

포락선 전치 왜곡기를 이용한 도허티 증폭기의 효율 및 선형성 개선에 관한 연구

A Study on Improvement for Efficiency and Linearity of Doherty Amplifier using Envelope Predistorter

김수겸*, 장혁수, 정성찬, 박천석
(Su-Kyom Kim, Hyuk-Su Jang, Sung-Chan Jung and Cheon-Suk Park)

Abstract : 본 논문은 도허티 증폭기 및 포락선 전치 왜곡기를 이용한 전력 증폭기의 효율 및 선형성 개선에 관한 것이다. 전력 증폭기의 효율을 개선하기 위하여 도허티 증폭기를 제작하여 효율 특성을 개선하였으며, 포락선 전치 왜곡기를 이용하여 도허티 증폭기의 선형성 개선량에 대하여 조사하였다. 제작된 도허티 증폭기는 AB 급으로 동작 시킨 전력 증폭기와 비교하여 출력 전력 10W에서 8.5%의 효율 개선 효과를 보였으며, 출력 전력 40W에서 12.6%의 효율 개선 특성을 나타내었다. 포락선 전치 왜곡기를 이용한 도허티 증폭기는 출력 전력 10W에서 7dB의 선형성 개선 효과를 나타내었다. IMT-2000 주파수 대역에서 WCDMA down-link 4 carrier 신호를 이용하여 출력 전력 10W에서 측정된 결과 AB 급으로 동작하는 전력 증폭기와 비교하여 4.2%의 효율 개선 및 6.3dB의 선형성 개선 효과를 나타내었다.

Keywords: Power amplifier, Doherty amplifier, Predistorter, Efficiency, Linearity

I. 서론

제한된 주파수 자원을 이용하여 폭발적으로 늘어나는 무선통신 가입자에게 안정적인 서비스를 제공하기 위해서는 효율적인 주파수 사용이 필수적이다. 이를 위하여 디지털 통신 방식에서는 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying), 16 QAM(Quadrature Amplitude Modulation), 64 QAM과 같은 변조 방식을 사용하고 있으며, 높은 출력을 가지는 전력 증폭기를 필요로 한다.

이와 같은 통신 시스템에서 사용하는 전력 증폭기는 높은 출력 효율을 얻기 위하여 포화영역 근처에서 사용하게 되며, 전력 증폭기의 비선형 동작 특성에 의해 혼변조 신호를 발생 시키게 된다. 이러한 혼변조 신호는 전력 증폭기의 이득과 위상에 대한 왜곡을 초래하게 되며, 필터와 같은 소자를 이용하여 제거하는 것이 불가능하기 때문에 시스템의 전송 품질에 심각한 영향을 미치게 된다. 따라서 전력 증폭기의 효율을 개선하기 위한 연구가 시도되어 왔으며[1]-[4], 전력 증폭기의 비선형 특성을 개선하기 위한 선형화 방식들에 대한 성능 개선을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다[5]-[8]. 그러나 높은 출력 효율과 고선형 특성을 가지는 전력 증폭기를 제작하는 것은 매우 어렵다.

따라서 본 연구에서는 도허티 증폭기를 이용하여 고효율 증폭기를 제작하였으며, 포락선 전치 왜곡기를 이용하여 제작된 도허티 증폭기의 선형성을 개선하여 고효율, 고선형 전력 증폭기를 설계 및 제작하였다.

II. 도허티 증폭기 및 포락선 전치 왜곡기의 동작원리

1. 도허티 증폭기의 동작원리

도허티 증폭기는 Carrier 증폭기와 Peaking 증폭기 및 90도의 위상차를 가지는 선로로 구성되어 있으며, 이를 그림 1에 나타내었다. 또한, 도허티 증폭기를 구성하는 각 증폭기를 이상적인 전류원으로 등가하여 나타낸 도허티 증폭기의 등가회로는 그림 2에 나타내었다[4].

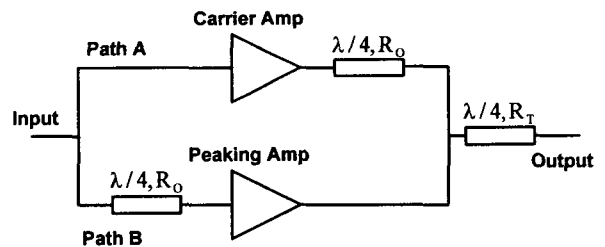


그림 1. 도허티 증폭기의 구성도
Fig. 1. Block Diagram of Doherty Amplifier

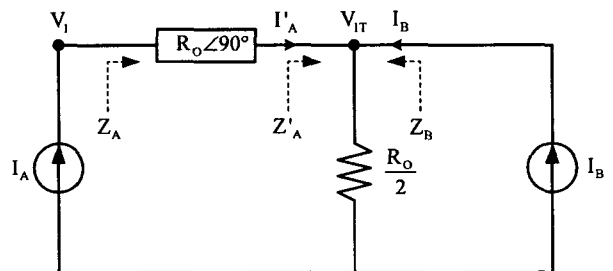


그림 2. 도허티 증폭기의 등가회로
Fig. 2. Equivalent Circuit of Doherty Amplifier

* 책임저자(Corresponding Author)

김수겸 : ㈜웨이브, 일렉트로닉스

장혁수 : 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터 공학부

(zero569@lycos.co.kr, hsjang3200@naver.com)

그림 2에서 각 전류원에 의해 인가된 전류는 부하에서 동일한 위상을 가지도록 하기 위하여 미리 보상된 위상차를 가지게 되며, 이를 식 (1), (2)에 나타내었다.

$$I_A = I_A \cos(\omega t) = I_A \angle 0^\circ \quad (1)$$

$$I_B = I_B \cos(\omega t - 90^\circ) = I_B \angle -90^\circ \quad (2)$$

식 (1), (2)에 의해 부하 전압 V_{IT} 는 식 (3)과 같이 표현할 수 있으며, Carrier 증폭기에서 바라본 부하 임피던스는 식 (4), (5)로 나타낼 수 있다. 따라서, 식 (5)에 의해 Carrier 증폭기의 부하 임피던스 Z_A 는 Peaking 증폭기에 의한 전류 I_B 의 양에 의해 변화하게 된다. 특히 $I_B = 0$ 인 경우 $Z_A = 2R_0$ 가 되며, $I_B = I_A$ 인 경우 $Z_A = R_0$ 가 된다.

$$V_{IT} = \frac{R_0}{2}(I_A + I_B) \quad (3)$$

$$Z'_A = \frac{V_{IT}}{I'_A} = \frac{R_0}{2} \left(\frac{I_A + I_B}{I_A} \right) \quad (4)$$

$$Z_A = \frac{R_0^2}{Z'_A} = \frac{2R_0 I_A}{I_A + I_B} \quad (0 \leq I_B \leq I_A) \quad (5)$$

그림 1, 2에 나타낸 도허티 증폭기를 제작하기 위한 구성도를 그림 3에 나타내었다. 식 (1), (2)에 표현한 바와 같이 90도의 위상차를 가지도록 하기 위하여 증폭기의 입력 부분에 90도 branch-line 결합기를 이용하여 입력 신호를 분배하였으며, Carrier 증폭기의 출력 부분에 $\lambda/4$ 선로를 삽입하여 위상의 차이를 보상하였다. 또한, $\lambda/4$ 임피던스 변환기를 이용하여 50ohm 부하를 가지도록 설계하였다. 이와 더불어 Carrier 증폭기와 Peaking 증폭기를 제작하기 위하여 push-pull 형태로 구성되어 있는 Freescale사의 PEP 190W LD MOSFET인 MRF21190을 이용하였다.

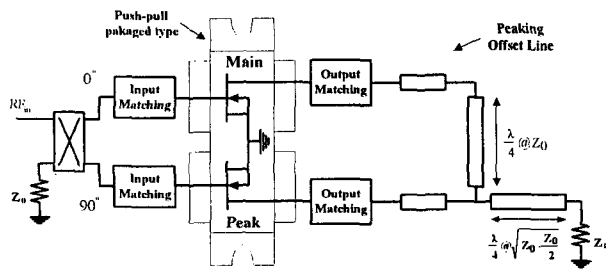


그림 3. 제작된 도허티 증폭기의 구성도
Fig. 3. Block Diagram of Fabricated Doherty Amplifier

2. 포락선 전치 왜곡기

최초의 입력 신호 ω_1 , ω_2 가 인가되면 분배기를 통하여 두 경로로 나뉘어진다. 이 중 하나는 포락선 검출기를 통하여 저주파 신호인 $\omega_2 - \omega_1$ 신호를 발생시킨 후 지연 신호를 지난 원 신호와 함께 3차 및 5차 혼변조 발생기의

입력으로 인가된다. 이러한 과정을 통하여 인가된 두 신호는 혼변조 신호 발생기의 비선형 특성에 의해 3차 및 5차 혼변조 신호를 발생시키게 되며, 각 신호의 크기와 위상을 조절할 수 있는 벡터 변환기를 통하여 지연 신호를 지난 원 신호와 결합하여 전치 왜곡된 신호를 발생시키게 된다. 이러한 포락선 전치 왜곡기의 구조를 그림 4에 나타내었다.

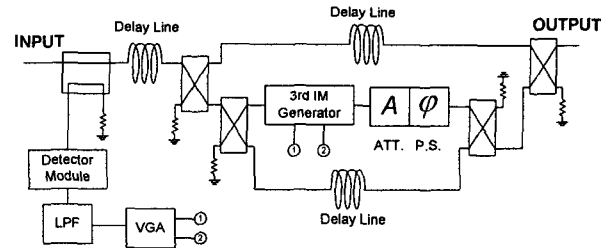


그림 4. 제안된 포락선 전치 왜곡기의 구성도
Fig. 4. Block Diagram of Proposed Envelope Predistorter

III. 측정 결과

1. 도허티 증폭기

AB급 증폭기와 도허티 증폭기의 효율 특성을 비교하기 위하여 동일한 소자를 이용하여 각 증폭기를 제작한 후 중심 주파수 2.16GHz, 주파수 이격 5MHz인 two-tone 신호를 이용하여 구동 증폭기를 제외한 최종 증폭기의 효율을 측정하였다. 측정된 각 증폭기의 PAE(Power Added Efficiency)를 그림 5에 나타내었으며, 출력 전력 10W(40dBm), 40W(46dBm)에서 도허티 증폭기의 효율은 AB급으로 동작시킨 증폭기와 비교하여 각각 8.51%, 12.61%의 개선량을 나타내었다.

이와 더불어 도허티 증폭기의 출력 전력에 대한 혼변조 특성을 그림 6에 나타내었다.

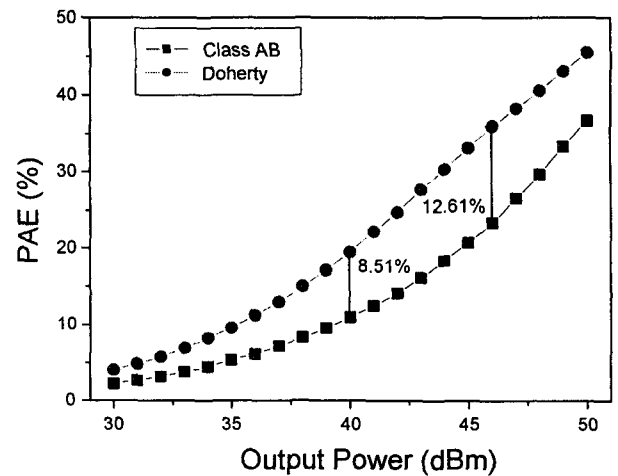


그림 5. AB급 및 도허티 증폭기의 효율
Fig. 5. Efficiency of Class AB & Doherty Amplifier

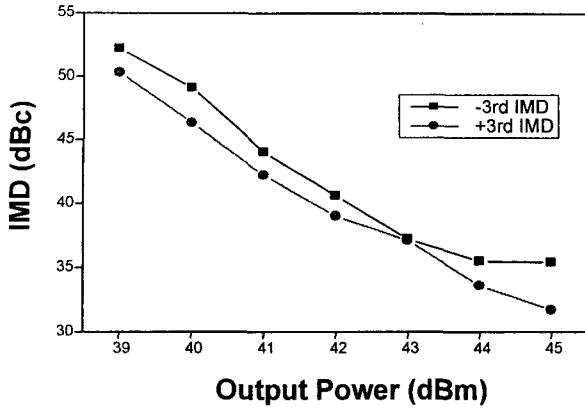


그림 6. 도허티 증폭기의 혼변조 특성
Fig. 6. IMD Performance of Doherty Amplifier

2. 포락선 전치 왜곡기를 이용한 도허티 증폭기

본 연구에서 제작된 포락선 전치 왜곡기를 구성하는 모듈 중 혼변조 성분 발생기는 혼변조 I-Q 형태로 구성하였다. 이러한 구조는 각 경로를 통하여 발생된 신호의 크기를 조절하여 혼변조 성분의 크기와 위상을 조절할 수 있는 구조이며, 혼변조 성분을 발생시키기 위하여 자신의 비선형 특성을 이용하여 혼변조 성분을 발생시키는 방법을 사용하였다. 따라서, 전치 왜곡기의 출력 신호를 조절하는 경우 원 신호에 미치는 영향을 최소화 하면서 혼변조 신호의 크기와 위상을 조절할 수 있다.

이러한 포락선 전치 왜곡기의 출력 특성을 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 좌우측 3차 혼변조 신호의 크기와 위상은 원 신호에 독립적으로 저주파 신호 및 벡터 변환기의 이득 조절에 의하여 변화시킬 수 있다. 그러나 그림 4에 나타난 전치 왜곡기는 좌우측 혼변조 신호의 크기와 위상을 독립적으로 조절할 수 없다. 따라서, 그림 6에 나타난 바와 같이 좌우측 혼변조 특성이 출력 전력 및 주파수 이격에 따라 변화하는 증폭기의 혼변조 특성을 완전히 제거하기는 어렵다.

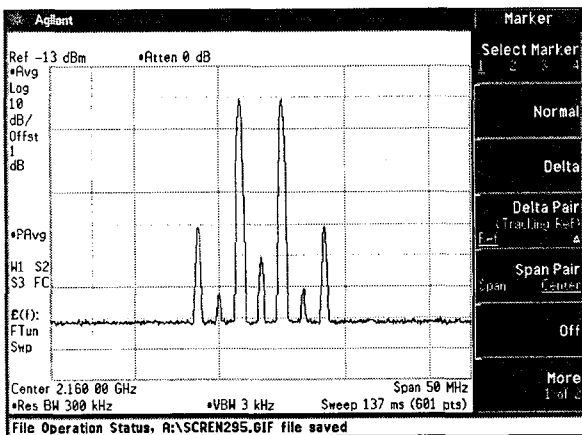


그림 7. 포락선 전치 왜곡기의 출력 특성
Fig. 7. Output Spectrum of Envelope Predistorter

2. 포락선 전치 왜곡기를 이용한 도허티 증폭기

본 연구에서 제안한 포락선 전치 왜곡기를 이용한 도허티 증폭기의 특성을 조사하기 위하여 중심 주파수 2.16GHz, WCDMA down-link 4 carrier 신호를 이용하여 출력 전력 10 Watt에서 선형화 전후의 ACLR(Adjacent Channel Leakage Ratio) 및 효율 특성을 조사하였다. AB 급 증폭기와 도허티 증폭기를 구동하기 위하여 표 1에 나타난 소자를 이용하여 전체 증폭기를 구성하였으며, 최종적으로 구성된 각 증폭기 시스템의 ACLR 및 효율 특성을 표 2, 3에 나타내었다.

표 1. 제작된 증폭기의 구성

Table 1. Lineup of Manufactured Power Amplifier

Part Number	Vendor	Gain	P1dB	Idq
MMG3001	FREESCALE	17dB	18dBm	70 mA/5.5V
FLL177	FUJITSU	12dB	32dBm	360 mA/10V
MRF21045	FREESCALE	15dB	46dBm	430 mA/27V
MRF21190	FREESCALE	14dB	52.8dBm	1.7 A/27V

표 2. 제작된 AB급 및 도허티 증폭기의 특성

Table 2. Characteristics of Manufactured Amplifiers System

(a) AB급 증폭기

출력	-5MHz	+5MHz	전류	효율
38dBm	41.8dBc	42.6dBc	3.7A	6.3%
39dBm	41.6dBc	41.1dBc	4.0A	7.3%
40dBm	42.2dBc	40.8dBc	4.3A	8.6%
41dBm	42.7dBc	39.9dBc	4.7A	9.9%
42dBm	42.8dBc	39.6dBc	5.1A	11.5%

(b) 도허티 증폭기

출력	-5MHz	+5MHz	전류	효율
38dBm	42.6dBc	41.0dBc	2.5A	9.3%
39dBm	41.2dBc	38.3dBc	2.7A	10.9%
40dBm	40.1dBc	36.5dBc	2.8A	13.2%
41dBm	38.7dBc	35.5dBc	3.1A	15.0%
42dBm	38.4dBc	34.8dBc	3.3A	17.8%

표 3. 포락선 전치 왜곡기를 이용한 AB 급 및 도허티 증폭기의 특성

Table 3. Characteristics of Class AB & Doherty Amplifier using Envelope Predistorter

(a) AB급 증폭기

출력	-5MHz	+5MHz	-5MHz 개선량	+5MHz 개선량	효율
38dBm	49.8dBc	49.5dBc	8.0dB	6.9dB	6.2%
39dBm	49.5dBc	49.3dBc	7.9dB	8.2dB	7.2%
40dBm	49.5dBc	48.6dBc	7.3dB	7.8dB	8.4%
41dBm	48.8dBc	48.6dBc	6.1dB	8.7dB	9.7%
42dBm	46.2dBc	47.2dBc	3.4dB	7.6dB	11.3%

(b) 도허티 증폭기

출력	-5MHz	+5MHz	-5MHz 개선량	+5MHz 개선량	효율
38dBm	48.5dBc	49.3dBc	5.9dB	8.3dB	9.0%
39dBm	47.9dBc	48.0dBc	6.7dB	9.7dB	10.5%
40dBm	47.2dBc	47.1dBc	7.1dB	10.6dB	12.8%
41dBm	44.3dBc	45.15dBc	5.6dB	9.65dB	14.6%
42dBm	42.2dBc	43.3dBc	3.8dB	8.5dB	17.3%

표 2, 3 에서 측정된 효율은 동일한 구동 증폭기를 이용하여 제작하였기 때문에 그림 5 에 나타난 결과와 비교하여 전체 증폭기의 효율 개선량이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한 표 2 와 비교하여 표 3 의 결과는 포락선 전치 왜곡기의 유무에 따라 출력 전력의 변화에 대하여 0.1 ~ 0.5%의 효율이 저하 되었음을 보여준다. 그러나 이러한 결과는 포락선 전치 왜곡기의 소모 전력이 매우 작음을 의미한다.

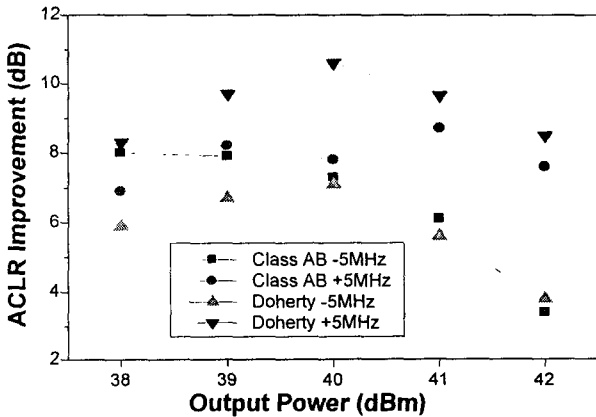


그림 8. 포락선 전치 왜곡기를 이용한 AB급 및 도허티 증폭기의 선형성 개선 특성
Fig. 8. ACLR Improvement of Class AB & Doherty Amplifier using Envelope Predistorter

그림 8은 포락선 전치 왜곡기를 이용한 AB급 및 도허티 증폭기의 ACLR 개선 특성을 나타낸다. 동일한 출력 구간 38dBm-42dBm에서 AB급 증폭기는 3~9dB, 도허티 증폭기는 4~11dB의 ACLR 개선 특성을 나타내었다. 이는 WCDMA 4FA 입력 신호에 대해 ACLR 개선 특성이 AB급 증폭기와 도허티 증폭기가 비슷함을 알 수 있다. 그러나 선형성 개선 후 각각의 증폭기의 선형 특성을 살펴보면, AB급 전력 증폭기가 약 1~2dB정도 우수한 결과를 나타낸다. 이는 AB급 증폭기의 5차 혼변조 신호가 도허티 증폭기와 비교하여 더 우수하기 때문이라고 판단된다.

그림 9는 출력 전력 10Watt에서 포락선 전치 왜곡기를 이용한 도허티 증폭기의 ACLR 특성을 나타내고, 그림 10, 11은 출력 전력에 대한 AB급 증폭기와 포락선 전치 왜곡기를 이용한 도허티 증폭기의 효율 및 ACLR 개선 특성을 나타낸다. 이를 통하여 출력 전력 10Watt에서 4.2%의 효율 개선 효과와 6.3dB이상의 ACLR 개선 효과가 있음을 확인할 수 있다.

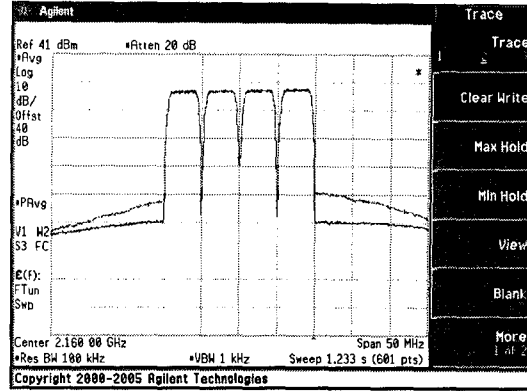


그림 9. 포락선 전치 왜곡기를 이용한 도허티 증폭기의 출력 특성
Fig. 9. Output Spectrum Data of Doherty Amplifier with Envelope Predistorter

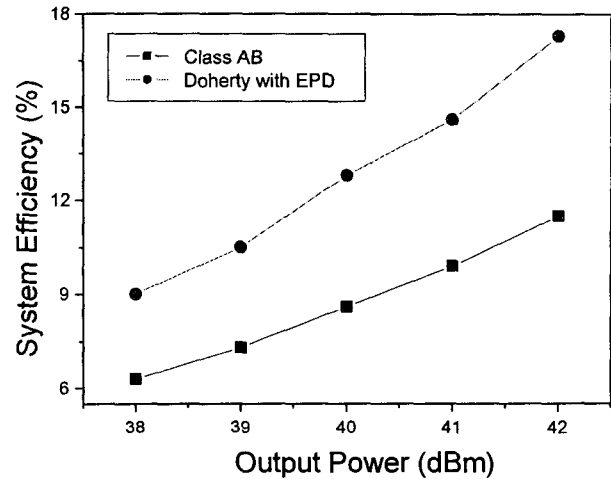


그림 10. 포락선 전치 왜곡기를 이용한 도허티 증폭기의 효율 개선 특성
Fig. 10. Efficiency Improvement of Doherty Amplifier using Envelope Predistorter

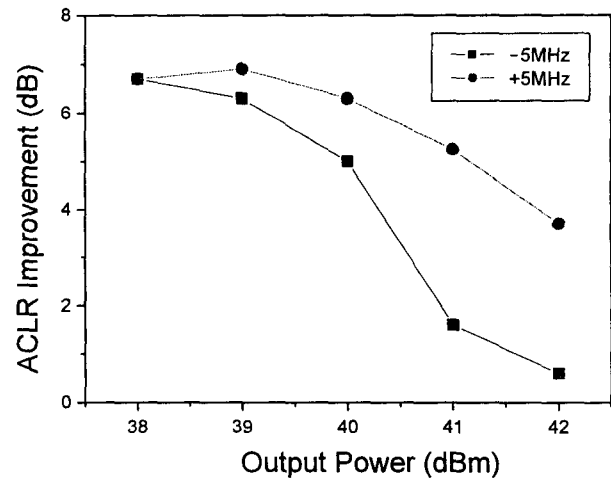


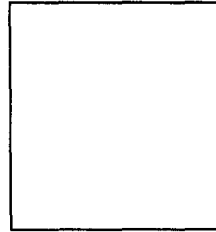
그림 11. 포락선 전치 왜곡기를 이용한 도허티 증폭기의 선형성 개선 특성
Fig. 11. ACLR Improvement of Doherty Amplifier using Envelope Predistorter

V. 결론

본 연구에서는 AB 급으로 동작하는 전력 증폭기의 효율 및 선형성을 개선하기 위하여 포락선 전치 왜곡기를 이용한 도허티 증폭기를 설계, 제작하였다. AB 급으로 동작하는 전력 증폭기와 비교하여 중심 주파수 2.16GHz, WCDMA down-link 4 carrier 신호를 이용하여 측정한 결과 출력 전력 10W에서 4.2%의 시스템 효율과, 6.3dB의 ACLR 개선 특성을 나타내었다. 이를 통하여 본 연구에서 제안한 포락선 전치 왜곡기를 이용한 도허티 증폭기가 효율 및 선형성 측면에서 우수한 결과를 보임을 확인할 수 있다.

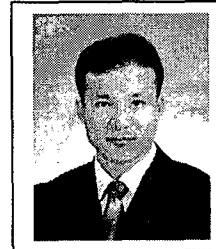
참고문헌

- [1] M. Iwamoto, A. Williams, P. Chen, A. G Metzger, L. E. Larson, and P. M. Asbeck, "An extended Doherty amplifier with high efficiency over a wide power range," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 49, no. 12, pp. 2472-2478, Dec., 2001.
- [2] Y. Yang, J. Cha, B. Shin, and B. Kim, "A fully matched n-way Doherty amplifier with optimized linearity," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 51, no. 3, pp. 986-993, Mar., 2003.
- [3] J. Kim, J. Cha, I. Kim, and B. Kim, "Optimum operation of asymmetrical-cells-based linear Doherty power amplifiers – uneven power drive and power matching," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 53, no. 5, pp. 1802-1809, May, 2003.
- [4] 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.
- [5] H. Park, D. Baek, K. Jeon, and S. Hong, "A predistortion linearizer using envelope-feedback technique with simplified carrier cancellation scheme for class-A and class-AB power amplifiers," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 48, no. 6, pp. 898-904, Jun., 2000.
- [6] J. Yi, Y. Yang, M. Park, W. Kang, and B. Kim, "Analog predistortion linearizer for high-power RF amplifiers," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 48, no. 12, pp. 2709-2713, Dec., 2000.
- [7] Y. Yang, Y. Woo, and B. Kim, "New predistortion linearizer using low-frequency even-order intermodulation components," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 50, no. 2, pp. 446-452, Feb., 2002.
- [8] J. Cha, J. Yi, J. Kim, and B. Kim, "Optimum design of a predistortion RF power amplifier for multicarrier WCDMA applications," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 52, no. 2, pp. 655-663, Feb., 2002.



장혁수

2006년 성균관대학교 정보통신공학부(공학석사). 2006년~현재 Freescale 재직중. 관심분야는 고효율 전력증폭기, 선형화 기법 등.



정성찬

1998년 성균관대학교 전자공학과(공학사). 2000년 성균관대학교 전자공학과(공학석사). 2006년 성균관대학교 정보통신공학부(공학박사). 2006년~현재 성균관대학교 MCS Lab. 박사 후 연구원. 관심분야는 전력증폭기, 고효율 증폭기 설계, 선형화 기법, RF IC 설계.



박천석

1988년 서울대학교 전기공학과(공학사). 1990년 한국과학기술원 전기전자공학과(공학석사). 1995년 한국과학기술원 전기전자공학과(공학박사). 1995년~현재 성균관대학교 정보통신공학과 교수. 관심분야는 전력증폭기, 선형화 기법.



김수겸

1999년 성균관대학교 전자공학과(공학사). 2002년 성균관대학교 정보통신공학부(공학석사). 2002~현재 (주) 웨이브 일렉트로닉스 재직중. 관심분야는 전력 증폭기, 선형화 기법.