

N-way 도허티 증폭기의 선형성 최적화 설계 및 성능 비교

차정현, 양영구, 신범재, 김범만
포항공과대학교 전자 전기 공학과
tel) 054-279-5584 / fax) 054-279-2903

Design of N-way Doherty Amplifiers focused on Linearity and Performance Comparison

Jeonghyeon Cha, Youngoo Yang, Bumjae Shin, and Bumman Kim
Department of Electronic and Electrical Engineering and Microwave Application Research center,
Pohang University of Science and Technology
E-mail: jhcha46@postech.ac.kr

Abstract

In this paper, we have compared the performance of the N(2~4)-way Doherty amplifiers by testing for efficiency and linearity. For the experiments, 2.14GHz N-way Doherty amplifiers have been implemented using 4 watt PEP LDMOSFETs. The gate-biases of the Doherty amplifiers have been tuned for the test linearity and the performances of the amplifiers have been compared with those of class AB amplifiers, respectively, using forward-link WCDMA signal. The experimental results show the superior performance of Doherty amplifiers. The 2-way Doherty amplifier is the optimum for high efficiency operation. However, the 3-way and 4-way Doherty amplifiers are more attractive for linear operation.

I. 서론

기지국용 전력 증폭기의 성능을 좌우하는 가장 중요한 척도는 선형성이다. 지금까지 선형성 요구사항을 만족시키기 위해 Feedback, Predistortion, Feed-forward 등과 같은 여러 가지 선형화 기법이 개발되었으며[1],[2], 이 때 주증폭기는 주로 class A나 AB 모드로 동작한다. 이 모드는 기본적으로 효율이 낮기 때문에 증폭기의 전력 레벨 증가 및 소형화에 따른 열 문제를 피할 수 없게 된다. 따라서 증폭기의 효율성 개선이 점차 중요한 이슈가 되고 있다. 효율성을 개선시키기 위한 기법에는 Doherty, LINC, Kahn, Bias-control 등이 있는데[1],[2], 도허티 증폭기는 부가적인 회로가 필요 없고, 구현이 간단하다는 측면에서 큰 이점이 있다. 또한 2-way 도허티 증폭기에 대해서는 효율성과 선형성이 동시에 개선될 수 있음이 제시된 바 있다[3],[4].

본 논문에서는 2-way뿐만 아니라 3-way와 4-way 도허티 증폭기를 제작하여 성능을 비교하였다. 여기서 N-way 도허티

증폭기는 1:(N-1) 도허티 증폭기와 같은 동작을 하지만, peaking amp의 크기를 carrier amp 크기의 (N-1)배로 하는 게 아니라 크기가 같은 소자를 (N-1)개 이용한다. 실험을 위해 순방향 WCDMA 신호가 사용되었으며, 각각의 도허티 증폭기들이 class AB 증폭기에 비해 효율성과 선형성이 우수함을 확인하였다. 도허티 증폭기들의 성능 비교 및 구체적인 개선량이 실험결과에 나타나 있다.

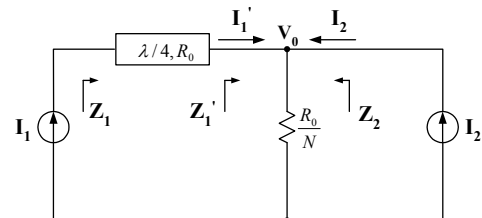


그림 1. 부하 임피던스 변조 설명을 위한 간단한 회로

II. 부하 임피던스 변조

도허티 증폭기의 동작 원리는 여러 참고 자료에 잘 설명되어 있는데[1]-[7], 그 동작 원리의 핵심은 부하 임피던스 변조(load modulation)를 이용한다는 것이다. 그 원리를 일반적인 N-way 도허티 증폭기로 확장하기 위해 그림 1을 도시하였다.

$$Z_1' = \frac{V_0}{I_1'} = \frac{R_0}{N} \left(\frac{I_1' + I_2}{I_1'} \right), \quad 0 \leq I_2 \leq (N-1)I_1' \quad (1)$$

$$Z_1 = \frac{R_0^2}{Z_1'} = \frac{NR_0}{1 + I_2/I_1'} = \frac{NR_0}{1 + \alpha}, \quad 0 \leq \alpha \leq N-1 \quad (2)$$

그림 1의 회로로부터 식 (1)과 (2)가 계산될 수 있는데, 여

기서 N은 N-way를 나타낸다. 식 (2)에서, I_2 의 전류량에 따라 임피던스 Z_1 이 $R_0 \sim N \cdot R_0$ 사이의 값을 갖게 됨을 알 수 있다. 이 범위는 N-way 도허티 증폭기에서 carrier amplifier의 부하 임피던스가 변조될 수 있는 범위를 의미한다.

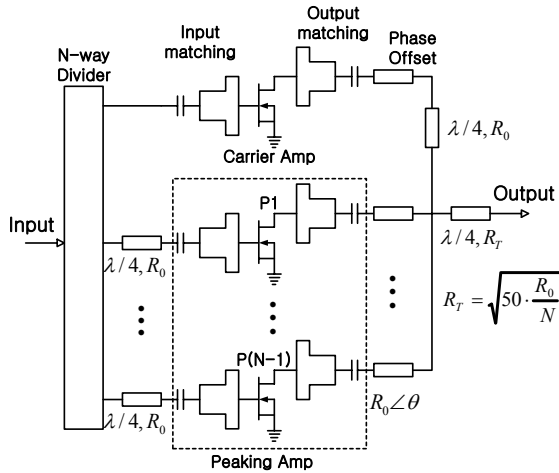


그림 2. N-way 도허티 증폭기 회로도

III. 설계 및 제작

이번 실험에서 설계된 2.14 GHz 2~4-way 도허티 증폭기에 대한 전체적인 회로도를 일반화하여 그림 2에 나타내었다. 설계를 위해 HP사의 ADS simulator를 사용하였고, carrier amplifier와 peaking amplifier에 사용된 소자는 모두 Motorola사의 MRF281SR1(4-watt PEP) LD MOSFET이다. 입력과 출력 정합은 $R_0=50 \Omega$ 으로 이루어졌고, 이 때 각각의 소자에 대한 출력 전력은, IMSR(Inter-Modulation to Signal Ratio)이 -30 dB일 때, $P_{out}=30 \text{ dBm}$ 정도로 균일했다.

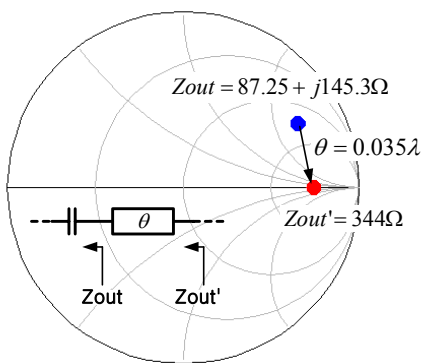


그림 3. Phase Offset의 길이 결정

도허티 증폭기를 설계하는데 있어 중요한 점은 낮은 전력 레벨에서 peaking amp가 개방된 것처럼 보이게 할 뿐만 아니라 carrier amp의 출력단에서 $\lambda/4(50 \Omega)$ 선로를 통해 적절한 부하 임피던스 변조가 이루어지도록 하는 것이다. 낮은 전력

레벨에서 부하 임피던스를 크게 함으로써 효율을 향상시키고 이득의 감소를 막을 수 있다. 그 목적으로 phase offset line이 필요하다[3],[4]. 그림 3은 정합된 소자를 바탕으로 어떻게 phase offset의 길이가 결정되었는지를 보여준다. 벡터 네트워크 분석기(Vector Network Analyzer)를 이용해 Z_{out} 을 측정 한 후, ADS simulator를 통해 phase offset의 길이($\theta=0.035\lambda$)를 결정하였다. Peaking amp 입력단의 $\lambda/4(50 \Omega)$ 선로는 carrier amp와의 위상차를 보상해주기 위한 것이며, 최종 출력단의 $\lambda/4(R_T)$ 선로는 임피던스 50Ω 을 $50/N \Omega$ 으로 변환시키기 위한 것이다.

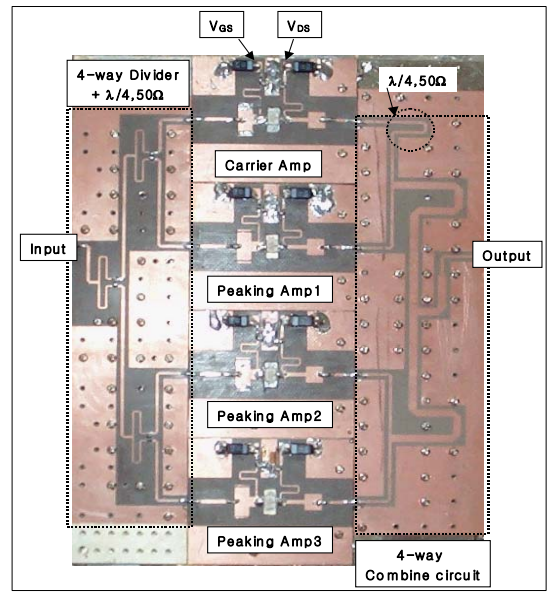
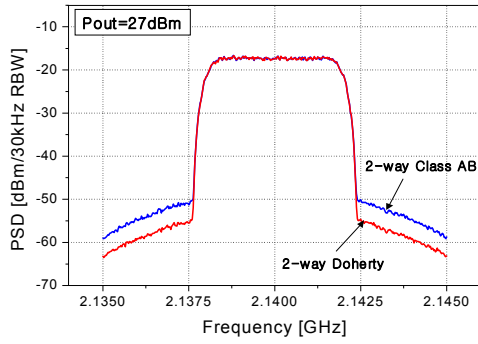


그림 4. 제작된 4-way 도허티 증폭기의 실제 회로

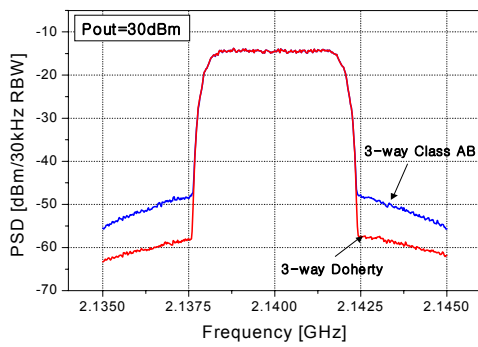
그림 4는 실제로 제작된 2.14 GHz 4-way 도허티 증폭기 회로이다. 2-way와 3-way에 대한 회로는 분배기와 결합기만 바꿀 수 있도록 하였다. 제작에 사용된 기판은 RF35($\epsilon_r=3.5$, $h=0.5 \text{ mm}$)이며, 레이아웃의 편리성을 위해 결합기에 $\lambda/2$ 혹은 $\lambda(50 \Omega, 25 \Omega)$ 선로를 삽입하였다.

IV. 측정 결과 및 분석

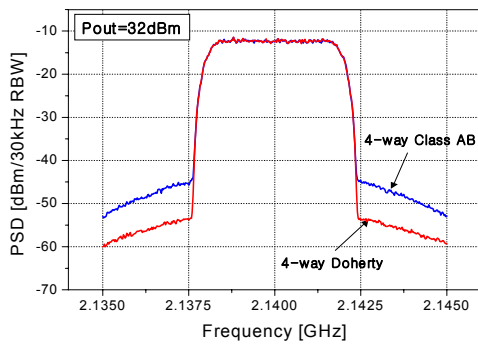
제작된 2~4-way 도허티 증폭기의 성능을 검증하기 위해 우리는 class AB 증폭기와 성능과 비교하였다. 그림 4와 같이 제작된 도허티 증폭기 회로에서 carrier amp와 peaking amp들의 bias point를 같게 하면, 모든 amp들이 부하 임피던스를 50Ω 으로 보기 때문에, class AB 증폭기의 동작을 하게 된다. Class AB 동작을 시킨 후, 출력 전력 레벨을 고정시키고 peaking amp들의 게이트 전압을 낮춰가면서 선형성이 가장 많이 개선되는 점을 찾으면 선형성이 최적화된 N-way 도허티 증폭기의 bias point를 얻을 수 있다. 그런 다음에 출력 전력을 sweep하면서 두 증폭기(class AB와 Doherty)의 선형성과 효율성을 비교하였다.



(a)



(b)

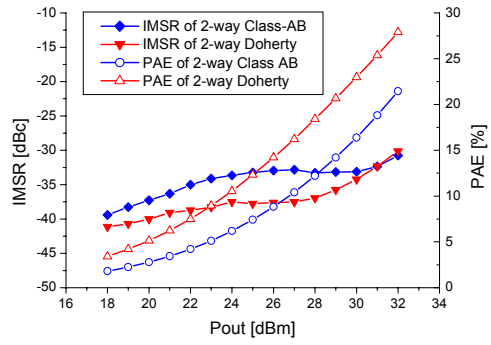


(c)

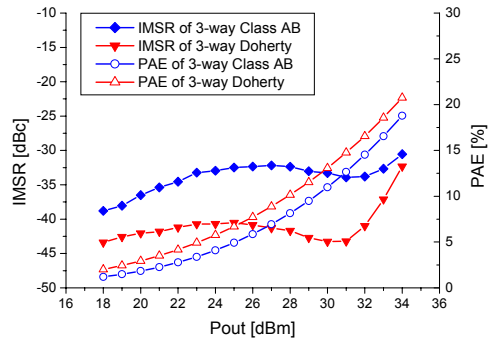
그림 5. Class AB와 도허티 증폭기의 선형성 최적화 (a) 2-way (b) 3-way (c) 4-way

Class AB 증폭기의 경우, carrier와 peaking amp들의 bias point는 모두 $V_{DSQ}=26V$, $I_{DSQ}=60mA$ 이고, 도허티 증폭기 동작을 위해 carrier amp의 bias는 그대로 두고 peaking amp의 게이트 전압을 낮추면서 선형성을 최적화하였다. 그림 5는 class AB와 선형성이 최적화된 도허티 증폭기의 스펙트럼을 나타낸다. 2-way의 경우 $P_{out}=27\text{ dBm}$ 에서, 3-way의 경우 30 dBm 에서, 그리고 4-way의 경우는 32 dBm 에서 선형성이 가장 많이 개선되었으며, 개선량은 2.5 MHz offset에서 각각

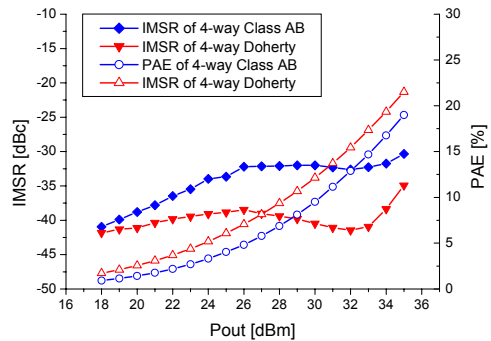
4.69 dB , 9.97 dB , 8.83 dB 이다. 이 때 peaking amp들의 bias 조건(idle current)은 2~4-way에 대해서 각각 0.1 mA , 12.8 mA , 15.7 mA 이다. 이 bias 조건에서 출력 전력을 sweep한 결과를 그림 6에 나타내었다. 선형성 개선에 있어 3-way와 4-way 도허티 증폭기가 2-way보다 우월함을 알 수 있으며, 효율성의 경우는 2-way 도허티 증폭기가 우수한 성능을 보인다. 효율성 개선량은 2~4-way 도허티 증폭기의 최적화된 전력 레벨 이상에서 각각 6.5% , 2.1% , 2.5% 정도였다.



(a)



(b)



(c)

그림 6. Class AB와 도허티 증폭기의 선형성 및 효율성 비교 (a) 2-way (b) 3-way (c) 4-way

도허티 증폭기에서 선형성이 상당히 개선되었다는 것은 carrier amp와 peaking amp에서 생성된 IM3 성분의 위상이 180°에 가깝다는 것을 의미한다. 결과에 대한 분석을 간단하게 하기 위해 우선 두 amp에 의해 생성된 IM3들의 위상차를 180°라 가정하자. 그러면 carrier amp가 포화되어 생긴 IM3 성분을 상쇄시키기 위해서 peaking amp는 크기가 같은 IM3 성분을 생성해야 한다. 그러기 위해서 2-way의 경우에는 peaking amp가 1개이기 때문에 bias를 상당히 낮추어야 한다. 그렇게 되면 많은 효율성의 개선을 기대할 수 있으나, IM5나 IM7 성분이 커지게 되어 선형성 개선은 제약된다. 반대로 3-way나 4-way의 경우는 peaking amp가 생성해야 할 IM3 성분의 크기가 각각 2-way의 1/2과 1/3이기 때문에 고차 IM 성분에 의한 제약은 적지만, bias를 많이 낮출 수 없기 때문에 효율성 개선은 적다. 이번 실험에서 3-way 도허티 증폭기의 선형성 개선량이 4-way보다 많았다. 이것은 carrier amp와 peaking amp에 의해 생성된 IM3 성분의 위상차가 4-way보다는 3-way가 180°에 가깝다는 것을 의미한다.

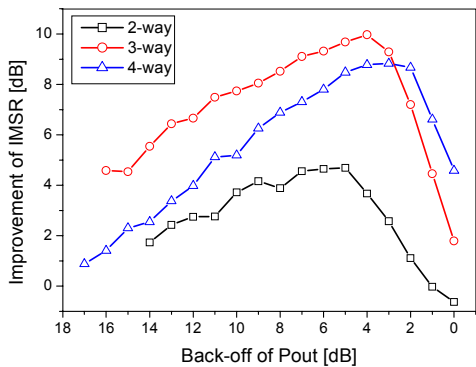


그림 7. 출력 전력 back-off에 따른 Class AB에 대한 도허티 증폭기의 선형성 개선량

측정 결과에 대한 또 다른 분석을 위해, class AB 증폭기의 IM3R이 -30dBc정도일 때의 출력 전력을 기준으로 출력 전력을 back-off 했을 때의 도허티 증폭기의 선형성 개선량을 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 우리는 3-way와 4-way가 선형성 개선 측면에서 2-way보다 유리함을 다시 한 번 확인할 수 있었다. 2-way 도허티 증폭기의 경우 출력 전력(Pout)이 5 dB back-off 된 지점에서, 3-way의 경우는 4 dB, 4-way의 경우는 3 dB back-off 된 지점에서, 개선량의 차이는 있지만, 선형성이 가장 많이 개선되었음을 확인할 수 있다. 이러한 추세를 볼 때, way 수를 늘리게 되면 더 높은 전력 레벨에서 선형성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

V. 결론

도허티 증폭기는 본래 효율성을 향상시키기 위해 제안되었지만, 동시에 선형성도 개선시킬 수 있다. 본 논문에서 우리는 carrier amp와 peaking amp에 대해 같은 소자(Motorola사의 4 watts PEP LDMOSFET)를 사용하는 N-way 도허티 증폭기의 설계 및 제작 방법을 제시하였다. 실험을 위해 2.14 GHz 2~4-way 도허티 증폭기를 제작하였고, 성능 검증을 위해 forward-link WCDMA 신호를 사용하여 측정하였다. 실험 결과 도허티 증폭기는 class AB 증폭기에 비해 효율성과 선형성이 모두 유리함을 알 수 있었다. 2-way 도허티 증폭기는 선형성보다는 효율성이 증시될 경우에 바람직하며, 3-way나 4-way 도허티 증폭기는 선형성 개선에 있어서 2-way보다 우월한 성능을 보인다. 실험에 대한 추세를 볼 때, N(way 수)을 크게 하면 보다 높은 전력 레벨에서 선형화시킬 수 있다. 이번 실험 결과로부터 N-way 도허티 증폭기는 높은 선형성과 효율성을 요구하는 기지국용 전력 증폭기에 적용 가능할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] P.B. Kenington, "High Linearity RF Amplifier Design", Artech House Inc., Norwood, MA, 2000.
- [2] S.C. Cripps, "RF Power Amplifiers for Wireless Communications", Artech House Inc., Norwood, MA, 1999.
- [3] Y. Yang, J. Yi, Y.Y. Woo, and B. Kim, "Optimum Design for Linearity and Efficiency of a Microwave Doherty Amplifier using a New Load Matching Technique", *Microwave Journal*, pp. 20-36, December 2001.
- [4] B. Kim, Y. Yang, J. Yi, J. Nam, Y.Y. Woo, and J. Cha, "Efficiency Enhancement of Linear Power Amplifier Using Load Modulation Technique", *ISMOT2001(2001 International Sympo. On Microwave and Optical Technology) Dig.*, June 2001.
- [5] D.M. Upton, "A New Circuit Topology to Realize High Efficiency, High Linearity and High Power Microwave Amplifiers", *RAWCON'98 Proceedings*, pp. 317-320, August 1998.
- [6] W.H. Doherty, "A New High Efficiency Power Amplifier for Modulated Waves", *Proceedings of the IRE*, Vol. 24, No. 9, pp. 1163-1182, 1936.
- [7] F.H. Raab, "Efficiency of Doherty RF Power Amplifier System", *IEEE Transactions of Broadcasting*, Vol. BC-33, No. 3, pp. 77-83, September 1987.