

도허티 전력증폭기의 성능개선에 관한 연구

A Study on Improving Performance of the Doherty Power Amplifier

최종명
(광운대, 석사과정)

장정석
(광운대, 박사과정)

도지훈
(광운대, 박사과정)

홍의석
(광운대, 교수)

Key word : Doherty, Asymmetrical, N-way, Uneven

목 차

- I. 서론
- II. 기본이론
 - 1. 비대칭 Doherty 전력증폭기
 - 2. N-way Doherty 전력증폭기
- III. 설계
 - 1. 비대칭 전력증폭기
- 2. 3-way 전력증폭기
- IV. 모의실험
- V. 결론
- 참고문헌

I. 서론

오늘날 정보 통신량의 수요 확대에 따라 이동 및 무선 통신 시스템의 핵심 부품인 전력증폭기는 광범위하게 연구되고 응용되는 중요한 기술이다.

통신 시스템에서 전력증폭기를 이용하여 여러 채널의 신호를 동시에 원하는 송신 출력으로 증폭시키게 되는데, 신호를 증폭하는데 있어서 왜곡이 없는 전송을 하기 위해서는 전력증폭기가 높은 선형성을 가지고 있어야 한다. CDMA 및 WCDMA 같은 디지털 변조 신호는 신호의 평균 전력과 피크 전력의 차이가 크기 때문에 전력 용량이 큰 소자를 사용하여 요구되는 선형특성을 얻는다.

송신기의 최종단에 위치한 전력증폭기의 경우 반송파의 진폭과 위상이 동시에 변하는 입력 신호를 왜곡 없이 증폭하기 위해서는 높은 선형성이 필요하다. 그러나 전력증폭기는 그 동작 특성상 증폭기능으로 큰 전류를 소모하고 많은 열을 방출하기 때문에 통신시스템의 안정성을 저해하는 요소가 된다. 증폭기의 전력레벨 증가와 소형화, 소모되는 전력의 최소화 및 열 문제로 인해 증폭기의 높은 선형성뿐만 아니라 고효율 특성도 매우 중요한 특성 항목이다. 따라서 RF 전력증폭기가 고효율이라는 특수성을 감안하면 효율 개선문제는 그 중요성을 간과할 수 없다.[1] [5]

이러한 상황에서 다양한 통신 서비스를 효율적으로 통합 운용 및 관리하기 위해서는 기존의 통신 장비의 선형성 및 효율 그리고 가격이 중요한 경쟁 요소가 된다.

본 논문은 고선형 및 고효율 특성을 동시에 성취할 수 있는 방법으로 최근에 가장 각광 받고 있는 Doherty 방식을 이용하여 고효율 전력증폭기의 핵심요소 기술인 전력증폭기의 선

형성 및 효율을 개선하기 위한 비대칭 Doherty 전력증폭기와 N-way 전력증폭기의 설계 및 비교에 관한 연구이다.

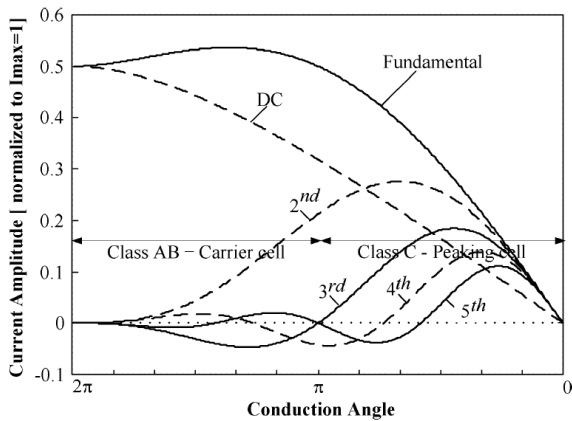
II. 기본이론

1. 비대칭 Doherty 전력증폭기

최근 무선 통신 시스템에서 전력 증폭기는 소형화로 인하여 발생하는 방열의 문제를 해결하기 위해 고효율 특성을 갖으면서 동시에 높은 선형성을 갖는 증폭기 개발이 필수적이다. Doherty 구조를 갖는 증폭기는 일반적으로 AB급에서 동작하는 주 증폭기와 C급에서 동작하는 피킹 증폭기로 구성되어 있다. 피킹 증폭기의 전류는 주 증폭기에 비해 언제나 낮은 레벨에서 동작하기 때문에, 두 증폭기의 부하 임피던스는 높은 전력 정합을 위한 적절한 임피던스 값으로 모두 변조되는데 그 한계가 있다. 따라서 두 증폭기 모두 원하는 최대 전력을 발생할 수가 없게 된다. 도허티 증폭기에서의 적응형 바이어스 기법은 이러한 문제를 해결하는데 좋은 해법이 되기도 한다. 적응형 바이어스에서는 일시적으로 입력 신호의 크기가 증가될 경우에 피킹 증폭기의 게이트 바이어스 전압이 신호의 포락선을 따라 증가한다. 따라서 완벽한 도허티 동작을 이루는 것이 가능할 수도 있다. 하지만 그것은 외부적인 전압조정 회로를 필요로 하며 그 때문에 회로가 복잡해지는 단점이 있다.[2]

비대칭 도허티 구조는 어떠한 외부 회로도 없이 그 단점을 극복하는 것을 목표로 제안되었다. 이를 달성하기 위하여 주 증폭기와 피킹 증폭기 사이의 입력 전력을 서로 다르게 주

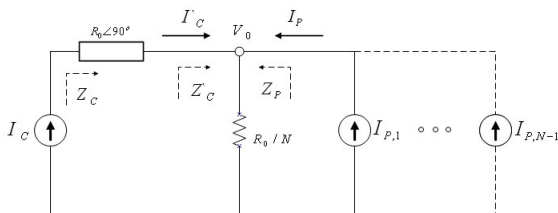
입하는 방식을 이용한다. 비대칭 도허티 구조에서는 비대칭 전력 분배기를 통해, 주 증폭기에 비해 더 많은 전력이 피킹 증폭기에 주입된다. 적응형 바이어스와 마찬가지로, 주 증폭기와 피킹 증폭기에서의 기본파 전류는 전력 레벨에서는 같아질 수 있다. 그 결과, 두 증폭기에서의 임피던스는 높은 전력 레벨에서 최적화된 전력 정합의 값으로 모두 변조될 수 있다. 그리고 최대 전력은 일반적으로 부하에 모두 전달된다. 또한, 각각의 증폭기의 최적화된 정합 임피던스는 높은 선형성을 갖도록 해주는 큰 특징을 갖는다. 그림1은 최대 구동전력에서 일반적인 증폭기의 전류 레벨을 전도각의 함수로 나타낸 것이다.



〈그림1〉 전도각 대 전도전류의 고조파 성분

2. N-way Doherty 전력증폭기

일반적으로 N-way 도허티 증폭기는 하나의 주증폭기를 가지면서 N-1개의 피킹 증폭기로 구성되어 진다. N-way 증폭기의 개념도를 그림2에 나타내었다. N-way 도허티 증폭기의 부하변조는 2-way 도허티 증폭기 해석과 같이 이상적인 전류원으로 해석될 수 있다. 그림3에 나타낸 것과 같이 I_c 와 $I_{p,1} \dots I_{p,N-1}$ 의 이상적인 교류 전류원으로 전개되는 하나의 주증폭기와 N-1개의 피킹 증폭기로 각각 나타낼 수 있다.

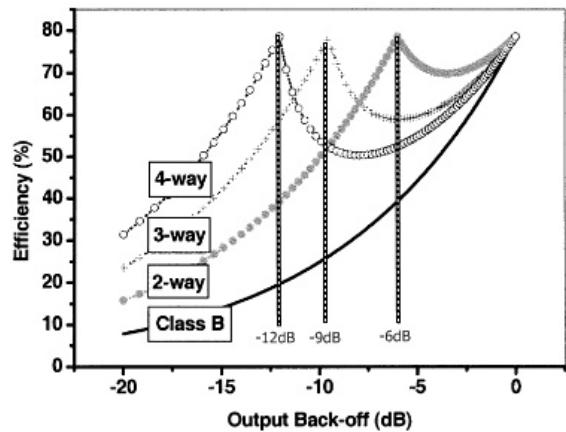


〈그림2〉 N-way Doherty amplifier의 구성도

$$Z_c = \frac{N \cdot R_0 \cdot I_c}{I_c + (N-1) \cdot I_p}, \quad 0 \leq I_p \leq I_c \quad (1)$$

위의 식(1)로부터, N-way 도허티 전력증폭기의 부하 저항은 피킹 증폭기의 공급 전류와 분기되는 경로의 수에 따라 변조될 수 있다. 낮은 입력 전력 동작에서는 $I_p = 0$ 이므로 부하저항은 $N \cdot R_0$ 값을 갖게 되고, 높은 입력 전력 동작에서는 $I_p = I_c$ 가 되므로, 부하저항은 R_0 가 된다. 중간 입력 전력 구간에서 경우 $0 \leq I_p \leq I_c$ 값이 되므로, 부하저항은 $N \cdot R_0$ 과 R_0 사이에서 변환된다.[3]

그림3은 일반적인 B급 증폭기와 2, 3, 4-way 도허티 증폭기의 효율곡선을 계산하여 도시한 것이다. 각각의 6dB와 9dB back-off 점에서의 2-way, 3-way에 대하여 효율 최대점이 나타남을 알 수 있다. 일반적으로 효율적인 측면에서는 2-way에 비해 3-way가 더 우수하다고 할 수 있으며 좀 더 많은 back-off 점에서 동작하기 때문에 좀 더 우수한 선형 성능을 가질 수 있다.



〈그림3〉 N-way Doherty의 이상적인 효율

III. 설계

본 연구에서는 도허티 전력증폭기의 성능 개선을 위한 방법으로 비대칭 구조와 N-way 구조를 이용하여 각각 두 가지 구조의 전력증폭기를 제안하였다. 또한, 도허티 구조에서 효율에 가장 직접적인 영향을 주는 주 증폭기에 사용되는 소자를 보편화된 LDMOS FET가 아닌 GaAs FET 소자를 이용하여 효율 증대 효과를 기대하였다.

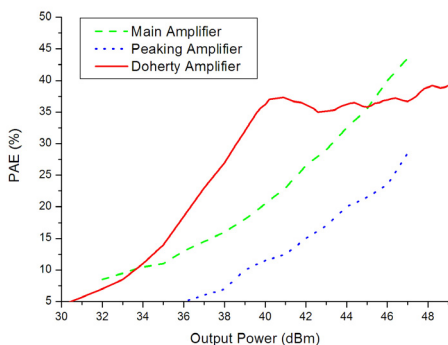
WCDMA 신호는 약 12dB 이상의 높은 피크 대 평균 전력 비를 가진다. 따라서 4FA를 12W로 출력하기 위해서는 종단 증폭기의 최대 출력이 약 180W 정도의 특성을 갖추어야 한다. 이를 위해 종단 전력 증폭기의 구성은 60W 소자 한 개와 120W 소자 한 개를 이용하는 2-way 구조와 60W 소자 세 개를 이용하는 3-way 구조를 결정하였다. 각각의 구조에서 12.5dB back-off를 통해 12W 출력에서 기본적으로 선형성을 확보하였다. <표1>은 설계 하고자하는 전력증폭기의 설계 사양이다.

구분	설계사양	비고
주파수 [GHz]	2.13 ~ 2.15	BW : 20 MHz
평균출력전력 [Watt]	12	
PAE [%]	> 25	
ACLR [dBc@±5MHz]	> 42	

〈표1〉 전력 증폭기의 설계 사양

1. 비대칭 증폭기 설계

주 증폭기에는 PEP 60W Fujitsu FLL600IQ-2 소자를 이용하였고, 피킹 증폭기에는 주 증폭기보다 용량이 2배 큰 PEP 125W Freescale MRF21150 소자를 이용하여 비대칭 구조를 이루었다. 비균등 구동전력을 이루기 위한 방법으로는 비균등 커플러를 이용하여 주 증폭기와 피킹 증폭기에 구동되는 전력의 크기를 서로 다르게 만드는 방법과 균등한 3dB 커플러를 이용하고 대신 주 증폭기의 input path에 attenuator를 이용하여 피킹 증폭기와의 입력전력에 차이를 두는 방식이 있다. 본 연구에서는 π 형 attenuator를 이용하여 비균등 구동전력을 얻을 수 있었다. 주 증폭기와 피킹 증폭기를 서로 다른 소자를 이용함으로써 생긴 첫 번째 문제는 출력 정합부분에서 발생하였다. 기존의 Doherty 증폭기는 크기, 용량면에서 서로 동일한 소자를 사용하였기 때문에 주 증폭기와 피킹 증폭기를 결합할 때에 큰 어려움이 없었다. 하지만 본 연구에서는 GaAs FET과 LDMOS를 결합해야 하기 때문에 두 경로를 통해 증폭된 신호의 time delay와 phase를 정확하게 맞추기 위하여 offset line을 적절히 이용하였다. 그림4은 각 증폭기의 효율과 제안된 구조를 갖는 Doherty 증폭기와의 효율을 비교하여 나타내고 있다.



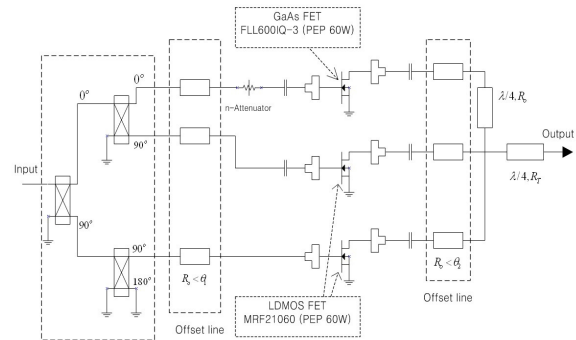
〈그림4〉 증폭기들의 파워증가 효율 비교

2. 3-way 증폭기 설계

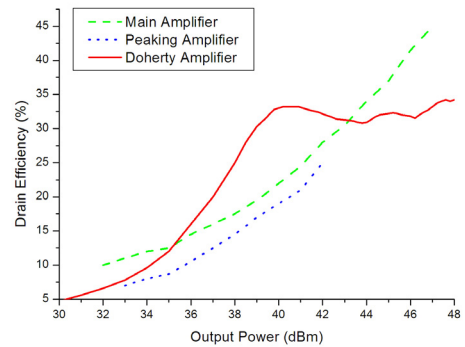
Doherty 증폭기는 높은 선형성을 얻기 위해 주 증폭기와 피킹 증폭기의 혼변조 성분을 제거하도록 바이어스 된다. 그 중에서도, 3-way Doherty 증폭기는 가장 좋은 선형성을 제공한다. 왜냐하면 고조파 성분을 좀 더 정확하게 제거할 수

있기 때문이다. 그리고 주 증폭기에 비해 용량이 두 배가 되는 피킹 증폭기를 이용하기 때문에 충분한 기본파 전류를 전달할 수가 있다. 하지만, 두 배가 큰 용량을 갖는 피킹 증폭기를 이용하여 게이트 바이어스를 조정하는 것만으로는 정확하게 고조파 성분들을 상쇄시킬 수가 없기 때문에 높은 선형성을 얻는데 한계가 있다.

2-way Doherty 증폭기의 선형성 증가는 주로 IMD3를 상쇄하여 얻어졌다. 균등한 구동전력을 갖는 3-way Doherty 증폭기는 같은 바이어스 점을 갖는 두 개의 피킹 증폭기가 동일하게 동작하기 때문에 오로지 IMD에 대해서만 최적화가 되어졌다. 따라서 IMD3뿐만 아니라 IMD5까지 상쇄하기 위해서 두 개의 피킹 증폭기의 게이트 바이어스와 부하회로를 서로 다르게 설정하여야 한다. 그림5, 6는 증폭기의 구성도와 효율이다.[4]



〈그림5〉 3-way 비대칭 전력 증폭기 구성도



〈그림6〉 증폭기들의 파워증가 효율 비교

IV. 모의실험

1. 2-Tone

그림7은 비대칭 전력증폭기들의 출력 전력에 따른 3차와 5차의 혼변조 특성을 보인다. 2137.5MHz와 2142.5MHz의 5MHz tone spacing을 갖는 2-tone 주파수를 인가하여 그 특성을 확인하였고, 출력전력 12W에서 10dB 이상의 3차 혼변조 성능이 개선되어 -50dBc 이하의 선형성능을 얻었다.

V. 결론

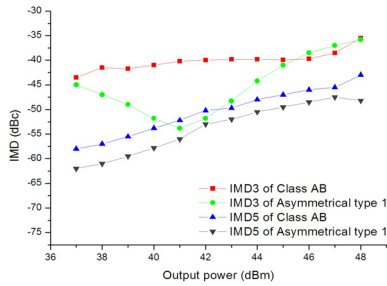
본 논문에서는 고효율과 높은 선형성을 갖는 12W급 Doherty 전력증폭기를 설계하고 그 특성을 비교하였다. 높은 선형성을 갖는 LDMOS FET을 이용하여 Doherty 증폭기를 구성하던 기존의 방식을 벗어나 Doherty 전체 효율을 좌우하는 주 증폭기를 효율이 높은 GaAs FET 소자로 대체하여 선형성의 개선에 따른 Doherty 전력증폭기의 효율 감소를 보상하는 방식을 제안하였다. 또한 전체 증폭기의 높은 효율과 선형성을 얻기 위하여 비대칭 구조와 3-way 구조를 이루는 방법을 제안하였다. 한 가지는 피킹 증폭기를 주 증폭기 용량의 두 배가 되는 소자를 이용하는 비대칭 2-way 방식이며, 다른 한 가지는 주 증폭기와 같은 용량을 갖는 소자 두 개를 이용하여 피킹 증폭기를 구성하는 3-way 방식이다.

Doherty 전력증폭기의 성능개선을 위해 제안된 방법을 통하여 두 가지 형태로 설계 및 모의 실험하여 최대 출력전력의 12.5 dB back-off 지점에서 최대 효율을 갖는 최적의 효율 피킹점을 얻었다. 2-tone 실험결과 출력전력 12W에서 3차 및 5차 혼변조 성능이 개선되었다. 또 2-way 보다 3-way에서 많은 성능 개선이 이루어지는 것을 알 수 있다. 또한 W-CDMA 4FA 실험 역시 출력전력에 따른 ACLR 성능이 제안된 증폭기에서 향상됨을 알 수 있었다.

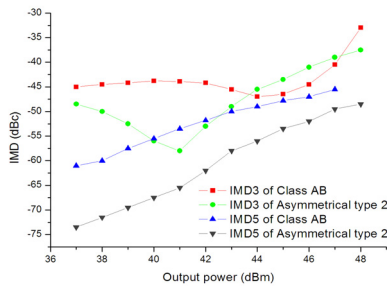
이번 전력증폭기의 성능개선에 관한 연구를 토대로 향후 선형화기에 관한 연구와 새롭게 주목받고 있는 GaN 소자 및 Multi-Doherty 구조에 관한 연구를 통해 보다 높은 평균 출력을 얻기 위한 노력이 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] Steve C. Cripps, "RF Power Amplifiers for Wireless Communications", ARTECH HOUSE, 2nd, 2006.
- [2] J. Cha, Y. Yang, B. Shin, and B. Kim, "An adaptive bias controlled power amplifier with a load-modulated combing scheme for high efficiency and linearity", in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol.1, Jun. 2003, pp. 81-84
- [3] Y. Yang, J. Cha, B. Shin, and B. Kim, "A fully matched N-way Doherty amplifier with optimized linearity", *IEEE Trans. Mirow. Theory Tech.*, vol.51, no.3, pp.986-993, Mar. 2003.
- [4] Ildu Kim, Jeonghyeon Cha, Sungchul Hong, Jangheon Kim, YoungYun Woo, Cheon seok Park, and Bumman Kim, "Highly Linear Three-Way Doherty Amplifier with Uneven Power Drive for Repeater



(a) 2-way

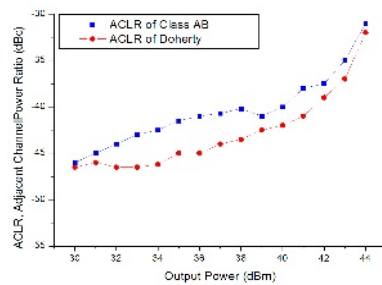


(b) 3-way

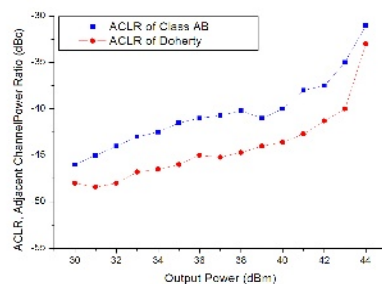
<그림7> 5MHz tone spacing을 갖는 2-tone 신호의 IMD3와 IMD5의 성능

2. W-CDMA 4FA

W-CDMA 4FA 신호는 20MHz(5MHz/1FA*4)의 대역폭을 갖는다. 그림8은 제안된 증폭기들의 4FA ACLR 특성을 나타낸다.



(a) Asymmetrical



(b) 3-way

<그림8> 출력전력에 따른 4FA ACLR 특성

System” , *IEEE Microwave and Wireless Component Letters*, Vol.16, No.4, pp.176–178, Apr., 2006.

[5] 이형규, “자동이득제어를 적용한 WCDMA 대역의 고효율 전력증폭기” , 광운대학교, 2006.