

# 효율 향상을 위해 포락선 추적 기술을 이용한 비대칭 포화 3-Stage 도허티 전력 증폭기

## Asymmetric Saturated 3-Stage Doherty Power Amplifier Using Envelope Tracking Technique for Improved Efficiency

김일두 · 지승훈 · 문정환 · 손정환 · 김정준 · 김범만

Ildu Kim · Seunghoon Jee · Junghwan Moon · Junghwan Son · Jungjoon Kim · Bumman Kim

### 요 약

본 논문에서는 1:2:2의 비대칭 3-stage 도허티 전력 증폭기의 동작을 살펴보고, Freescale사의 4 W, 10 W LDMOSFET을 이용하여 1 GHz에서 구현하였다. 두 번의 최대 효율 특성을 갖는 N-way 도허티 전력 증폭기와 비교하였을 때, 비대칭 3-stage 도허티 전력 증폭기는 세 번의 최대 효율 특성을 갖도록 함으로써 백 오프된 출력 전력 영역에서의 심각한 효율 저하를 극복할 수 있고, 주어진 변조 신호에서의 평균 효율을 최대화 할 수 있다. 효율 특성을 더욱 최적화하기 위해, 역 F급 전력 증폭기를 캐리어 및 피킹 전력 증폭기로 설계하였다. 또한, 적절한 로드 모듈레이션 동작을 이끌어내기 위해, 포락선 추적 방법에 근거한 적응 게이트 바이어스 조절 신호를 두 개의 피킹 전력 증폭기에 인가하였다. 8.5 dB의 PAPR을 갖는 802.16e Mobile WiMAX 신호에 대해 제안된 비대칭 도허티 전력 증폭기는 36.85 dBm에서 55.46 %의 높은 효율 특성을 얻었고, -37.23 dB의 우수한 RCE 특성을 유지하였다. 본 논문에서는 처음으로 포화 증폭기와 적응 게이트 바이어스 조절 신호를 비대칭 3-stage 도허티 전력 증폭기에 적용하였으며, 이를 통해 기지국용 고효율 전력 송신기의 설계가 구현 가능함을 성공적으로 검증하였다.

### Abstract

We have investigated operation of a 1:2:2 asymmetric 3-stage Doherty PA(Power Amplifier) and implemented using the Freescale's 4 W, 10 W PEP LDMOSFETs at 1 GHz. By employing the three peak efficiency characteristics, compared to the two peak N-way Doherty PA, the asymmetric 3-stage Doherty can overcome the serious efficiency degradation along the backed-off output power region and maximize the average efficiency for the modulation signal. To maximize the efficiency characteristic, the inverse class F PA has been designed as carrier and peaking amplifiers. Furthermore, to extract the proper load modulation operation, the adaptive gate bias control signal has been applied to the two peaking PAs based on the envelope tracking technique. For the 802.16e Mobile WiMAX(World Interoperability for Microwave Access) signal with 8.5 dB PAPR(Peak to Average Power Ratio), the proposed Doherty PA has shown 55.46 % of high efficiency at an average output power of 36.85 dBm while maintaining the -37.23 dB of excellent RCE(Relative Constellation Error) characteristic. This is the first time demonstration of applying the saturated PA and adaptive gate bias control technique to the asymmetric 3-stage Doherty PA for the highly efficient transmitter of the base-station application.

Key words : Transmitter, 3-Stage Doherty, Envelope Tracking, WiMAX, DPD, Inverse Class F

「This work was supported by the Ministry of Knowledge Economy, Korea, under the Information Technology Research Center(ITRC) support program supervised by the Institute of Information Technology Advancement(IITA) (IITA-2008- C1090-0801-0037), by WCU(World Class University) program through the Korea Science and Engineering Foundation funded by the Ministry of Education, Science and Technology (Project No. R31-2008-000-10100-0).」

포항공과대학교 전자전기공학부(Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology(POSTECH))

· 논문 번호 : 20090529-19S

· 수정완료일자 : 2009년 7월 17일

## I. 서 론

무선통신 기술의 발달과 더불어 다양한 멀티미디어 정보를 빠른 이동 환경에서도 효율적으로 송수신하기 위해 신호의 data rate이 증가하면서, 전송해야 할 신호의 대역폭 및 PAPR(Peak to Average Power Ratio)이 증가하고 있다. 이와 같은 엄격한 환경에 맞추어 고선형 고효율 특성을 갖는 전력 송신기를 설계하기 위해, 선형화 기법과 고효율 설계 기법이 결합된 구조가 널리 연구되고 있다. 대표적으로 살펴볼 수 있는 기법들로는 드레인 바이어스 변조 기법으로써 하이브리드 포락선 제거 및 복원 전력 송신기와 포락선 추적 전력 송신기가 있고<sup>[1]~[3]</sup>, 도허티 전력 송신기가 있다<sup>[4],[5]</sup>. 드레인 바이어스를 변조시킨 전력 송신기들은 이론적으로 전력 증폭기를 항상 포화 영역에서 동작하도록 하면서 선형적인 동작을 기대할 수 있기 때문에 큰 주목을 받고 있는 기술이지만, 바이어스 변조기 회로의 복잡함과 신호의 대역 및 PAPR에 따른 효율 제한이 존재한다. 따라서 현재까지 학계에 보고된 결과로는 도허티 전력 송신기보다 약간 더 낮은 효율 특성을 갖고 있으며, 더 많은 연구가 필요한 기술이다. 도허티 전력 송신기는 이에 반해, 이론적으로는 출력 전력 구간에 대해 효율 감소 부분이 존재하는 등, 가장 효율적인 설계 기법이라고 보기 어렵지만, 전력 소자의 효율 및 이득 특성 향상, 그리고 그 설계 기법이 점점 최적화되면서 최근 학계에 보고된 결과로는 가장 높은 효율 특성을 보이고 있다. 또한, 회로 구성이 하이브리드 포락선 제거 및 복원 전력 송신기 기법보다 훨씬 더 간단하기 때문에 가장 적합한 전력 송신기 구조이다.

PAPR이 큰 변조 신호에 대해 전력 증폭기가 최대 효율을 얻기 위해서는 back-off 된 넓은 출력 전력 구간에 대해서 높은 효율을 유지해야만 한다. 고효율 전력 증폭기로서 널리 알려진 N-way 도허티 전력 증폭기는 back-off된 출력 전력 구간에서 한번의 최대 효율을 가짐으로써, 나머지 출력 전력 구간에 대해서는 효율 저하가 심하다<sup>[4],[5]</sup>. 따라서 본 논문에서는 기존의 도허티 증폭기와는 달리 back-off된 전력 구간에서 2번의 최대 효율을 갖도록 하는 비대칭 3-stage 도허티 전력 증폭기를 구현하였다<sup>[6],[7]</sup>. 또한,

캐리어 및 피킹 전력 증폭기를 역 F 급 전력 증폭기로 설계하여 3-stage 도허티 전력 증폭기에 처음으로 적용하였으며, 이에 적용 게이트 바이어스 신호를 인가함으로써 제안된 도허티 전력 증폭기의 효율 특성을 최대화 할 수 있음을 검증하였다.

## II. 802.16e Mobile WiMAX 신호에 대한 도허티 전력 증폭기의 평균 효율 특성

8.5 dB의 PAPR을 갖는 802.16e Mobile WiMAX 신호에 대한 N-way 도허티 전력 증폭기의 효율 특성이 그림 1에 나타나 있다. 변조신호가 Rayleigh 분포를 갖기 때문에 아래 같이 그 확률 분포를 정의할 수 있다.

$$f(V_m) = \frac{V_m}{\sigma^2} * e^{-(V_m^2)/(\sigma^2)},$$

$$\therefore \text{prob.}(V_m) = f(V_m) / \max(f(V_m)). \quad (1)$$

$$\therefore PAE_{Avg} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \text{prob.}(V_m) * [P_{out}(V_m) - P_{in}(V_m)] dV_m}{\int_{-\infty}^{\infty} \text{prob.}(V_m) * P_{dc}(V_m) dV_m} \quad (2)$$

따라서 변조신호에 대한 전력 증폭기의 평균 효율은 위와 같이 구할 수 있다<sup>[2]</sup>.

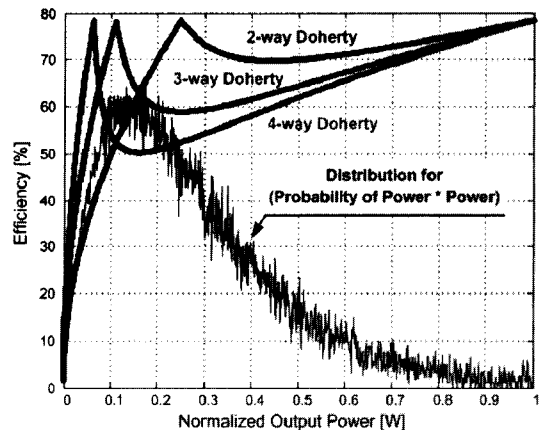


그림 1. 8.5 dB PAPR을 갖는 802.16e Mobile WiMAX 신호에 전력 성분이 더해진 확률 밀도 함수와 N-way 도허티 전력 증폭기의 출력 전력에 따른 효율 특성

Fig. 1. Power added probability density function of the 802.16e Mobile WiMAX signal with 8.5 dB PAPR and efficiency characteristics of the N-way Doherty PA versus output power.

표 1. 8.5 dB PAPR을 갖는 Mobile WiMAX 신호에 대한 N-way 도허티 전력 증폭기의 평균 효율  
Table 1. The average efficiency of N-way Doherty PA for 802.16e Mobile WiMAX signal with 8.5 dB PAPR.

	2-way	3-way	4-way
DE <sub>AVG</sub>	59.02 %	61.19 %	55.9 %

변조 신호의 Rayleigh 분포에 전력 증폭기의 전원 전력, 입력 전력 및 출력 전력 성분을 곱하게 되면 그림 1과 같이 전체 효율을 결정함에 있어서 가장 중요한 영역을 정의할 수 있게 된다. 높은 확률 밀도를 갖는 낮은 출력 전력 영역에 대해 3-way 도허티 전력 증폭기가 가장 높은 효율 특성을 유지하고 있음을 알 수 있다. 2-way 및 4-way 도허티 전력 증폭기는 그 최고 효율을 갖는 지점이 높은 확률 밀도를 갖는 영역에 어긋나 있기 때문에, 평균 효율 특성을 비교해 보았을 때 3-way가 가장 높은 효율을 갖게 된다. Mobile WiMAX 신호에 대한 각 도허티 전력 증폭기의 평균 효율을 표 1에서 요약하였다.

표 1을 보면 이론적으로 class B로 바이어스 전압이 걸린 도허티 전력 증폭기의 경우 78.5 %의 최고 효율을 갖는 것에 비해, 그 평균 효율 특성은 61.19 %로 상당히 낮아졌음을 알 수 있다. 이는 피킹 전력 증폭기가 동작하기 시작하면서 나타나는 효율 저하에 의한 것이며, 피킹 전력 증폭기가 동작하는 영역도 전체 평균 효율을 결정함에 있어서 상당히 중요한 부분임을 나타낸다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 살펴 볼 수 있는 방법이 바로 3-stage 도허티 전력 증폭기이다.

기존의 N-way 도허티 전력 증폭기는 같은 크기의 전력 소자를 사용하여,  $10 \cdot \log(N^2)$ 만큼 back-off된 출력 전력에서 한번의 최대 효율을 갖는다. 하지만 비대칭 3-stage 도허티 전력 증폭기는 캐리어 및 두 개의 피킹 전력 증폭기 전력 소자의 크기 비율에 따라 두 번의 back-off 크기가 결정되며, 각각의 back-off된 출력 전력에서 최대 효율을 갖게 된다. 한번의 최고 효율을 더 갖게 됨으로써, 3-way 도허티 전력 증폭기보다 더욱 평평한 효율 커브를 얻을 수 있게 되면서 효율 저하를 크게 감소시킬 수 있다.

그림 2에서는 주어진 변조 신호의 확률 분포에 대

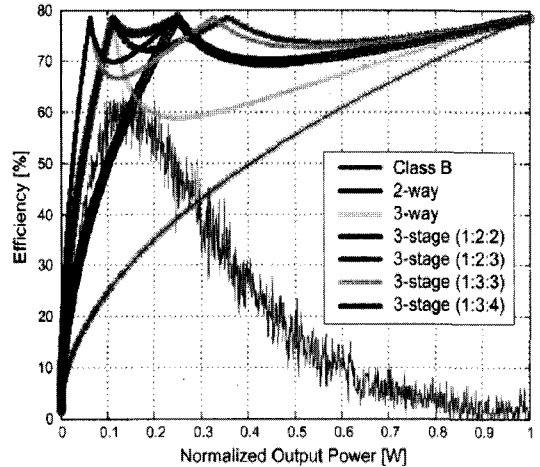


그림 2. 8.5 dB PAPR을 갖는 802.16e Mobile WiMAX 신호에 전력 성분이 더해진 확률 밀도 함수와 N-stage 도허티 전력 증폭기의 출력 전력에 따른 효율 특성

Fig. 2. Power added probability density function of the 802.16e Mobile WiMAX signal with 8.5 dB PAPR and efficiency characteristics of the N-stage Doherty PA versus output power.

해 전력 소자의 크기 비율에 따른 3-stage 도허티 전력 증폭기의 효율 특성을 보여주고 있으며, 이에 대한 평균 효율이 표 2에 정리되어 있다. 표 1과 2를 비교해 보았을 때, N-stage 방식으로 그 설계를 달리 하였을 경우, 약 10 %의 큰 효율 향상을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 기지국용 변조 신호의 경우, 일반적으로 CFR(Crest Factor Reduction) 기법을 적용하여 8~10 dB 정도의 PAPR을 갖는데, 다른 PAPR을 갖

표 2. 8.5 dB PAPR을 갖는 Mobile WiMAX 신호에 대한 다양한 N-stage 도허티 전력 증폭기의 평균 효율 및 백 오프 레벨

Table 2. The average efficiency and back-off level of various N-stage Doherty PA for 802.16e Mobile WiMAX signal with 8.5 dB PAPR.

크기 비율 (캐리어:피킹 1:피킹 2)	백 오프 레벨	DEAvg
1:2:2	-4.44/-9.5 dB	69.81 %
1:2:3	-6/-9.5 dB	69.41 %
1:3:3	-4.87/-12 dB	70.46 %
1:3:4	-6/-12 dB	71 %

는 변조 신호에 대해서도 3-stage 도허티 전력 증폭기가 2-way 혹은 3-way 도허티 전력 증폭기보다 더욱 효율적인 특성을 보일 것임을 기대할 수 있다.

### III. 1:2:2의 비대칭 3-stage 도허티 전력 증폭기의 동작 분석 및 구현

3-stage의 도허티 전력 증폭기의 구현을 위해, 본문에서는 각 전력 증폭기의 크기 비율을 '1:2:2'로 결정하여, 9.5 dB back-off된 출력 전력에서 첫 번째 최대 효율을 갖고, 4.44 dB back-off 된 출력 전력에서 두 번째 최대 효율을 갖도록 설계하였다. 이는 캐리어와 피킹 전력 증폭기의 크기 비율이 더 커질수록, 두 번째 피킹 전력 증폭기가 동작하는 시점부터 나타나기 시작하는 캐리어 전력 증폭기의 과도한 포화 동작 정도가 더욱 더 심해지기 때문이다. 구현된 비대칭 3-stage 도허티 전력 증폭기의 구조가 그림 3에 나타나 있다.

그림 4에서는 각 전력 증폭기의 fundamental 전류 및 전압 성분들을 출력 전압 레벨에 따라 도시하였다. 캐리어 및 피킹 전력 증폭기는 순차적으로 동작하면서 각각 포화 동작 영역에 이르게 된다. 캐리어 전력 증폭기는 첫 번째 피킹 전력 증폭기가 동작하는 시점부터 포화 동작을 갖게 되고, 특히 두 번째

피킹 전력 증폭기가 동작하는 시점부터는 포화 전력 레벨을 유지하게 된다. 첫 번째 전력 증폭기는 두 번째 전력 증폭기가 동작하는 시점부터 포화 동작을 갖게 된다. 그리고 두 번째 피킹 전력 증폭기는 최대 출력 전력에서 포화 동작 상태에 도달한다. 따라서 도허티 전력 증폭기 전체로 보았을 때, 출력 전력 대비 총 3번의 최대 효율을 갖게 된다. 각 전력 증폭기에서 보이는 로드 임피던스가 그림 5 및 표 3에 정리되어 있으며, 캐리어 전력 증폭기는  $1.8 R_o$ 에서  $R_o$ 로, 첫 번째 피킹 전력 증폭기는  $2.5 R_o$ 에서  $R_o$ 로, 두 번째 피킹 전력 증폭기는  $R_o$ 로 수렴하는 로드 모듈레이션을 갖게 된다.

캐리어 및 피킹 전력 증폭기는 전체 효율 특성을 최대화하기 위해 역 F 급 전력 증폭기로 구성하였다<sup>8)</sup>. 소자는 Freescale사의 LDMOSFET을 이용하였다. 각각 4 W 및 10 W의 최대 출력 전력을 가지며, 30 V의 드레인 바이어스 전압을 이용하여 pinch-off된 상태에서 설계되었다. 1 GHz를 중심주파수로 하고 2<sup>nd</sup>과 3<sup>rd</sup> 하모닉 주파수에서 각각 개방 및 단락 임피던스를 보도록 하는 하모닉 제어 회로를 출력 임피던스 정합 회로의 앞 단에 구현하였으며, device의 내부 정합 회로를 보상하기 위해 직렬 튜닝 성분을 더 첨가하였다. 전력 증폭기의 회로도가 그림 6에 나타나 있다.

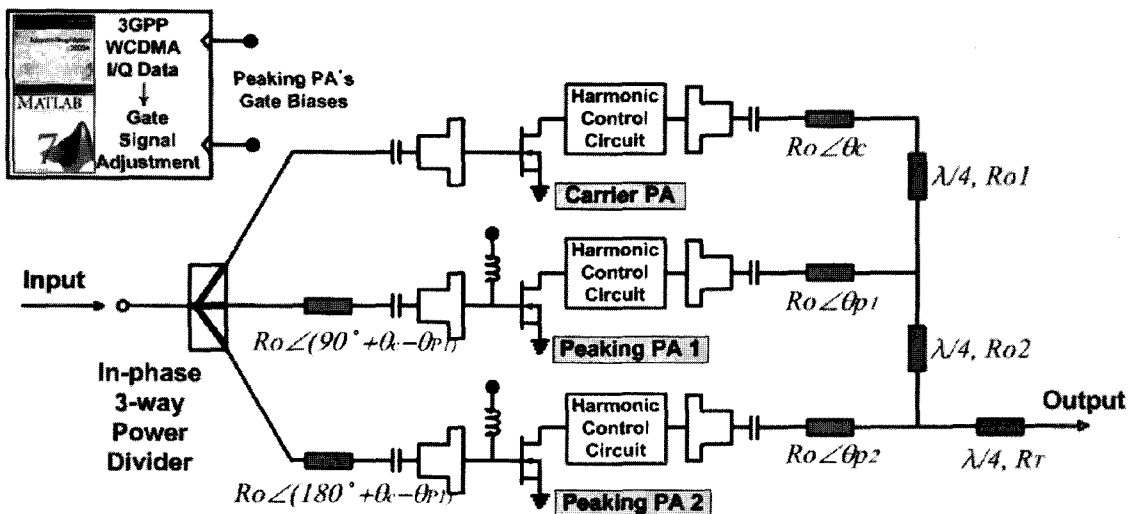
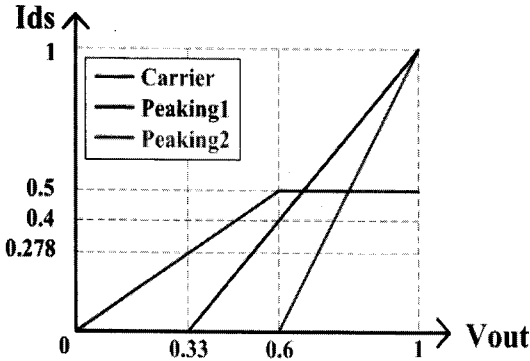
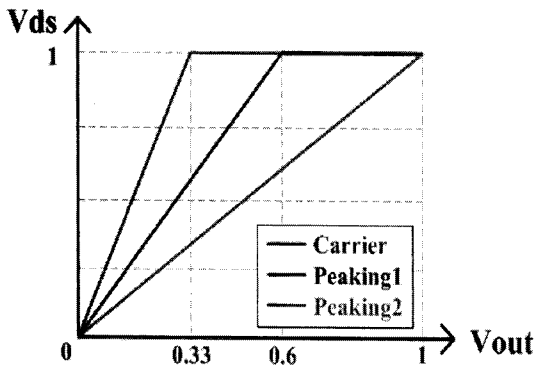


그림 3. 포락선 추적 기술을 이용한 비대칭 도허티 전력 증폭기의 구조  
 Fig. 3. Architecture of the asymmetric 3-stage Doherty PA with envelope tracking.



(a) 전력 증폭기의 fundamental 전류 성분  
(a) Fundamental current components of each PA



(b) 전력 증폭기의 fundamental 전압 성분  
(b) Fundamental voltage components of each PA

그림 4. 1:2:2 3-stage 도허티 전력 증폭기의 출력 전압레벨에 따른 fundamental 전류 및 전압 성분들

Fig. 4. Fundamental currents and voltages of the '1:2:2' 3-stage Doherty PA versus output voltage.

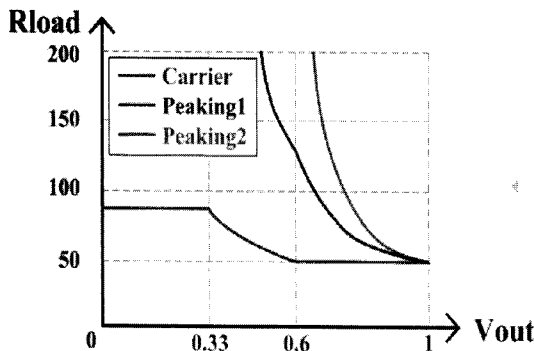


그림 5. 각 전력 증폭기의 출력 전압 레벨에 따른 로드 임피던스

Fig. 5. Load impedances of each PA versus output voltage.

표 3. 백 오프 정도에 따른 각 전력 증폭기의 로드 임피던스

Table 3. Load impedances of each PA versus back-off level.

백 오프 레벨	~-9.5 dB	~-4.44 dB	~0 dB
캐리어	1.8 Ro	Ro	Ro
피킹 1	∞	2.5 Ro	Ro
피킹 2	∞	∞	Ro

구현하고자 하는 3-stage 도허티 전력 증폭기가 각각의 전력 레벨에 따라 적절한 로드 임피던스를 보도록 하기 위해서  $\lambda/4$  선로의 특성 임피던스( $R_{o1}$ ,  $R_{o2}$ ,  $R_T$ )를 다음과 같이 정의할 수 있다<sup>[7]</sup>. 먼저 캐리어와 피킹 전력 증폭기들 사이의 크기 비율을 다음과 같이 정의한다.

$$1 : 2 : 2 = 1 : m_1 : m_2 \quad (3)$$

그리고 각각의 전력 증폭기가 최대 전력을 전달하도록 하는 로드 임피던스를 50  $\Omega$ 로 정의하고, 최종 출력 로드( $R_T$ )가 50  $\Omega$  시스템일 경우, 아래와 같은 수식에 의해 특성 임피던스들을 구할 수 있다.

$$R_{c,F} = R_{p1,F} = R_{p2,F} = R_L = 50 \Omega \quad (4)$$

$$\therefore R_{o1} = \sqrt{\frac{R_{p2,F} * R_L * m_2}{1 + m_1 + m_2}} = 31.62 \Omega$$

$$\therefore R_{o2} = \sqrt{\frac{R_{p2,F} * R_{p1,F} * R_L * m_1 * m_2}{(1 + m_1)^2}} = 33.33 \Omega$$

$$\therefore R_T = \sqrt{R_{c,F} * R_{p1,F} * m_1} = 70.71 \Omega \quad (5)$$

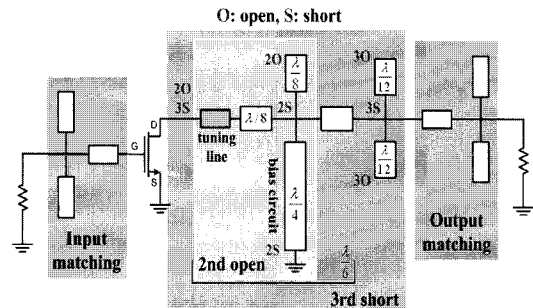


그림 6. 구현된 역 F급 전력 증폭기의 회로도  
Fig. 6. Circuit topology of the implemented inverse class F PA.

#### IV. 포락선 추적 기술을 이용한 적응 게이트 바이어스 신호의 생성

도허티 전력 증폭기는 피킹 전력 증폭기의 게이트 바이어스가 낮기 때문에, 피킹 전력 증폭기의 gm이 충분히 크지 못하게 되면 고유의 최대 출력 전력을 전달하기 어렵다. 3-stage의 경우, 피킹 전력 증폭기의 게이트 바이어스가 N-way 도허티 전력 증폭기보다 더욱 낮기 때문에 이와 같은 문제는 더욱 심각해진다. Fundamental 전류 성분들의 비율에 의해 도허티 전력 증폭기의 로드 모듈레이션이 이루어지기 때문에, 3-stage 도허티 전력 증폭기를 구성하는 피킹 전력 증폭기들의 fundamental 전류 성분이 캐리어 전력 증폭기의 전류 성분 대비 정해진 비율만큼 증가하지 못하게 되면, 부적절한 로드 모듈레이션을 초래하게 된다. 즉, 캐리어 전력 증폭기가 심각한 포화 동작 상태에 빠지게 되면서, 심각한 이득 감소 및 비선형성을 발생시키게 되고, 백 오프된 출력 전력에서 정확한 최대 효율 특성을 얻을 수 없게 된다. 특히 두 번째 피킹 전력 증폭기가 동작하는 구간에 대해서 포화 전력 상태를 유지하는 캐리어 전력 증폭기가 더욱 더 넓은 전력 구간에 대해서 포화 상태에 빠지게 되면서, 소자가 그 수명을 다할 심각한 상황에 놓이게 된다.

본 논문에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 적응 게이트 바이어스 조절 신호를 3-stage 도허티 전력 증폭기에 인가하였다<sup>[9]</sup>. 즉, 각각의 피킹 전력 증폭기가 동작하기 시작하는 시점부터 그 게이트 바이어스들을 C급에서 B급에 준하는 방향으로 높여 인가함으로써 적절한 로드 모듈레이션을 갖도록 하였다. 그림 7에서 측정된 각 전력 증폭기들의 게이트 바이어스 값들을 표현하였다. 입력 전력의 크기에 따라 측정된 게이트 바이어스 값들은 ADS 및 Matlab, 시뮬레이터를 이용하여 Mobile WiMAX 신호의 포락선 신호에 적용함으로써 그림 8과 같은 적응 게이트 바이어스 조절 신호를 생성하였다.

#### V. 실험 결과

그림 9와 10에서 구현된 비대칭 포화 3-stage 도허티

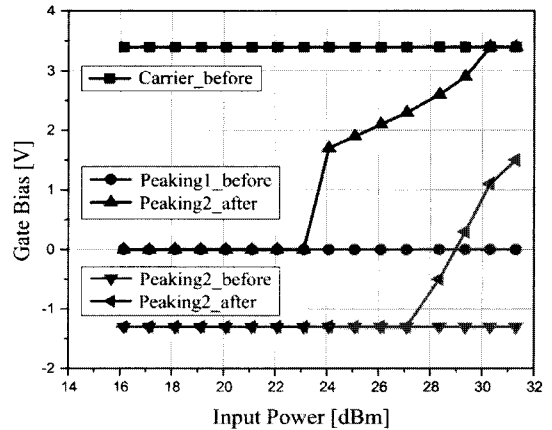


그림 7. 입력 전력에 따른 각 전력 증폭기의 게이트 전압 크기

Fig. 7. Gate biases of each PA versus the input power.

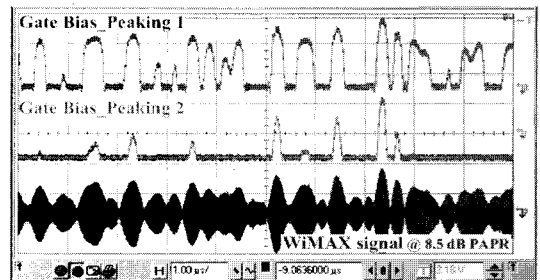


그림 8. 802.16e Mobile WiMAX 신호에 대한 피킹 전력 증폭기들의 적응 게이트 바이어스 신호들

Fig. 8. Adaptive gate control signals for each peaking PA versus 802.16e Mobile WiMAX signal.

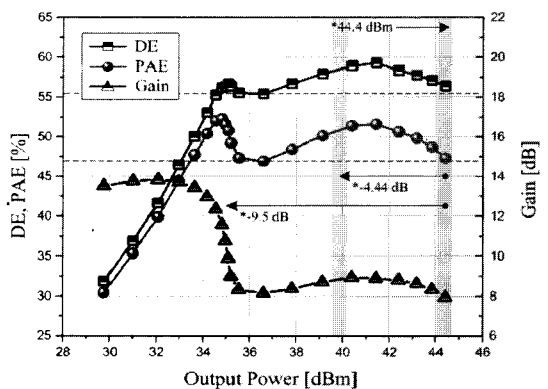


그림 9. 고정된 게이트 바이어스를 인가한 3-stage 도허티 전력 증폭기의 CW 신호에 대한 측정 결과

Fig. 9. Measured results for CW signal with constant gate biases.

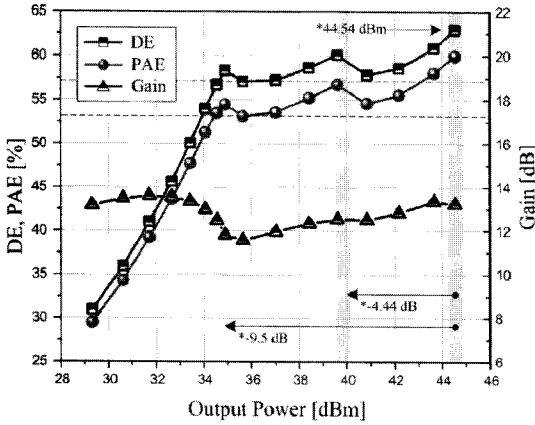


그림 10. 적응 게이트 바이어스를 인가한 3-stage 도허티 전력 증폭기의 CW 신호에 대한 측정 결과

Fig. 10. Measured results for CW signal with adaptive gate biases.

티 전력 증폭기의 게이트 바이어스 조절 전후에 대한 실험 결과가 정리되어 있다. CW(Continuous Wave, 1-tone) 신호에 대한 측정 결과, 포락선 추적 기법에 기반한 적응 게이트 바이어스 조절 신호를 인가함으로써, 백 오프된 출력 전력 레벨에서 정확히 최대 효율 특성을 가지면서 동작하는 것을 알 수 있다. 따라서 첫 번째 최대 효율을 갖는 출력 전력 이후의 효율 특성을 살펴보면, 조절 전 55.4 % 이상의 효율을 유

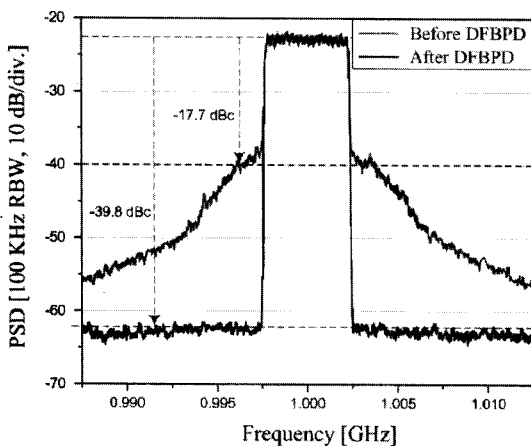
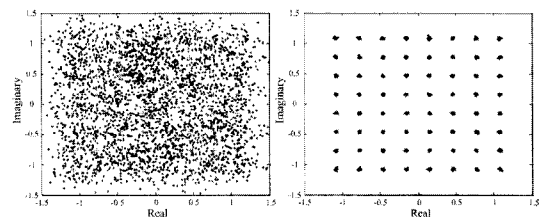


그림 11. 제안된 3-stage 도허티 전력 증폭기의 선형화 전후의 출력 스펙트럼

Fig. 11. Output spectrum of the proposed 3-stage Doherty PA before and after the linearization.

지하던 것과 달리, 조절 후 57.1 % 이상의 높은 효율 특성을 유지하고 있다. 또한, 게이트 바이어스 조절 후 적절한 로드 모듈레이션 동작을 얻을 수 있었다. 이는 캐리어 전력 증폭기의 심각한 포화동작을 크게 줄이면서, 피킹 전력 증폭기의 fundamental 전류 성분의 증가를 크게 가져감으로써, 이득 평탄도를 5.89 dB에서 1.97 dB로 크게 향상시킬 수 있었다. 이를 통해 첫 번째 최대 효율을 갖는 출력 전력 이후의 PAE (Power Added Efficiency) 특성은 게이트 바이어스 조절 전 46.9 % 이상을 유지하던 반면에, 적응 조절 신호를 인가함으로써 53.1 % 이상의 크게 향상된 PAE 특성을 유지함을 확인할 수 있었다.

CW 신호에 대해서 성공적으로 그 고효율 특성이 검증된 비대칭 포화 3-stage 도허티 전력 증폭기에 8.5 dB의 PAPR을 갖는 802.16e Mobile WiMAX 신호를 인가하였고, 선형화를 위해 DFBPD (Digital Feedback Predistortion) 알고리즘을 적용하였다<sup>[10]</sup>. 선형화 전 후의 output spectrum이 그림 11에 나타나 있다. AB 급 전력 증폭기보다 비선형 고효율 특성을 갖는 역 F급 전력 증폭기를 이용하였을 뿐만 아니라, gm3 성분들의 상쇄에 의한 선형성 향상보다는 적절한 로드 모듈레이션에 의한 고효율 특성을 목표로 설계되었기 때문에 다소 비선형적인 동작을 보임에도 불구하고 선형화 후 매우 선형적인 동작을 보이고 있음을 알 수 있다. 선형화 전후의 constellation 다이어그램은 그림 12에 도시되어 있으며, 최종 측정 결과가 표 4에 정리되어 있다. 선형화 후 제안된 3-stage



(a) 선형화 전 constellation 다이어그램 (b) 선형화 후 constellation 다이어그램  
(a) Constellation diagram before linearization (b) Constellation diagram after linearization

그림 12. 제안된 3-stage 도허티 전력 증폭기의 선형화 전후의 constellation diagram

Fig. 12. Constellation diagram of the proposed 3-stage Doherty PA before and after the linearization.

표 4. 8.5 dB의 PAPR을 갖는 802.16e Mobile WiMAX 신호에 대한 제안된 도허티 전력 증폭기의 선형화 전, 후의 측정 결과

Table 4. Measured result of the proposed 3-stage Doherty PA for 802.16e Mobile WiMAX signal with 8.5 dB PAPR before and after the linearization.

DFBPD	선형화 전	선형화 후
이득	12.15 dB	12.23 dB
출력 전력	37 dBm	36.85 dBm
DE	56.82 %	55.46 %
PAE	53.36 %	52.14 %
RCE	-16.22 dB	-37.23 dB

도허티 전력 증폭기는 약 7.7 dB 백 오프된 36.85 dBm의 출력 전력에서 55.46 % 및 52.14 %의 매우 높은 DE 및 PAE 특성을 얻었으며, RCE(Relative Constellation Error) 특성도 스펙인 -30 dB를 크게 상회하는 -37.23 dB의 결과를 얻었다. 따라서 본 논문에서는 처음으로 포화 증폭기인 역 F 급 전력 증폭기를 적용하여 비대칭 3-stage 도허티 전력 증폭기를 구현하였을 뿐만 아니라, 처음으로 이에 포락선 추적 기술에 기반한 적응 게이트 바이어스 신호를 인가하여 구조적으로 제대로 연기 힘든 도허티 동작을 적절히 이끌어냄으로써 고효율 전력 증폭기를 구현할 수 있음을 성공적으로 검증하였다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 8~10 dB 정도의 PAPR을 갖는 지국용 변조 신호에 대해 최적의 효율 특성을 유지할 수 있도록 하는 1:2:2의 비대칭 3-stage 도허티 전력 증폭기의 동작을 살펴보고, Freescale사의 4 W 및 10 W LD MOSFET을 이용하여 1 GHz 대역에서 구현하였다. 효율 특성을 최대화하기 위해 각각의 전력 증폭기를 역 F 급 전력 증폭기로 구성하였으며, 적절한 로드 모듈레이션 동작을 이끌어 내기 위해 포락선 추적 기술에 기반한 적응 게이트 바이어스 신호를 피킹 전력 증폭들에 인가하였다.

설계된 3-stage 도허티 전력 증폭기는 8.5 dB의 PAPR을 갖는 802.16e Mobile WiMAX 신호에 대해

약 7.7 dB 백 오프된 출력 전력인 36.85 dBm에서 55.46 %의 매우 높은 효율 특성을 얻었으며, -37.23 dB의 RCE 성능을 유지하면서 대단히 선형적인 동작을 보였다. 본 논문에서는 처음으로 포화 동작을 갖는 역 F급 전력 증폭기 및 포락선 추적 기술에 기반한 적응 게이트 바이어스 신호를 비대칭 3-stage 도허티 전력 증폭기에 적용함으로써, 높은 PAPR을 갖는 신호에 대해서도 대단히 높은 효율 특성을 유지할 수 있음을 성공적으로 검증하였다. 본 설계 방법은 지국용 고효율 전력 송신기의 설계에 있어서 대단히 유용한 구조가 될 것으로 기대된다.

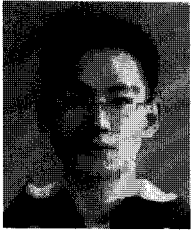
## 참 고 문 헌

- [1] F. Wang, D. F. Kimball, J. D. Popp, A. H. Yang, D. Y. Lie, P. M. Asbeck, and L. E. Larson, "An improved power-added efficiency 19-dBm hybrid envelope elimination and restoration power amplifier for 802.11 g WLAN applications", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 54, no. 12, pp. 4086-4099, Dec. 2006.
- [2] I. Kim, Y. Y. Woo, J. Kim, J. Moon, J. Kim, and B. Kim, "High-efficiency hybrid EER transmitter using optimized power amplifier", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 56, no. 11, pp. 2582-2593, Nov. 2008.
- [3] I. Kim, J. Kim, J. Moon, and B. Kim, "Optimized envelope shaping for hybrid EER transmitter of mobile WiMAX-optimized ET operation", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 19, no. 5, pp. 335-337, May 2009.
- [4] S. C. Cripps, *Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design*, Norwood, MA: Artech House, 2002.
- [5] F. H. Raab, "Efficiency of doherthy RF power-amplifier systems", *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. BC-33, no. 3, pp. 77-83, Sep. 1987.
- [6] W. C. E. Neo, J. Qureshi, M. J. Pelk, J. R. Gajadharsing, and L. C. N. de Vreede, "A mixed-signal approach towards linear and efficient N-way doherthy amplifiers", *IEEE Trans. Microw. Theory*



- Tech.*, vol. 55, pp. 866-879, May 2007.
- [7] M. J. Pelk, W. C. Neo, J. R. Gajadharsing, R. S. Ngelly, and L. C. N. de Vreede, "A high-efficiency 100-W GaN three-way doherty amplifier for base-station applications", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 56, pp. 1582-1591, Jul. 2008.
- [8] 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. Microw. Theory Tech.*, vol. 56, no. 2, pp. 328-338, Feb. 2008.
- [9] J. Moon, J. Kim, I. Kim, J. Kim, and B. Kim, "A wideband envelope tracking Doherty amplifier for WiMAX systems", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 18, no. 1, pp. 49-51, Jan. 2008.
- [10] Y. Y. Woo, J. Kim, J. Yi, S. Hong, I. Kim, J. Moon, and B. Kim, "Adaptive digital feedback predistortion technique for linearizing power amplifier", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 55, no. 5, pp. 932-940, May 2007.

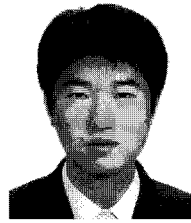
김 일 두



송신기 설계

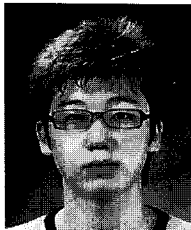
2004년 2월: 전남대학교 전자공학과 (공학사)  
 2004년 3월~현재: 포항공과대학교 전자과 박사과정  
 [주 관심분야] RF 전력 증폭기 설계 및 선형전력 증폭기(LPA) 시스템 설계, 기지국용 고효율 전력

문 정 환



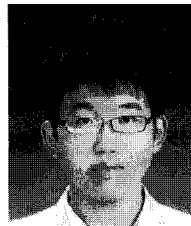
2006년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학사)  
 2006년 3월~현재: 포항공과대학교 전자과 박사과정  
 [주 관심분야] 고효율 고선형 RF 전력 증폭기 설계, 디지털 선형화 알고리즘 연구

지 승 훈



2009년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)  
 2009년 3월~현재: 포항공과대학교 전자과 석사과정  
 [주 관심분야] 고효율 고선형 RF 전력 증폭기 설계

손 정 환



2008년 2월: 세종대학교 물리학과 (이학사)  
 2008년 3월~현재: 포항공과대학교 전자과 석사과정  
 [주 관심분야] 고효율 고선형 RF 전력 증폭기 설계

김 정 준



2007년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)  
2007년 3월~현재: 포항공과대학교 전자과 석사과정  
[주 관심분야] 고효율 고선형 RF 전력 증폭기 설계

김 범 만



1979년 2월: 카네기멜론대학 전기공학부 전자공학과 (공학박사)  
1978년~1981년 : GTE Lab. 연구원  
1981년~1988년: TI Central Research Lab. 연구원  
1989년~2003년: 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부 정교수  
1994년~2004년: 포항공과대학교 마이크로웨이브 응용 연구 센터(MARC, funded by ADD) 센터장  
2002년 7월~2005년 6월: T-MTT Associate Editor(IEEE)  
2003년 4월~현재: 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부 BK 사업단장  
2003년~2004년: 한국과학기술한림원 중신회원 및 공학부 정보통신 분과장  
2003년~2004년: 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부 주임교수  
2004년~2005년: 대한전자공학회 협동 부회장  
2004년 4월~현재: 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부 남교석좌교수  
2005년 1월~2007년 12월: Distinguished Lecturer (IEEE MTT society)  
2007년 1월: IEEE Fellow 선정  
2008년 11월: 경암 학술상 공학분야 수상  
2009년 3월: POSTECH Fellow 선정  
[주 관심분야] 이동통신용 전력 증폭기, RF 회로 설계 및 소자 모델링, III-V 화합물 반도체, 초고주파 집적회로 (MMIC) 설계 및 구현, 밀리미터 웨이브 회로 설계