

Predistorter를 이용한 3-way 도허티 증폭기의 선형성 개선

신범재, 차정현, 양영구, 김범만
포항공과대학교 전자 전기 공학과 및 전자과 특화 연구 센터
tel) 054-279-5584 / fax) 054-279-2903

Improvement of Linearity for a 3-Way Doherty Amplifier using a Predistorter

Bumjae Shin, Jeonghyeon Cha, Youngoo Yang, and Bumman Kim
Department of Electronic and Electrical Engineering and Microwave Application Research center,
Pohang University of Science and Technology
E-mail: sbj94@postech.ac.kr

Abstract-This paper presents an experimental results of predistorted predistorter combined with 3-way Doherty amplifier optimized for the linearity and efficiency. This predistorter operates differently from the conventional predistorter, because the IM characteristics of 3-way Doherty amplifier have been already cancelled. The implemented predistorter has improved ACLR for the broad range of output power level from 31 dBm to 18dBm for a down-link WCDMA signal with a center frequency 2.14 GHz and a 3.84 Mcps chip rate with a similar efficiency of 3-way Doherty amplifier only.

I. 서 론

기지국이나 중계기용 전력 증폭기의 성능을 좌우하는 가장 중요한 요소는 선형성이다. 선형성을 향상시키는 방법으로는 여러 가지 방법이 있는데 Predistortion, Feedback, Feedforward 등이 널리 사용되는 방법이다 [1]. 이 중에서 Feedforward는 선형성을 가장 많이 개선할 수 있기 때문에 기지국에 널리 사용되고 있다. 그러나 Feedford는 선형성은 좋지만, 효율이 나쁘고 구조가 복잡하며 가격이 비싼 단점이 있다. 따라서 선형성 스펙이 다소 낮은 HPA의 경우에는 굳이 값비싼 Feedford 방식을 쓸 필요가 없다.

통상적인 HPA 모듈의 경우에는 드라이브 앰프와 메인 앰프에 다른 소자를 사용하고 이들의 바이어스를 적절히 조절하여 각각의 앰프에서 나오는 IM성분들이 상쇄되게 만드는 구조나, 앰프에 PD(predistorter)를 붙인 구조가 널리 사용되고 있다. Predistortion 테크닉은

적절한 성능을 내면서 비교적 저렴한 솔루션으로 인정 받고 있다[2]. 이는 Feedforward 증폭기에 비해 전력 소모가 적고, 회로가 간단하다는 이점이 있으며, 페루프 구조를 갖는 feedback 테크닉과는 달리 개방루프 구조를 갖기 때문에 좀 더 넓은 밴드폭을 제공한다는 장점이 있기 때문이다[2],[3].

한편, 3-way 도허티 증폭기는 3-way class AB에 비해 약간의 효율을 개선시키면서 선형성을 상당히 개선할 수 있다는 것이 제시되었다[5]. 또한 도허티 증폭기는 부가적인 회로가 필요 없어서 구현이 용이하고, 다른 선형화 기법에 접목시켜 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 3-way 도허티 증폭기 자체만으로는 HPA 스펙을 만족하기가 힘들다.

따라서, 본 논문에서는 선형성을 극대화시킨 3-way 도허티 증폭기에, 이에 맞는 PD를 결합시켜서 선형성을 더욱 개선시킬 수 있는 모듈을 제시하였다. 제시된 모듈은 출력 전력의 넓은 영역에서 3-way 도허티 증폭기와 비슷한 효율을 가지면서 HPA 스펙을 만족시키는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문에 사용된 PD는 일반적인 PD와는 다소 다르게 동작하는데, 이에 대한 자세한 내용은 III절에 제시하였다.

II. 3-way 도허티 증폭기의 원리 및 특성

도허티 증폭기는 최초에 전력 증폭기의 효율을 개선시키기 위해 고안되어졌으며, 핵심 동작 원리는 능동소자를 이용하여 낮은 전력 레벨에서는 부하 임피던스를 큰 값으로 바꾸어 주는 부하 변조(load modulation)에 있다[1]. 그림 1은 3-way 도허티 증폭기의 부하 임피던스 변조를 설명한다. I_1 과 I_2 는 각각 carrier amplifier와 peaking amplifier를 나타낸다. 이로부터 아래와 같

은 부하 임피던스 식을 얻을 수 있다

$$Z_1' = \frac{V_0}{I_1} = \frac{R_0}{3} \left(\frac{I_1 + I_2}{I_1} \right), \quad 0 \leq I_2 \leq 2I_1' \quad (1)$$

$$Z_1 = \frac{R_0^2}{Z_1'} = \frac{3R_0}{1 + I_2/I_1} = \frac{3R_0}{1 + \alpha}, \quad 0 \leq \alpha \leq 2 \quad (2)$$

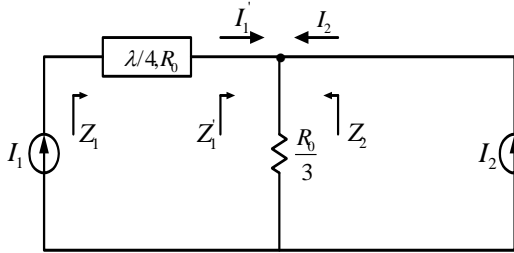


그림 1. 3-way 도허티 증폭기의 부하 임피던스 변조

위의 수식에서 만약에 I_2 가 0이 되면 carrier amplifier 앞에서 바라본 임피던스 Z_1 이 $3 \cdot R_0$ 가 되고, I_2 가 I_1 의 2배가 되면 R_0 가 됨을 알 수 있다. 따라서, 3-way 도허티 증폭기의 경우에는 I_2 의 값에 따라서 Z_1 이 $R_0 \sim 3 \cdot R_0$ 사이의 값으로 부하 변조될 수 있다. 그런데 실제로 3-way 도허티 증폭기를 제작할 때에는 낮은 전력 레벨에서 peaking amplifier가 꺼져도 peaking amplifier의 기생 임피던스 때문에 I_2 의 임피던스가 개방으로 보이지 않으므로 부하 변조가 제대로 이루어지지 않는다. 이러한 문제를 개선하기 위해 phase offset line를 첨가시킴으로써 낮은 전력 레벨에서 peaking amplifier가 개방된 것처럼 보이게 만든다[4].

그림 2는 3-way 도허티 증폭기의 회로도를 나타낸다. 여기서 Peaking amplifier 입력단의 $\lambda/4(50 \Omega)$ 선로는 carrier amplifier와의 위상차를 보상해주기 위한 것이며, 최종 출력단의 $\lambda/4(R_T)$ 선로는 임피던스 50Ω 을 $50/3 \Omega$ 으로 변환시키기 위한 것이다.

이러한 3-way 도허티 증폭기에서 선형성이 개선되는 메커니즘은 carrier amplifier의 bias를 class AB mode로 고정시키고, peaking amplifier의 bias를 적절히 낮출 때 carrier amplifier가 만들어내는 IM_3 성분과 peaking amplifier가 만들어내는 IM_3 성분이 크기가 비슷하게 되어지고, 위상차가 180° 에 가깝게 되어져서 이들이 서로 상쇄되므로 전체 증폭기의 선형성이 향상된다. 따라서 peaking amplifier의 bias point는 3-way 도허티 증폭기의 출력 전력을 고정시키고 peaking amplifier의 bias를 낮추어 갈 때 선형성이 가장 많이 개선되는 지점으로 결정된다[5].

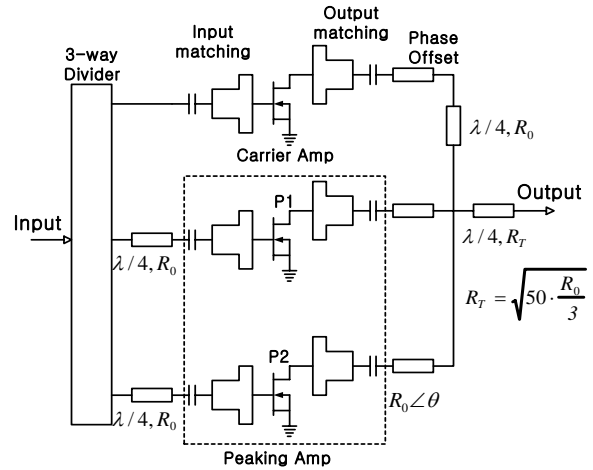


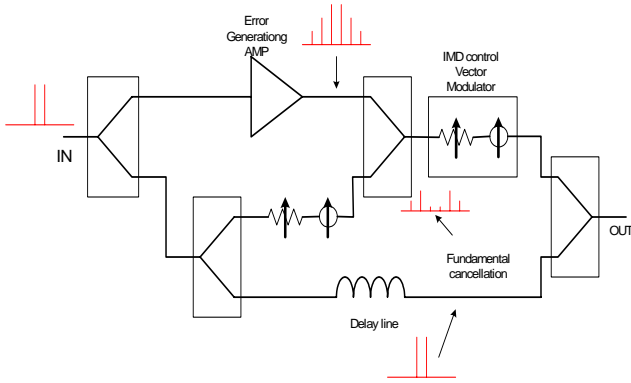
그림 2. 3-way 도허티 증폭기 회로도

본 논문에서는 기존에 이미 만들어진, class AB 증폭기에 비해 출력전력이 30dBm에서 ACLR(Adjacent Channel Leakage Ratio)이 9.97dB, 효율이 2.1 % 정도 개선된, 3-way 도허티 증폭기를 사용하였다[5].

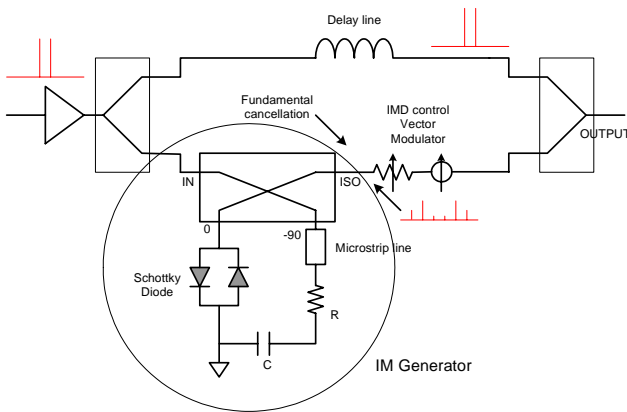
III. 3-way 도허티 증폭기의 선형성을 개선하기 위한 Predistorter 구현

PD는 main amplifier의 비선형성을 보상하기 위해서 사용되어지며, 이를 위해서는 main amplifier에서 생성되는 IM(InterModulation) 성분과 크기가 같으면서 위상이 반대가 되는 IM성분을 만들어주어야 한다. 일반적으로 Main amplifier가 만들어내는 IM성분 중에 IM_3 성분이 가장 두드러지므로 간단하게 PD를 구현할 때에는 주로 IM_3 를 발생시키는 3차 PD를 사용한다. 그러나 IM_3 , IM_5 등을 독립적으로 제어할 수 있는 구조를 사용하면 좀 더 우수한 성능을 얻을 수 있다[2]. 3-way 도허티 증폭기의 경우에는 그림 5(b)에서 보는 것처럼 IM_5 는 HPA 스펙을 만족하지만, IM_3 는 이를 만족시키지 못하므로 본 논문에서는 이를 개선하기 위하여 IM_3 에 초점을 맞춘 3차 PD를 제작하였다.

흔히 사용되는 PD의 구조는 아래의 그림 3(a)에서 보는 것처럼 Error Generating AMP로 IM성분을 만들고 여기에서 발생하는 fundamental 성분을 상쇄시키는 패스를 따로 갖는 형태와 그림 3(b)에 제시된 것처럼 fundamental 성분을 상쇄시키는 패스를 갖지 않는 형태가 있다. 그림 3(b)와 같은 형태의 PD는 fundamental 성분을 상쇄시키는 패스가 필요없기 때문에 회로의 크기를 줄일 수 있는 이점이 있다[2],[3].



(a)



(b)

그림 3. 주신호 제거를 위한
(a) 루프를 가지는 PD와 (b) 루프를 갖는 PD

본 논문에서는 PD의 크기를 줄이기 위하여 그림 3(b)와 같은 구조의 PD를 사용하였다. 그림 3(b)의 PD는 2개의 패스로 구성되어 있다. 하나는 fundamental 신호를 위한 패스이고, 다른 하나는 IM generator에서 만들어진 IM 신호를 위한 패스이다. Fundamental 신호를 위한 패스는 두 패스간의 지연 차이를 보상해주는 delay line을 포함하며, IM 신호를 위한 패스는 IM generator와 IM 신호를 제어하는 vector modulator로 구성되어 있다. IM generator는 자체적으로 fundamental 성분을 상당히 억제시키면서 적절한 IM 성분을 만들어 낼 수 있다[3]. 이렇게 만들어진 fundamental 신호와 IM 신호가 결합되어져서 3-way 도허티 증폭기의 입력으로 들어가게 된다.

IM generator는 90° hybrid, schottky diode, 직렬 RC 네트워크와 마이크로 스트립 라인으로 구성되어 있다. Hybrid coupler의 각 포트는 그림 3(b)에 IN, ISO, 0°, -90°로 표시하였다.

0° 포트의 schottky 다이오드에서 IM 성분을 발생시

킨 후에, IN과 ISO 포트에 fundamental 성분과 IM 성분을 반사시키고, -90°로 입력된 fundamental 성분은 RC reflection network에 의해 IN과 ISO 포트에 반사된다. 따라서, ISO 포트에는 0°, -90° 포트에서 반사되어진 fundamental 성분이 합쳐지게 된다. 이 때, -90° 포트의 R, C 값과 마이크로 스트립 라인의 길이를 적절히 조절하면 ISO 포트에 나오는 fundamental 성분을 상당히 억제시킬 수 있다.

한편, 3-way 도허티 증폭기에 맞는 PD를 구현하기 위해서는, -90° 포트의 R, C 값과 마이크로 스트립 라인의 길이를 조절하여 ISO 포트에서의 fundamental 성분이 억제되어지는 동시에 IM₃ 성분이 포화되어져야 한다.

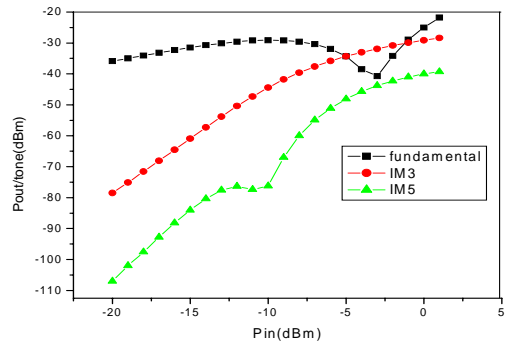


그림 4. IM generator의 시뮬레이션 결과

이와 같은 특성을 갖는 IM generator의 시뮬레이션 결과가 그림 4에 있다. 그림 4에서 볼 수 있는 것처럼 IM₃ 성분이 포화되어지는 영역에서 넓은 범위에 걸쳐 fundamental 성분이 상당히 억제되는 것을 볼 수 있다. 그러므로 이 영역에서 fundamental 패스에 영향을 주지 않으면서 IM₃ 성분의 크기와 위상을 vector modulator를 이용하여 독립적으로 제어할 수 있다.

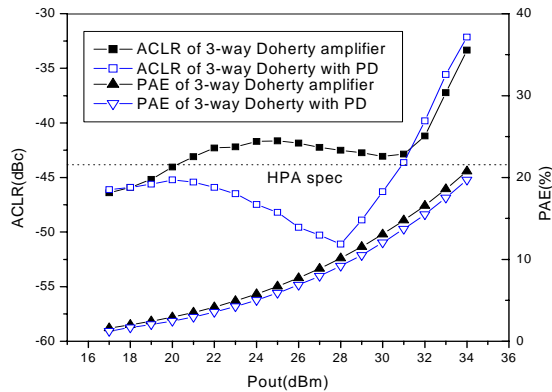
이와 같은 경우는 정상적인 PD를 동작시키는 경우와는 다소 차이가 있다. 왜냐하면 일반적인 전력 증폭기의 경우에는 전력 레벨이 증가할수록 IM₃ 성분이 증가하는 경향을 보이지만, 본 실험에서 사용된 3-way 도허티 증폭기의 경우에는 선형성을 증가시키기 위해 carrier amp와 peaking amp의 IM₃ 성분을 자체적으로 상쇄시켜 전체 IM₃ 성분을 감소시키는 메커니즘을 가지고 있어서 이미 어느 정도 IM₃ 성분이 줄어든 상태에 있기 때문이다.

기존의 PD는 PD의 입력 전력이 낮은 레벨에서 fundamental 성분이 억제되어지면서 IM₃ 성분이 증가하는 영역을 사용하였다. 그러나 만약에 기존의 PD에서처럼 IM₃ 레벨이 증가하는 영역에서 PD를 동작시킨다면 3-way 도허티 증폭기 자체적으로 이미 개선시킨

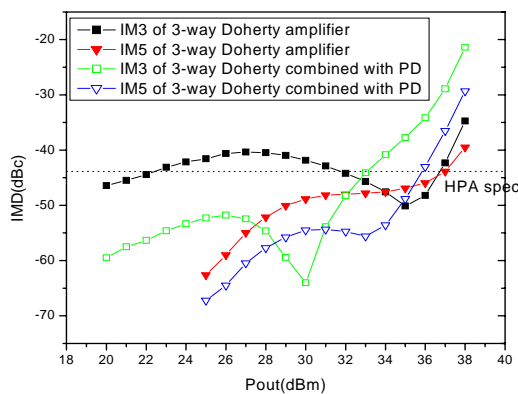
IMD 특성을 악화시킬 우려가 있다. 따라서 3-way 도허티 증폭기 자체의 IMD 특성에 맞는 PD를 제작할 때는 IM generator에서 나오는 IM_3 성분이 포화되어지는 영역에서 PD를 동작시켜야 한다.

IV. 실험 결과

제작된 회로의 검증을 위해 HPA 스펙을 기준으로 3-way 도허티 증폭기만의 경우와 PD를 붙인 경우를 비교하였다. 실험에 사용된 신호는 WCDMA의 경우에는 chip rate가 3.84 Mcps이고 중심주파수가 2.14 GHz 인 forward link 신호를 사용하였으며, two tone의 경우에는 중심주파수가 2.14 GHz이고 1 MHz 간격을 갖는 신호를 사용하였다.



(a) WCDMA test



(b) Two-tone test

그림 5. 3-way Doherty와 3-Doherty combined with PD

그림 5는 3-way 도허티 증폭기와 PD를 붙인 3-way 도허티 증폭기에 WCDMA 신호와 two-tone 신호를 인가했을 때의 각각의 결과를 보여준다. 그림 5(a)를 보면 3-way 도허티 증폭기만의 경우에는 ACLR이 HPA 스펙에는 다소 못미치지만, PD를 붙인 경우에는

Pout이 31dBm 이하의 넓은 영역에서 선형성이 개선되어 HPA 스펙을 만족시키는 것을 볼 수 있다. 특히 Pout이 28dBm에서는 ACLR이 -42.51 dBc에서 -51.11 dBc로 가장 많이 개선되었다(8.6 dB). 그림 5(b)를 보면 3-way 도허티 증폭기만의 경우에는 IM_3 레벨이 HPA 스펙을 만족시키지 못하지만 PD를 붙인 경우에는 Pout이 32dBm 이하의 넓은 영역에서 HPA 스펙을 만족시킨다. 그리고 Pout이 35dBm 이하에서 IM_5 성분도 전체적으로 5dB 정도가 개선되는 것을 볼 수 있지만, 경우에 따라서는 IM_5 레벨이 더 올라갈 수도 있을 것이다. 하지만 IM_3 성분의 마진이 크기 때문에 IM_3 의 마진을 얼마간 희생시키면 이러한 경우에도 IM_5 를 개선할 수 있을 것이라고 생각된다. 그리고 3-way 도허티 증폭기만의 경우에 비해 PD를 붙인 경우의 효율이 거의 비슷한 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 선형성이 최적화된 3-way 도허티 증폭기에 이에 맞는 PD를 결합시켜서 3-way 도허티 증폭기의 효율을 비슷하게 유지하면서 선형성을 더욱 개선하는 방법을 소개하였다. 여기서 사용된 PD는 정상적인 PD와는 달리 IM_3 성분이 상당히 포화된 영역을 사용하였으며, PD가 결합된 3-way 도허티 증폭기는 넓은 출력 범위에서 HPA 스펙을 만족하였다. 따라서, 전력을 좀 더 키워서 3-way 도허티 증폭기와 이에 맞는 PD를 결합시키면 회로의 구조가 간단하면서 저렴한 HPA 모듈로 사용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] S.C. Cripps, "RF Power Amplifiers for Wireless Communications," Artech House Inc., Norwood, MA, 1999.
- [2] 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
- [3] T. Nojima and T. Konno, "Cuber predistortion linearizer for relay equipment in 800 MHz band land mobile telephone system," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-34, pp. 169-177, Nov. 1985.
- [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] 차정현, 양영구, 신범재, 김범만 "N-way 도허티 증폭기의 선형성 최적화 설계 및 성능 비교," *대한 전자공학회 춘계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집* Vol.25, No.1, pp.291-294, May 2002.

