회로), 부하저항 R_{opt} 로 구성되어 있다. 최적의 Class-E 전력증폭기 동작을 위해 스위치가 ON ($\alpha t = 2\pi$) 상태 일 때 식 (1)과 (2)

의 조건을 만족해야 한다.

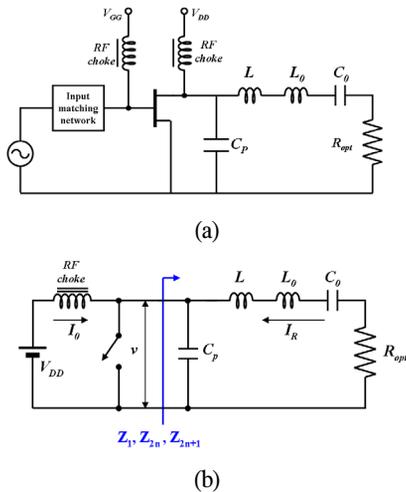
$$v(\omega t)|_{\omega t = 2\pi} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dv(\omega t)}{d\omega t}|_{\omega t = 2\pi} = 0 \quad (2)$$

여기서 $v(\omega t)$ 는 스위치에 걸리는 전압을 나타낸다. 위의 조건을 이용하여 DC 드레인 전압 (V_{DD})으로 정규화된 정상상태의 드레인 전압파형은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있고, DC 드레인 전류 (I_0)로 정규화된 전류 파형은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다[7].

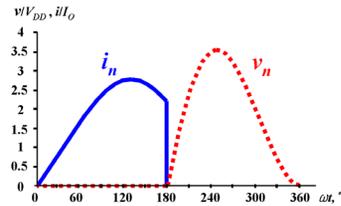
$$\frac{v(\omega t)}{V_{DD}} = \pi(\omega t - \frac{3\pi}{2}) - \frac{\pi}{2} \cos \omega t - \sin \omega t \quad (3)$$

$$\frac{i(\omega t)}{I_0} = \frac{\pi}{2} \sin \omega t - \cos \omega t + 1 \quad (4)$$



<그림 1> Class-E 스위칭 모드 전력증폭기: (a) 기본 회로도, (b) 등가회로
<Fig. 1> Class-E switching-mode power amplifier: (a) basic circuit, (b) equivalent circuit

<그림 2>는 Class-E 전력증폭기의 동작 특성을 ωt 에 대한 정규화된 드레인 전압(v_n)과 전류(i_n)의 파형을 나타낸 그림이다. 트랜지스터가 이상적인 스위치로 동작할 때, 즉 제로 스위칭 조건을 만족할 때 이상적으로 효율이 100%를 갖는다. 이때의 출력 임피던스 조건은 기본주파수 부하 임피던스는 $Z_1=R_{opt}$ 이며 하모닉 임피던스 Z_{2n} 과 Z_{2n+1} 은 무한대이어야 한다.



<그림 2> Class-E 전력증폭기 드레인 전압 및 전류 파형
<Fig. 2> The drain voltage and current waveforms of Class-E power amplifier

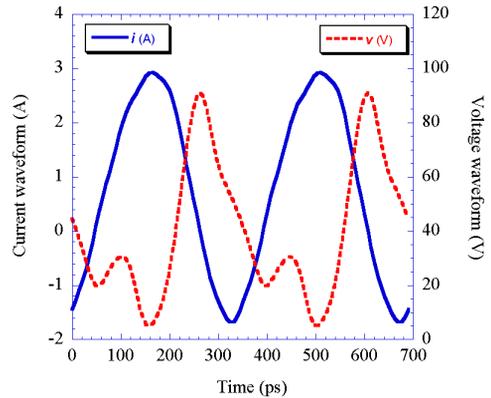
2. Class-E 스위칭 모드 전력증폭기 설계 및 측정

본 논문에서는 Class-E 스위칭 모드 전력증폭기를 설계하기 위해 Cree사의 10 W, GaN HEMT CGH40010F를 사용하였다. Cree사에서 제공하는 비선형 모델을 이용하여 Agilent Advanced Design System (ADS)으로 로드풀 (load-pull)과 소스풀 (source-pull) 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서 적용한 하모닉 차수는 회로의 크기 및 효율을 고려하여 3차 하모닉 주파수 성분까지 적용하여 설계하였다. 시뮬레이션 바이어스 조건은 40 V의 드레인 전압 바이어스 조건으로 설계하였다.

게이트 바이어스는 Class-B 바이어스 조건인 -2.8 V의 게이트 바이어스와 40 V의 드레인 전압을 인가하여 설계 시 수행한 모든 시뮬레이션에 적용하였다. ADS 컴퓨터 코드를 이용하여 로드풀과 소스풀 시뮬레이션을 통해 최적화된 입력 임피던스와 출력 임피던스를 찾았다. 로드풀 및 소스풀 시뮬레이션 입력 조건은 더 정확한 시뮬레이션을 위해 포화출력을 갖는 입력전력에서 3 dB back-off 된 입력전력을 인가하여 시뮬레이션을 수행하였다. <그림 3>은 로드풀 시뮬레이션에서 찾은 임피던스 값을 마이크로 스트립라인으로 회로를 구현하여 스미스 차트에서 확인한 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 결과 소스 임피던스는 $6.807 - j10.211 \text{ ohm}$ 이며 부하 임피던스는 $9.028 + j8.907 \text{ ohm}$ 이며, 이때 부하 2차 하모닉 임피던스는 $3.189 + j78.828 \text{ ohm}$ 이며, 3차 하모닉 임피던스는 $94.65 + j129.744 \text{ ohm}$ 이다. <그림 4>는 설계된 전력증폭기의 전압과

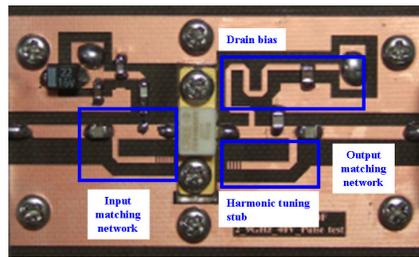
전류 파형을 나타낸 것이다. 설계 결과 2.7 GHz ~ 2.9 GHz 주파수 대역내에서 42.6 dBm 이상의 출력 전력과 75% 이상의 드레인 효율 특성을 갖는 것을 확인하였다. 그림 4에서 전류가 음수인 이유는 <그림 1>에 표현된 C_p 에 의해서 트랜지스터가 ON 되었다가 OFF되는 순간 C_p 에 충전된 전자들이 트랜지스터로 흐르면서 발생된 전류가 함께 포함되어 나타나기 때문이다.

<그림 5>는 Class-E 스위칭 모드 전력증폭기 제작사진이다. 단일 스테브를 사용하여 하모닉 성분을 정합하였으며, 병렬 커패시터와 DC block 커패시터를 이용하여 기본 주파수 성분을 정합하였다. 드레인 바이어스 라인은 마이크로 스트립라인을 이용하여 2차 하모닉 성분을 최적화 할 수 있도록 구성하였다. <그림 6>은 Class-E 스위칭 모드 전력증폭기의 측정결과를 나타낸 그림이다. 제작에 사용한 기판은 Taconic사의 비유전율 2.6, 기판 두께 0.504 mm, 동판 두께 18 μm 인 기판 (TLX-7)을 사용하였다. 측정을 위한 입력 RF 신호는 일반적인 펄스 레이더 입력조건인 100 μs 의 펄스폭을 갖는 duty 10%인 펄스 신호를 사용하였다.



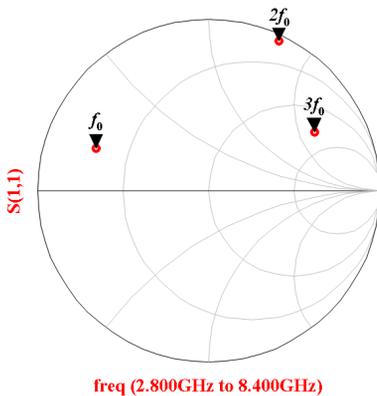
<그림 4> 설계된 Class-E 스위칭 모드 전력증폭기의 시뮬레이션 전압/전류 파형

<Fig. 4> Simulated voltage and current waveforms of the designed Class-E switching-mode power amplifier



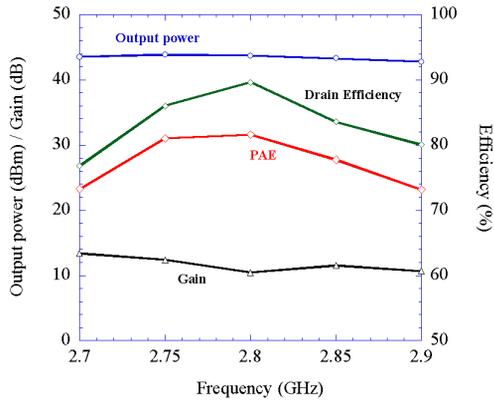
<그림 5> Class-E 스위칭 모드 전력증폭기 제작사진
<Fig. 5> Photograph of the fabricated Class-E switching-mode power amplifier

최적의 동작특성을 얻기 위해 40 V의 드레인 바이어스 전압과 실험을 위한 Class-B 게이트 바이어스 전압은 -3.5 V이지만 게이트 바이어스를 -9 V까지 변화시켰을 때 -4 V의 게이트 바이어스 전압 조건일 때 최적의 동작특성을 나타내는 것을 확인하여 -4 V의 게이트 바이어스 전압 조건에서 측정하였다. 측정 결과 2.7 GHz ~ 2.9 GHz 주파수대역내에서 43.3 \pm 0.5 dBm의 출력 전력과 73%의 이상의 전력부가 효율 및 76%의 드레인 효율이 측정되었다. 또한 2.8 GHz 대역에서 89%의 최대 드레인 효율이 측정되었다.



<그림 3> Class-E 스위칭 모드 전력증폭기의 시뮬레이션 부하 임피던스 (f_0 : 기본 주파수, $2f_0$: 2차 하모닉, $3f_0$: 3차 하모닉)

<Fig. 3> Simulated load impedances of the Class-E switching-mode power amplifier (f_0 : fundamental, $2f_0$: 2nd harmonic, $3f_0$: 3rd harmonic)



〈그림 6〉 Class-E 스위칭 모드 전력증폭기 측정결과
 〈Fig. 6〉 Measured results of the Class-E switching-mode power amplifier.

Ⅲ. 스위칭 모드 도허티 전력증폭기 설계

1. 도허티 전력증폭기 (Doherty Power Amplifier)

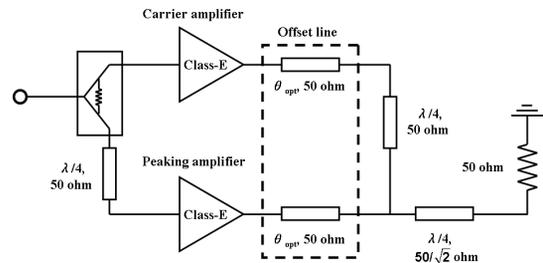
일반적인 도허티 전력증폭기는 캐리어 증폭기와 피킹 증폭기가 $\lambda/4$ 임피던스 변환기 (impedance transformer)에 의해서 결합된다. 도허티 전력증폭기의 캐리어 증폭기와 피킹 증폭기의 바이어스는 각각 Class-B와 Class-C로 동작시킨다. 하지만 통신 시스템에 사용되는 도허티 전력증폭기는 효율은 다소 감소하더라도 선형성을 확보하기 위해 캐리어 증폭기를 Class-AB로 동작시킨다. 이 때 도허티 전력증폭기의 동작 특성을 입력 전력의 크기에 따라 세 가지 구간으로 나눠서 설명할 수 있다. 첫 번째, 낮은 입력 전력 구간에서의 동작 특성은 피킹 증폭기는 동작하지 않고 캐리어 증폭기만 소스 전력에 대해 최대 소스 전력의 1/2지점까지 선형적으로 증가한다. 두 번째, 중간 입력 전력 구간에서는 캐리어 증폭기의 소스전력은 포화 상태가 되며 피킹 증폭기는 Class-C 바이어스로 동작하기 때문에 이 구간에서 expansion 형태로 동작하기 시작한다. 세 번째, 최대 입력 전력구간에서는 캐리어 증폭기와 피킹 증폭기 모두 최대 소스 전력을 갖게 된다. 이와 같은 도허티 전력증폭기의 동작특성을 임피던스 관점에서 해석하면 세 가지 입력 구간에

따른 소스 임피던스는 다음과 같다.

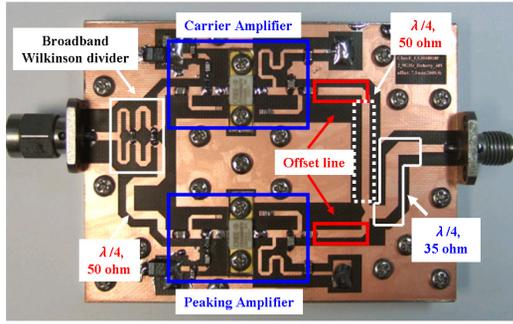
- 1) 낮은 입력 전력 구간: 피킹 증폭기가 동작하지 않음.
 $\rightarrow I_p=0, Z_m=2R_L$
- 2) 중간 입력 전력 구간: 낮은 입력 전력 구간과 최대 입력 전력 구간 사이에서 동작.
 $\rightarrow Z_m=R_L \sim 2R_L$
- 3) 최대 입력 전력 구간: 캐리어 증폭기와 피킹 증폭기가 모두 동일한 전류를 갖음
 $\rightarrow I_m=I_p, Z_m=Z_p=R_L$

2. 스위칭 모드 도허티 전력증폭기 설계 및 측정

일반 통신 시스템과 달리 레이더는 신호를 송신하고 송신된 신호가 물체에 맞고 반사된 신호를 검출하여 속도 및 위치 정보를 얻기 때문에 선형성이 중요하지 않다. 따라서 본 논문에서는 일반통신 시스템의 전력증폭기와 달리 선형성을 고려하지 않고 높은 효율 특성을 갖는 스위칭 모드 전력증폭기를 이용하여 도허티 전력증폭기를 구성하였다. 〈그림 7〉은 본 논문에서 제안한 스위칭 모드 도허티 전력 증폭기의 구성도이다. 제안된 스위칭 모드 도허티 전력 증폭기는 효율을 개선하기 위해 캐리어 증폭기와 피킹 증폭기를 앞서 설계한 Class-E 스위칭 모드 전력증폭기를 적용하였다. 기판은 Class-E 스위칭 모드 전력증폭기에 사용된 것과 동일한 Taconic사의 TLX-7을 사용하였다.

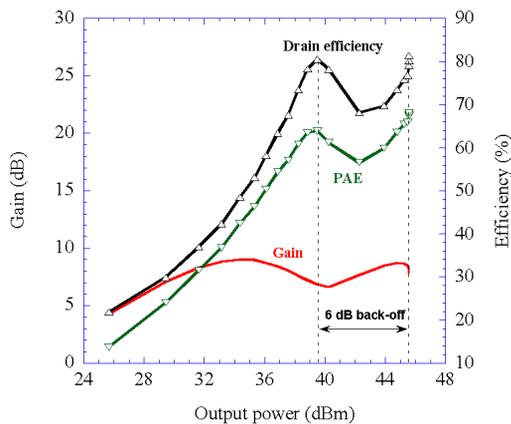


〈그림 7〉 스위칭 모드 도허티 전력 증폭기 구성도
 〈Fig. 7〉 Schematic of the switching-mode doherthy power amplifier

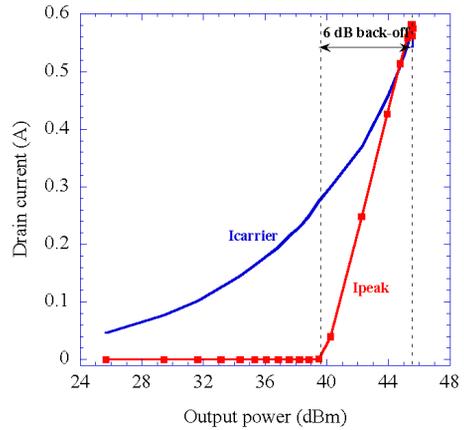


〈그림 8〉 스위칭 모드 도허티 전력증폭기 제작사진
 〈Fig. 8〉 Photograph of the fabricated switching-mode doherthy power amplifier

그림 8은 본 논문에서 제안한 스위칭 모드 도허티 전력증폭기 제작 사진을 나타낸다. 출력의 임피던스 변환기의 위상을 보상하기 위해 50 ohm의 $\lambda/4$ 를 입력단에 추가하였다. 입력단의 wilkinson 전력분배기는 3차 하모닉 성분까지 고려된 광대역 특성을 갖도록 2단으로 구성하였으며 3.3 ± 0.2 dB의 삽입손실과 -15 dB의 반사손실이 측정되었다. 또한 $\lambda/4$ 임피던스 변환기와 효율 특성을 최적화하기 위한 오프셋 라인 (offset-line)으로 구성하였다. 오프셋 라인은 캐리어 전력증폭기의 누설 전류



〈그림 9〉 스위칭 모드 도허티 전력증폭기 효율 및 이득 측정결과 (2.85 GHz)
 〈Fig. 9〉 The measured efficiency and gain characteristics of switching-mode doherthy power amplifier



〈그림 10〉 스위칭 모드 도허티 전력증폭기 캐리어 증폭기 및 피킹 증폭기의 드레인 전류 측정결과
 〈Fig. 10〉 The measured drain currents of carrier and peaking amplifier with switching-mode doherthy power amplifier.

를 최소화 하고 설계된 Class-E 전력증폭기의 하모닉 성분을 오프셋 라인의 길이를 조정하여 최적의 효율 특성을 갖는 길이를 선택하여 제작하였다. 실험 조건은 40 V의 드레인 바이어스 전압과 -4 V의 캐리어 증폭기 게이트 바이어스 전압 및 -7.5 V의 피킹 증폭기의 게이트 바이어스 조건과 100 μ s의 펄스폭을 갖는 duty 10%인 입력 펄스 신호를 사용하여 실험한 결과를 <그림 9>에 나타내었다. 2.85 GHz 주파수 대역에서 측정한 결과 포화 소스전력에서 6 dB back-off된 지점 39.5 dBm의 소스전력에서 65%의 전력부가효율과 80.6%의 드레인 효율이 측정되었다. 또한 포화 소스전력 45.5 dBm의 소스전력에서 67%의 전력부가효율과 80.2%의 드레인

〈표 1〉 스위칭 모드 도허티 전력 증폭기 성능 비교
 〈Table 1〉 Performance comparison of switching-mode doherthy power amplifier

구분	증폭기 분류		Pout (dBm) /BOP (dB)	드레인 효율 (%)
	Carrier	Peaking		
[8]	Class-F-1	Class-F-1	32/7	54.7%
[9]	Class-F	Class-F	37/6	54.2%
[10]	Class-E	Class-E	40/6	61.2%
본논문	Class-E	Class-E	39.5/6	80.2%

효율이 측정되었다.

<표 1>은 다른 연구기관에서 선행한 연구 결과와 본 논문에서 제안한 스위칭 모드 도허티 전력증폭기의 특성을 비교하여 나타내었다. 기존의 스위칭 모드 도허티 전력증폭기는 통신 시스템의 송신기에 적용하기 위해서 선형성을 고려하여 설계하였으며 캐리어 증폭기는 Class-AB 바이어스 조건에서 동작시켜 표와 같은 특성을 얻었다. 본 논문은 선형성을 고려하지 않고 최대 효율을 얻을 수 있도록 Class-B 바이어스 조건에서 동작시켰으며 특성을 비교해 본 결과 약 19%~26%의 효율이 개선된 것을 확인하였다.

<그림 10>은 스위칭 모드 도허티 전력증폭기의 캐리어 증폭기와 피킹 증폭기의 소스 전력에 따른 전류를 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 낮은 입력 구간에서는 피킹 증폭기가 동작하지 않다가 포화 소스전력으로부터 6 dB 떨어진 지점부터 전류가 급격히 흐르는 것을 확인할 수 있다. 2.85 GHz 주파수 대역에서 포화 소스전력 35 W에서 소스 RF 펄스의 상승시간 (rise time)과 하강시간 (fall time)을 측정된 결과 각각 38.8 ns와 22 ns로 측정되었으며, 6 dB back-off 된 지점에서의 상승시간과 하강시간은 31.9 ns와 19.6 ns로 측정되었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 GaN HEMT 소자를 사용하여 설계한 Class-E 스위칭 모드 전력증폭기를 적용한 고효율 스위칭 도허티 전력증폭기를 연구하였다. 본 논문에서 제안한 스위칭 모드 도허티 전력증폭기는 동작 주파수 2.7 GHz~2.9 GHz 대역에서 포화 출력전력 지점과 6 dB back-off된 지점에서 각각 58~67% 전력부가효율과 66~80.6%의 드레인 효율을 갖는 것을 확인하였다. 본 연구 결과 제안된 스위칭 모드 도허티 전력증폭기가 일반적인 도허티 전력증폭기와 비교했을 때 우수한 효율 특성을 갖는 것을 확인하였으며 제안된 방식의 전력증폭기는 고효율 레이더 송신기 전력증폭기뿐만 아니라 일반 통신 시스템에 적용하면 효율을 개선하여

시스템의 크기 및 운용비용을 절감 할 수 있을 것이라 기대 된다.

참 고 문 헌

- [1] F. H. Rabb, P. Asbeck, S. Cripps, P. B. Kenington and Z. B. Popovic, "Power amplifier and transmitters for RF and microwave," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 50, no. 3, pp. 814-826, Mar. 2002.
- [2] J. van Bezouwen, "System Trends in Ground Based Active Phased Array Radar," *38th European Microwave Conf. Workshop Handouts-WTH-13*, pp. 27-31 Oct. 2008.
- [3] T. Quach, et al., "Broadband Class-E Power Amplifier for Space Radar Application," *IEEE GaAs IC Symp. Dig.*, pp. 209-213, Oct. 2001.
- [4] Y. Yang, J. Yi, Y. Y. Woo and B. Kim, "Experimental investigation on efficiency and linearity of microwave Doherty amplifier," *2001 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 2, pp. 1367-1370, 20-25, May 2001.
- [5] J. Y. Lee, J. Y. Kim, J. H. Kim, K. J. Cho and S. P. Stapleton, "A high power asymmetric doherty amplifier with improved linear dynamic range," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1348-1351, June 2006.
- [6] Jr. S. Pengelly, "A comparison between class E power amplifiers employing LDMOS FETs and SiC MESFETs," *IEEE Wireless and Microwave Tech Conf*, April 2004.
- [7] A. Grebennikov and N. O. Sokal, *Switch mode RF Power Amplifiers*, Newnes, June 2007.
- [8] J. Kim, B. Kim and Y. Y. Woo, "Advanced design of linear doherty amplifier for high efficiency using saturation amplifier," in *Proc. IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 1573 - 1576, June 2007.
- [9] J. Kim, J. Moon, Y. Y. Woo, S. Hong, I. Kim, J.

Kim and B. Kim, "Analysis of a fully matched saturated doherty amplifier with excellent Efficiency," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 56, no. 2, pp. 328 - 338, Feb. 2008.

efficient doherty amplifier based on Class-E Topology for WCDMA applications," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, no. 9, pp. 608 - 610, Sept. 2008.

[10] Y. S. Lee, M. W. Lee and Y. H. Jeong, "High

저자소개



최길웅 (Choi, Gil-Wong)

2007년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 대학원 전파공학과 박사과정
2006년 2월 : 광운대학교 대학원 전파공학과 석사
2004년 2월 : 광운대학교 전자공학부 학사



김형중 (Kim, Hyoung-Jong)

2006년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 대학원 전파공학과 박사과정
2006년 2월 : 광운대학교 전자공학부 학사



최진주 (Choi, Jin-Joo)

1997년 9월 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 교수
1991년 5월 ~ 1997년 8월 : 미국 Naval Research Laboratory (NRL) 연구원
1991년 8월 : 미국 University of Michigan, Dept. of Nuclear Engineering, 박사
1985년 8월 : 미국 Georgia State University, Dept. of Physics, 석사
1983년 8월 : 서울대학교 물리교육학과 학사



김선주 (Kim, Seon-Joo)

1988년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임연구원
1988년 2월 : 아주대학교 대학원 전자공학과 석사
1986년 2월 : 아주대학교 전자공학과 학사