

# RF 전치왜곡 비대칭 도허티 증폭기 설계 및 제작

최영락, 장동희, 김상희, 조경준, 김종현, 김남영, 이병제, 이종철

광운대학교 전자공학과, RFIC 연구 및 교육센터, 광운대학교

E-mail : [jhkim@gwu.ac.kr](mailto:jhkim@gwu.ac.kr), [radio71@explore.gwu.ac.kr](mailto:radio71@explore.gwu.ac.kr), [kjcho@explore.gwu.ac.kr](mailto:kjcho@explore.gwu.ac.kr)

Tel : 02-940-5197, Fax : 02-916-8014

## Design and Implementation of RF Predistorted Asymmetric Doherty Power Amplifier

Y.R. Choi, D.H. Jang, S.H. Kim, K.J. Cho, J.H. Kim, N.Y. Kim, B.J. Lee, and J.C. Lee

Dept. of Radio Science & Engineering, RFIC Research and Education Center, Kwangwoon University

### Abstract

A RF predistorted asymmetric Doherty amplifier for CDMA IS-95 signal has been fabricated using GaAs FETs. The Doherty amplifier used a Class AB main device and a Class C auxiliary device. At 6 dB back-off from P1 dB of 34 dBm, PAE of 27% was measured. This Doherty amplifier has higher PAE than Class AB for over 20 dB range of pout power. A RF predistortion linearizer is applied to the Doherty amplifier to improve the IMD cancellation performance. The 3rd order IMD cancellation of 12.2 dB was achieved at output power of 18 dBm.

### I. 서론

높은 선형성을 갖는 전력 증폭기의 구현을 위해 많은 연구가 진행되어져 왔고 현재 대부분의 고효율 전력 증폭기에는 전치왜곡기술이나 피드포워드 방식이 선형화 방법으로 채택되고 있다. 또한, 기지국과 같은 시스템 전체 효율의 대부분을 차지하는 고효율 전력 증폭기의 효율 개선에도 많은 관심을 기울이면서 부각되고 있는 기술들이 도허티(Doherty), EER, LINC 등이다. 최초의 도허티 전력 증폭기는 1930년대 AM(Amplitude modulation)방송 전송에 쓰이던 전력 증폭기에 제안된 방법이다. 도허티 전력 증폭기는 출력 전력 레벨에 따라 주 증폭기와 보조 증폭기가 다른 부하 임피던스를 갖도록 부하변조 회로를 구성하여 최대 효율을 얻을 수 있도록 최적화 하는 방법이다 [1]. 그러나 현대의 전파 환경은 그 시대와는 상당히 다른 디지털 이동통신 시스템이나 다중 채널 전력 증폭기가 주류를 이루고 있는 상황에서 효율성능은 선형성과 더불어 늘 Trade-off 관계에 있는 전력 증폭기의 성능을 좌우 하는 중요한 척도이다 [2]. 기존의 도허티 전력 증폭기의 연구에서는 주 증폭기(main amplifier)의 바이어스를 B급 모드로 구동하고 보조 증폭기(auxiliary amplifier)는 C급 모드로 구동하였다. 본 논문에서 제안한 도허티 전력 증폭기는 1845~1865 MHz의 주파수 대역에서 보다 나은 선형성을 위해 주 증폭기를 AB급으로 구동하였고 보조 증폭기는 주 증폭기보다 낮은 출력의 동급 소자가 아닌 능동 소자를 C급 모드로 구동하여 입력 전력에 따라 출력 전력을 최적의 부하로 전달하기 위해 설계되어진 부하 변조 회로(Load modulation circuit)와 불평형 입력 분배기를 사용해 보조 증폭기의 동작을 최적화 시켜

효율의 개선을 확인하였다 [1-2]. 그러나 기지국이나 증계기용 전력 증폭기로 적용하기에는 낮은 선형성을 갖는 도허티 전력 증폭기의 혼변조 성분에 적절한 RF 전치왜곡기를 구현하여 도허티 전력 증폭기의 고효율을 유지하면서 높은 선형성을 갖는 RF 전치왜곡 도허티 전력 증폭기를 제안하였다

### II. RF 전치왜곡 도허티 전력 증폭기

#### A. 도허티 전력 증폭기

주 증폭기(main amplifier)와 보조 증폭기(auxiliary amplifier)의 입 출력단은 LC 매칭 회로로 구성하였으며 주 증폭기의 출력단에는 특성 임피던스  $Z_m$  인  $\lambda/4$  선로로 연결하였고 보조 증폭기의 입력단에는 출력단에서의 위상 지연을 보상해주기 위해 특성 임피던스  $R_0$  인  $\lambda/4$  선로를 삽입하였다. 2 단 비대칭 도허티 전력 증폭기의 능동소자는 GaAs FET로 사용하였으며 주 증폭기는 AB급 모드로, 보조 증폭기는 C급 모드로 구동하였다. 불평형 입력 분배기(unequal input power divider)는 주 증폭기가 최대 출력 전력의 50% 지점에서 보조 증폭기가 동작을 하도록 하여 효율 성능의 최대화를 얻기 위해 삽입하였다 [3]. 또한,  $R_L$ 로 전달된 전력을 부하( $R_0$ )로 손실 없이 전달하기 위해 특성 임피던스  $Z_T$  인  $\lambda/4$  트랜스포머(transformer)를 연결하였다. 임피던스 트랜스포머는 주파수 1845~1865 MHz에서 0.3 dB의 삽입 손실이 있었으나 이는 고효율 전력 증폭기의 아

이솔레이터(isolator)에서 발생하는 삽입 손실과 유사하였다. 그림 1은 RF 도허티 전력 증폭기의 구성도이며 도허티 전력 증폭기의 동작은 부하 변조(load modulation) 원리로 구현되어진다.[4]

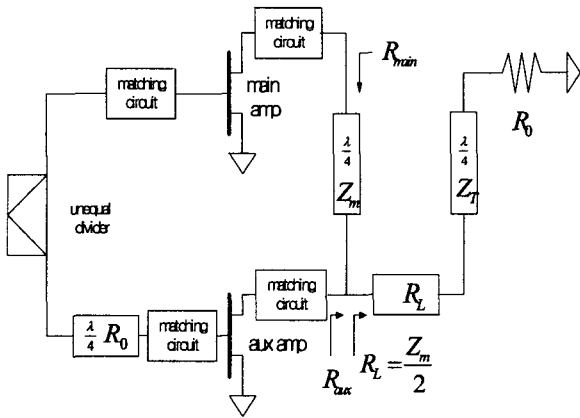


그림 1. 도허티 전력 증폭기 구성도

식 (1)은 부하 변조의 관계식을 나타내었고 식 (2)는  $R_{aux}$  에 대한  $R_{main}$  의 종속성을 표현한 식이다.

$$R_L = \frac{Z_m^2 R_{aux}}{Z_m^2 + R_{aux} R_{main}} \quad (1)$$

$$R_{main} = \frac{Z_m^2 (R_{aux} - R_L)}{R_L R_{aux}} = \frac{Z_m^2}{R_L} - \frac{Z_m^2}{R_{aux}} \quad (2)$$

식 (2)에  $R_{aux}$  의 변동에 따른  $R_{main}$  의 변화를 그림2 에서 보여주고 있다. 낮은 출력 전력 레벨에서 보조 증폭기가 OFF 상태를 유지하여  $R_{aux}$  는 무한대의 값을 얻게 되고  $R_{main}$  은 낮은 전력 레벨에서  $2R_0$  의 부하를 갖게 되어 증폭기를 AB급 모드로 동작 할 때보다 빠르게 포화점에 이르게 된다. [4] 주 증폭기의 최대 출력 전력의 50% 지점에서 보조 증폭기가 ON되어 출력 전력이 증가함에 따라  $R_{main}$  은 감소하게 되며 최대 출력 전력 지점에서 주 증폭기와 보조 증폭기가 같은 부하를 갖게 된다 [5]. 따라서 낮은 출력 전력에서는 주 증폭기가 출력 전력의 대부분을 공급하고 부하 임피던스가 변화함에 따라 중간 출력 지점부터 최대 출력 지점까지 보조 증폭기의 출력이 부하에서 동위상으로 결합하여 P1 dB 까지 증가 하게된다. 출력 전력의 증가에 따라 5차 이상의 혼변조 성분은 주 증폭기의 바이어스는 고정 시키고 보조 증폭기의 바이어스를 미세 조정하여 억압하였다.

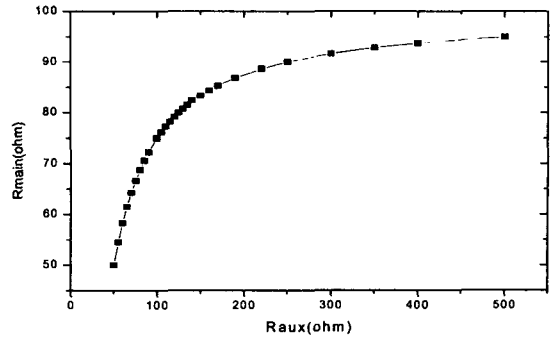


그림 2.  $R_{aux}$  의 변동에 따른  $R_{main}$  의 변화

### B. RF 전치왜곡 선형화기

그림 3은 도허티 전력 증폭기에 이용한 RF 전치왜곡기의 구성도이며 도허티 전력증폭기의 주된 혼변조 성분인 3차 혼변조 성분을 억압하기 위해 설계되었다. 입력된 신호는 방향성 결합기에 의해 선형 경로와 비선형 경로로 나뉘고 비선형 경로의 신호는 버퍼 증폭기에 의해 증폭된다. 이 신호는 다시 분리 되어 왜곡 성분을 발생시켜 아래 루프의 신호와 결합되어 3차 혼변조 성분만 발생하게 된다. 그리고 다시 증폭된 신호는 벡터 변환기를 거쳐 도허티 전력 증폭기의 혼변조 성분의 크기가 같고 위상이 반대인 신호로 조정되어 입력 된다. 이 때 이미 5차 이상의 고차 혼변조 성분들은 도허티 전력증폭기의 보조 증폭기의 비선형성에 의해 최대한 억압되어 RF 도허티 전력증폭기의 3차 혼변조 성분의 크기와 위상을 제어할 수 있다. [6]

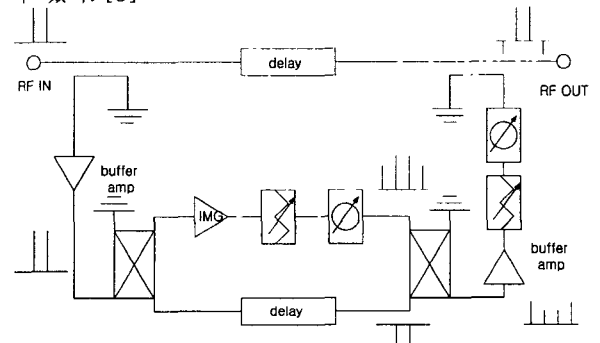


그림 3. RF 3차 다항식 전치왜곡기 구성도

### III. 측정 결과

본 논문에서는 유전율 ( $\epsilon_r$ ) 2.52, 기판의 두께 (h) 0.504 mm, 동판의 두께 (t) 0.018 mm 인 테플론 (Teflon) 기판을 사용하였다. 능동 소자는 Fujitsu사의 FLL177ME (P1 dB : 32.5 dBm)와 FLL107ME (P1 dB : 29.5 dBm)를 각각 주 증폭기와 보조 증폭기로 사용하였으며 동급의 소자를 적용하지 않아도 도허티 전력 증폭기로서 구현이 가능함을 확인하였다. 출력 전력의 변화

에 따라 도허티 전력 증폭기로 구동한 경우의 효율과 주 증폭기와 보조 증폭기를 AB 급 모드로 구동 시킬 때의 효율을 비교하여 보았다. 주파수 1855 MHz의 1-tone 신호에서 그림 4는 출력 전력에 따른 RF 도허티 전력 증폭기의 효율 성능을 보여주고 있다. 출력 전력을 P1 dB (34dBm)까지 증가시키면서 효율을 비교한 결과 P1 dB의 6 dB 백-오프 지점인 출력 전력 28dBm 점에서 13.8 %의 효율이 증가되었고 전체 출력 전력 구간에서도 AB급 모드 보다 우수한 효율을 유지함을 확인하였다. 그림 5는 CDMA IS-95A 신호의 출력 전력에 따른 RF 도허티 전력 증폭기의 효율 성능을 보여 주고 있다. 국내 PCS 포워드-링크인 중심 주파수 1855 MHz의 1FA로 측정된 결과 출력 전력 28 dBm에서 9.8 %의 효율이 증가하였으며 능동소자의 기생 성분과 고조파 최적화 종단을 고려한다면 최대 PAE 성능은 더 개선되어질 수 있다.

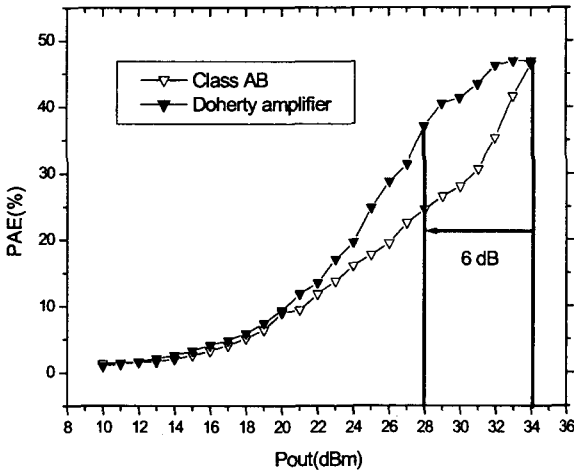


그림. 4 1-tone 신호의 출력 전력 대 PAE 성능 비교

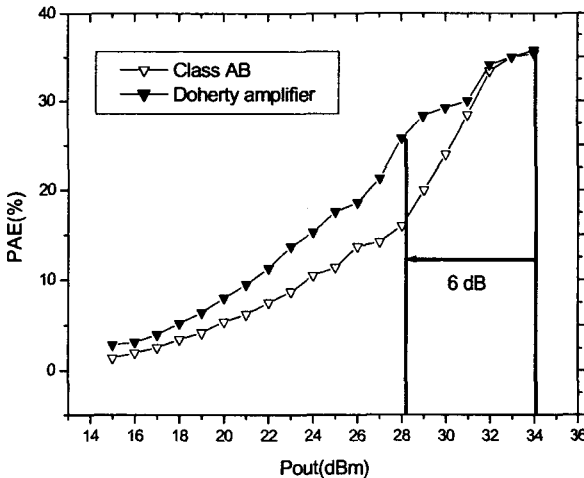


그림 5. IS-95A CDMA 신호의 출력 전력 대 PAE 비교

그림 6은 2-tone 신호의 출력 전력에 따른 RF 전치왜곡 도허티 전력 증폭기와 도허티 전력 증폭기의 선형화 성능을 보여주고 있다. 입력에 RF 전치왜곡기를 결합한 상태에서 3차 혼변조 성분을 비교 하기위해 2-tone 테스트

트는 중심주파수 1855 MHz에서 주파수 간격은 2 MHz로 출력 전력 28 dBm에서 3차 혼변조 성분이 19 dB 개선됨을 확인하였다. 그림 7은 IS-95A CDMA 1FA 신호의 출력 전력에 따른 RF 전치왜곡 도허티 전력 증폭기와 도허티 전력 증폭기의 선형화 성능을 보여주고 있다. 중심 주파수 1855 MHz의 1FA 인가시 오프셋 주파수 +885KHz에서 출력 전력 18 dBm일 때 12.2 dB 개선됨을 확인 하였다. 선형성이 2-tone측정에서 최대로 개선된 지점보다 낮은 출력 전력에서 많은 개선을 보였는데 이는 5차 이상의 혼변조 성분의 스펙트럼 재성장을 형성했기 때문이다 [4].

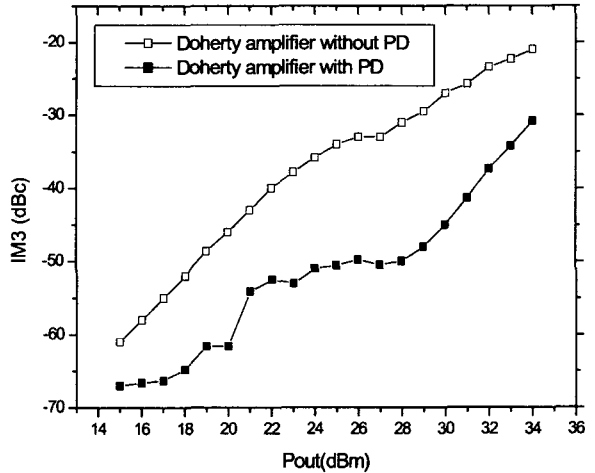


그림 7. 출력 전력에 따른 선형화 성능 결과 (2-tone)

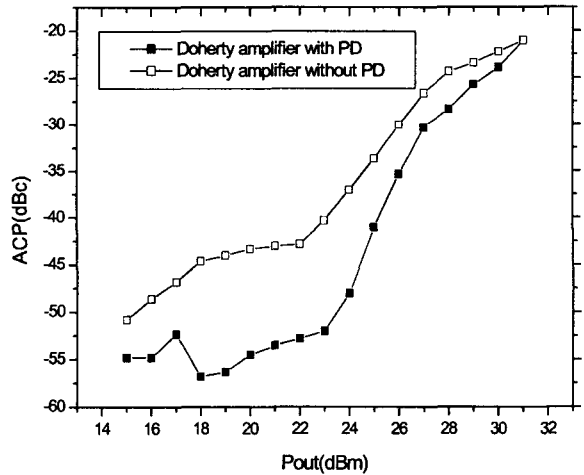


그림 8. 출력 전력에 따른 선형화 성능 결과 (IS-95 CDMA 1-FA)

#### IV. 결론

도허티 전력 증폭기는 효율을 증가시키는 목적으로 연구 되어 왔지만 적절한 선형화기와 결합하면 효율의 증가와 보다 나은 선형성을 갖을 수 있는 것을 실험적으로 증명하였다. 본 논문에서 제작한 RF 전치왜곡기와 결합한 도허티 전력 증폭기는 고출력 전력 증폭기의 주 증폭

기의 바이어스 모드인 AB급 모드에 비해 1-tone에서는 출력 전력 28 dBm 일 때 13.8% 그리고 CDMA(IS-95A) 1-FA 실험에서는 9.8%의 효율이 증가 함을 확인 하였고 또한 RF 전치왜곡기를 결합한 도허티 전력 증폭기에서는 2-tone 측정에서 출력 전력 28 dBm 일 때 19 dB, IS-95A CDMA 1-FA 측정에서는 12.2dB 개선되어 고 선형성을 유지함을 확인하였다. 이러한 선형화기와 결합한 도허티 전력 증폭기는 기존의 도허티 전력 증폭기의 효율에는 영향을 주지 않고 고효율과 높은 선형성을 유지하며 다른 전력 증폭기에 비해 별다른 용적을 필요로 하지 않으며 가격을 낮출 수 있는 이점을 갖는 고풍력 전력 증폭기가 가능 하리라고 생각 되며 또한, 도허티 전력 증폭기의 구조에서의 위상 지연, 손실, 바이어스등을 DSP 로 구현할 경우 더 정확한 제어와 높은 선형성을 갖을 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 Agilent Technology 사의 HP EEsof ADS 기증과 정보통신부의 대학정보통신 연구센터(ITRC) 지원사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] F.H. Raab, "Efficiency of Doherty RF Power-Amplifiers Systems," *IEEE Transactions of Broadcasting*, Vol. BC-33, No.3, pp.77-83, Sept. 1987.
- [2] R.J. McMorrow, "The Microwave Doherty Amplifier," in *IEEE MTT-S Dig.*, 1994, pp. 1653-1656.
- [3] P.M. Asbeck, "An Extended Doherty Amplifier With High Efficiency Over a Wide Power Range," *IEEE Transactions on microwave theory and technique*, Vol.49, No.12, pp.2472-2479, Dec. 2001.
- [4] Steve.C. Cripps, *RF Power Amplifiers for wireless communications*, Artech House 1999
- [5] P.B. Kenington, *High-Linearity RF Amplifier Design*, Artech House, 2000.
- [6] D.H. Jang, K.J. Cho, S.H. Kim, D.H. Jang, J.H. Kim, N.Y. Kim, B.J. Lee, and J.C. Lee, "Design of RF Predistortion Doherty amplifiers With High Efficiency and High Linearty" ADS User Workshop, Aug 2002, pp 14-16